



Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
Polska Akademia Nauk

Rozprawa doktorska

**Wpływ struktury przestrzennej i pokrycia terenu
na warunki termiczne i biotermiczne na przykładzie Warszawy**

The influence of the spatial structure and land cover
on thermal and biothermal conditions based on the case of Warsaw

mgr Kaja Czarnecka

Praca doktorska wykonana pod kierunkiem:
dr hab. Magdaleny Kuchcik, prof. IGiPZ PAN

oraz

dr Katarzyny Lindner-Cendrowskiej

Warszawa, 2026

Podziękowania

Pragnę złożyć najserdeczniejsze podziękowania wszystkim osobom, które przyczyniły się do powstania niniejszej rozprawy.

W szczególności dziękuję moim promotorkom, **dr hab. Magdalenie Kuchcik, prof. IGiPZ PAN** i **dr Katarzynie Lindner-Cendrowskiej**, za opiekę naukową, cenne wskazówki, ogromne zaangażowanie, dbałość o detale oraz życzliwość okazywaną każdego dnia.

Wyrazy wdzięczności kieruję również do **współautorów publikacji**, całego **Zakładu Badań Klimatu** i **pracowników IGiPZ PAN**, za inspirujące dyskusje, wymianę doświadczeń oraz stworzenie wspólnie, twórczej atmosfery pracy.

Ogromnie dziękuję **przyjaciółom** za obecność, dobre słowa oraz wszystkie rozmowy, które dodawały mi siły.

Szczególne podziękowania składam mojej rodzinie, a w szczególności **mamie Kasi, tacie Darkowi** i **siostrze Julii**. Dziękuję Wam za wiarę we mnie, za wsparcie na każdym etapie tej drogi i za to, że nauczyliście mnie dostrzegać piękno tego świata.

Wielką wdzięczność pragnę wyrazić **mężowi Karolowi** za bycie moim oparciem, nieustanne motywowanie, rzucanie nowego światła na rzeczywistość i abstrakcyjne rozmowy spoza Ziemi, które pozwoliły mi przetrwać ten czas.

Bez Was powstanie tej pracy nie byłoby możliwe.

Spis treści

I. Formalne elementy rozprawy doktorskiej	4
1. Streszczenie rozprawy doktorskiej w języku polskim	4
2. Streszczenie rozprawy doktorskiej w języku angielskim	5
3. Wykaz publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej.....	6
4. Opis wkładu autorki w poszczególne artykuły włączone do rozprawy	7
4.1. Oświadczenie współautorów publikacji I	8
4.2. Oświadczenie współautorów publikacji III.....	8
5. Skróty.....	10
II. Część badawcza rozprawy doktorskiej	12
1. Wprowadzenie	12
1.1. Dotychczasowy stan badań	16
1.2. Cel badań.....	21
2. Obszar badań.....	22
2.1. Klimat Warszawy	23
2.2. Struktura przestrzenna Warszawy	26
3. Materiały i metody badawcze.....	29
3.1. Charakterystyki termiczne.....	29
3.2. Charakterystyki przestrzenne i pokrycie terenu	33
3.3. Analizy statystyczne	39
4. Wyniki badań i dyskusja.....	42
4.1. Wpływ najbliższego otoczenia na temperaturę powietrza	42
4.2. Wpływ pokrycia terenu na temperaturę powierzchni.....	47
4.3. Wpływ elementów środowiska miejskiego na kształtowanie obciążeń termicznych..	53
5. Podsumowanie.....	62
6. Spis tabel i rycin	66
7. Bibliografia.....	67
III. Publikacje wchodzące w skład rozprawy doktorskiej	82

I. Formalne elementy rozprawy doktorskiej

1. Streszczenie rozprawy doktorskiej w języku polskim

Ekspansja miast w warunkach nasilającej się zmiany klimatu prowadzi do istotnych przekształceń lokalnego środowiska termicznego. Zróżnicowanie pokrycia terenu, wysoka intensywność zabudowy, ograniczony udział roślinności oraz specyficzna geometria obszarów zurbanizowanych wpływają na bilans cieplny miasta, skutkując powstawaniem silnie zróżnicowanej mozaiki termicznej. W warunkach rosnącej częstości fal upałów oraz zwiększonego ryzyka występowania stresu cieplnego, zrozumienie zależności pomiędzy morfologią miejską a warunkami termicznymi i biotermicznymi nabiera kluczowego znaczenia dla planowania przestrzennego oraz projektowania działań adaptacyjnych.

Celem niniejszej rozprawy było **określenie wpływu struktury środowiska miejskiego na kształtowanie lokalnych warunków termicznych i biotermicznych w różnych skalach przestrzennych i czasowych** na przykładzie Warszawy. Praca przyjęła formę cyklu trzech tematycznie spójnych artykułów naukowych, z których każdy odpowiadał jednemu z celów szczegółowych: **C1.** Identyfikacja wpływu elementów środowiska parametryzowanych wskaźnikami zagospodarowania przestrzennego na charakterystyki temperatury powietrza w trakcie ekstremalnie ciepłych miesięcy oraz określenie skali przestrzennej, w której zależności te są najsilniejsze; **C2.** Określenie przestrzennego zróżnicowania „hot spotów” i „cold spotów”, ich powiązań z typami pokrycia terenu oraz reżimem temperatury powietrza w ujęciu rocznym i sezonowym (lato i zima); **C3.** Ocena wpływu elementów środowiska na kształtowanie obciążeń termicznych człowieka w przestrzeni parków miejskich w różnych fazach sezonu wegetacyjnego i skalach przestrzennych.

W badaniach zastosowano podejście wieloźródłowe, dostosowane do specyfiki poszczególnych celów badawczych. Wykorzystano dane pochodzące z sieci monitoringu temperatury powietrza, kampanii pomiarowych oraz reanalizy klimatycznej ERA5-HEAT, a także inwentaryzacji terenowych, zobrażeń satelitarnych, dostępnych baz danych i produktów GIS oraz danych pozyskanych z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania. Analizy prowadzono w różnych skalach przestrzennych (punkt, bufory o promieniach 10 m, 50 m i 100 m, całe miasto) oraz czasowych (wybrane miesiące, sezon wegetacyjny, analizy wieloletnie).

Uzyskane wyniki wskazują, że obecność roślinności stanowi jeden z kluczowych czynników kształtujących lokalne warunki termiczne w mieście, szczególnie w odniesieniu do wartości minimalnych temperatury powietrza oraz redukcji obciążeń cieplnych. Jednocześnie wysoka intensywność zabudowy oraz duży udział powierzchni sztucznych sprzyjają pogorszeniu warunków termicznych i biotermicznych. Należy jednak podkreślić, że nie wszystkie analizowane wskaźniki oraz skale przestrzenne wykazują istotne relacje z badanymi charakterystykami klimatu lokalnego. Obszary zabudowane nie tworzą jednorodnego, niekorzystnego środowiska termicznego, a tereny zieleni nie zawsze gwarantują warunki sprzyjające komfortowi cieplnemu. Co więcej, kierunek obserwowanych zależności może ulegać odwróceniu. Niniejsze badania mają także charakter aplikacyjny, ułatwiając dialog między klimatologami, planistami i decydentami odpowiedzialnymi za proces zwiększania odporności miasta na zmianę klimatu.

Słowa kluczowe: klimat i bioklimat miasta, morfologia miejska, wskaźniki zagospodarowania przestrzennego, charakterystyki termiczne

2. Streszczenie rozprawy doktorskiej w języku angielskim

Urban expansion under conditions of intensifying climate change leads to significant transformations of the local thermal environment. Variability in land cover, high built-up intensity, limited vegetation cover, and the specific geometry of urban areas all influence the urban energy balance, resulting in the formation of a highly heterogeneous thermal mosaic. In the context of the increasing frequency of heatwaves and a growing risk of heat stress, understanding the relationships between urban morphology and thermal as well as biothermal conditions has become crucial for spatial planning and the design of climate adaptation measures.

This dissertation aimed to determine the impact of urban environment structure on local thermal and biothermal conditions across different spatial and temporal scales, using Warsaw as a case study. The dissertation comprised a coherent series of three thematically linked scientific articles, each addressing the specific objectives: **C1.** Identification of the impact of environmental features, parameterised using spatial development indicators, on air temperature characteristics during extremely warm months, and determination of the spatial scale at which these relationships are the strongest; **C2.** Determination of the spatial distribution of thermal “hot spots” and “cold spots”, their associations with land cover types and air temperature regimes on annual and seasonal scales (summer and winter); **C3.** Assessment of the impact of environmental elements on human thermal stress in urban parks across different phases of the growing season and at varying spatial scales.

A multi-source methodological approach was applied, tailored to the specific research objectives. The study utilised data from an air temperature monitoring network, measurement campaigns, and the ERA5-HEAT climate reanalysis, as well as field inventories, satellite imagery, available databases, GIS products, and datasets derived using specialised software. Analyses were conducted at multiple spatial scales (point scale, buffers with radii of 10 m, 50 m, 100 m, and the city scale), as well as temporal scales (selected months, the growing season, and multi-year analyses).

The results indicate that the presence of vegetation is one of the key factors shaping local thermal conditions in the city, particularly with respect to minimum air temperature values and the reduction of thermal stress. At the same time, high built-up intensity and a large proportion of impervious surfaces contribute to the deterioration of thermal and biothermal conditions. However, it should be emphasised that not all of the analysed indicators and spatial scales show statistically significant relationships with the investigated characteristics of the local climate. Built-up areas do not constitute a homogeneous and uniformly unfavourable thermal environment, while green spaces do not always guarantee conditions conducive to thermal comfort. Moreover, the direction of the observed relationships may even reverse. The study also has practical implications and may facilitate dialogue between climatologists, planners, and decision-makers responsible for enhancing urban resilience to climate change.

Keywords: urban climate and bioclimate, urban morphology, spatial development indicators, thermal characteristics

3. Wykaz publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej

Niniejsza rozprawa doktorska składa się z cyklu trzech powiązanych tematycznie artykułów naukowych, opublikowanych w czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Wszystkie znajdują się w ministerialnym wykazie czasopism naukowych (kolejno 100 pkt., 100 pkt. i 200 pkt.) oraz posiadają współczynnik *Impact Factor* (o łącznym IF = 20,1). Artykułom została przypisana numeracja, do której odwołania pojawiają się w dalszej części rozprawy:

- I. **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. DOI: 10.1016/j.scs.2023.105014.
- II. **Czarnecka K.** 2025. *Surface temperature extremes in urban areas: distribution, morphological drivers and air temperature patterns*. Geographia Polonica, 98, 2. DOI: 10.7163/GPol.0297.
- III. **Czarnecka K.**, Kuchcik M., Derwisz K., Jarocińska A., Kowalska A., Lindner-Cendrowska K., Rabczenko D. 2026. *Assessing the role of environmental factors in shaping human thermal stress within urban parks during the growing season*. Building and Environment, 296, 114506. DOI: 10.1016/j.buildenv.2026.114506. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132326003124>.

4. Opis wkładu autorki w poszczególne artykuły włączone do rozprawy

Ad. I. Oświadczam, że w artykule: **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, mój udział pracy wyniósł około **80%**. Mój wkład obejmował współudział w sformułowaniu problemu badawczego i celów pracy, opracowaniu koncepcji metodologii badań oraz obliczeniu charakterystyk termicznych. Przeprowadziłam przegląd literatury, pozyskałam i zdigitalizowałam dane przestrzenne, opracowałam bazę danych, wykonałam analizę i interpretację wyników, a także przygotowałam pierwotną wersję manuskryptu oraz opracowania graficzne.

Ad. II. Oświadczam, że w artykule: **Czarnecka K.** 2025. *Surface temperature extremes in urban areas: distribution, morphological drivers and air temperature patterns*. Geographia Polonica, 98, 2, mój udział pracy wyniósł **100%**. Sformułowałam problem badawczy i cele pracy, opracowałam koncepcję metodologiczną badań i dokonałam przeglądu literatury. Przetworzyłam i przeanalizowałam mapy temperatury powierzchni terenu, CORINE Land Cover oraz Global Map of Local Climate Zones dla Warszawy wraz z obliczonymi wcześniej wskaźnikami zagospodarowania przestrzennego. Zinterpretowałam wyniki, przygotowałam manuskrypt oraz materiały graficzne.

Ad. III. Oświadczam, że w artykule: **Czarnecka K.**, Kuchcik M., Derwisz K., Jarocińska A., Kowalska A., Lindner-Cendrowska K., Rabczenko D. 2026. *Assessing the role of environmental factors in shaping human thermal stress within urban parks during the growing season*. Building and Environment, 296, 114506, mój udział pracy wyniósł około **60%**. Mój wkład obejmował współudział w sformułowaniu problemu badawczego i celów pracy, opracowaniu koncepcji metodologii badań, obliczeniu wskaźników przestrzennych oraz analizie danych. Przeprowadziłam przegląd literatury, opracowałam bazę danych, dokonałam interpretacji wyników, przygotowałam pierwotną wersję manuskryptu oraz opracowania graficzne.

25.05.2026r. Kaja Czarnecka

data i podpis

4.1. Oświadczenie współautorów publikacji I

Niniejszym oświadczam, że wkład w publikację pt.

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. DOI: 10.1016/j.scs.2023.105014

był następujący:

Kaja Czarnecka (autor główny i korespondencyjny) była odpowiedzialna za konceptualizację, metodologię, realizację badań, przygotowanie danych, przeprowadzenie analiz, wizualizację wyników oraz przygotowanie manuskryptu artykułu.

Magdalena Kuchcik zapewniła materiały, była odpowiedzialna za konceptualizację, realizację badań, przygotowanie danych, nadzór naukowy, redakcję i edycję tekstu.

Jarosław Baranowski zapewnił materiały i był odpowiedzialny za realizację badań.

Imię i nazwisko współautora	Procentowy wkład autorski	Data i podpis współautora
Kaja Czarnecka	80%	25.05.2026 Kja Czarnecka
Magdalena Kuchcik	15%	18.05.2026 MKuchcik
Jarosław Baranowski	5%	25.05.2026 J. Baranowski

4.2. Oświadczenie współautorów publikacji III

Niniejszym oświadczam, że wkład w publikację pt.

Czarnecka K., Kuchcik M., Derwisz K., Jarocińska A., Kowalska A., Lindner-Cendrowska K., Rabczenko D. 2026. *Assessing the role of environmental factors in shaping human thermal stress within urban parks during the growing season*. Building and Environment, 296, 114506. DOI: 10.1016/j.buildenv.2026.114506.

był następujący:

Kaja Czarnecka (autor główny i korespondencyjny) była odpowiedzialna za konceptualizację, metodologię, przeprowadzenie badań, przygotowanie danych, przeprowadzenie analiz, walidację i wizualizację wyników oraz przygotowanie manuskryptu artykułu;

Magdalena Kuchcik była odpowiedzialna za konceptualizację, zdobycie środków i materiałów na badania, organizację pracy projektu, nadzór naukowy, redakcję i edycję tekstu;

Kacper Derwisz był odpowiedzialny za przygotowanie danych i przeprowadzenie badań;

Anna Jarocińska była odpowiedzialna za konceptualizację, redakcję i edycję tekstu;

Anna Kowalska była odpowiedzialna za konceptualizację, przeprowadzenie badań, redakcję i edycję tekstu;

Katarzyna Lindner-Cendrowska była odpowiedzialna za konceptualizację, metodologię, przeprowadzenie badań, przygotowanie danych, przeprowadzenie analiz, nadzór naukowy, redakcję i edycję tekstu;

Daniel Rabcenko był odpowiedzialny za metodologię i przeprowadzenie analiz.

Imię i nazwisko współautora	Procentowy wkład autorski	Data i podpis współautora
Kaja Czarnecka	60%	Kja Czarnecka 25.05.2026
Magdalena Kuchcik	10%	MKuchcik 18.05.2026
Kacper Derwisz	5%	KDerwisz 21.05.2026
Anna Jarocińska	5%	A.Jaroc 18.05.2026
Anna Kowalska	5%	A.Kowalska 18.05.2026
Katarzyna Lindner-Cendrowska	10%	KLC 18.05.2026
Daniel Rabcenko	5%	DR 27.05.2026

5. Skróty

W niniejszej pracy wykorzystano skróty pojęć w języku angielskim, tak aby zachować spójność między rozprawą a załączonymi publikacjami. Poniższa lista zawiera ich polskie odpowiedniki i została przedstawiona w porządku alfabetycznym. W tabeli występują różne skróty odnoszące się do tych samych pojęć, zgodnie z nomenklaturą przyjętą w poszczególnych artykułach.

Skrót	Pełna nazwa	Numer artykułu
AT	Temperatura powietrza	II
AT _{abs_max}	Absolutna maksymalna temperatura powietrza w wieloleciu	II
AT _{abs_min}	Absolutna minimalna temperatura powietrza w wieloleciu	II
AT _{avg}	Średnia wieloletnia temperatura powietrza	II
AT _{max}	Średnia wieloletnia maksymalna temperatura powietrza	II
AT _{min}	Średnia wieloletnia minimalna temperatura powietrza	II
avg	Średnia temperatura powietrza	I
BCR	Gęstość zabudowy	I, II, III
BH _{max}	Maksymalna wysokość budynków	I, II, III
BH _{mean}	Średnia wysokość budynków	I, II, III
CLC	Baza danych CORINE Land Cover	II
CLC2018	CORINE Land Cover 2018	
CLC2000	CORINE Land Cover 2000	
DC	Odległość od centrum miasta	II, III
down	Czas (w minutach) między wystąpieniem maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza	I
ELAI	Efektywny wskaźnik powierzchni liści	III
EVI	Ulepszony wskaźnik roślinności	III
ERA5-HEAT	Zbiór danych reanalizy klimatycznej „Human thErmAl comforT”	III
EXPO	Typ ekspozycji na słońce (w cieniu/ na słońcu)	III
FAR	Wskaźnik intensywności zabudowy	I, II, III
GAM	Uogólniony model addytywny	III
k1/k5/k10	Liczba 10-minutowych pomiarów temperatury powietrza poniżej wartości 1./5./10. percentyla	I
k90/k95/k99	Liczba 10-minutowych pomiarów temperatury powietrza powyżej wartości 90./95./99. percentyla	I
LCZ	Lokalna Strefa Klimatyczna (ang. <i>Local Climate Zone</i>)	II

LST	Temperatura powierzchni terenu	II
MAE / RMSE	Średni błąd bezwzględny/ pierwiastek błędu średniokwadratowego	III
max	Średnia maksymalna temperatura powietrza	I
max_a/max_d/ max_u	Różnica między maksymalną temperaturą powietrza dwóch kolejnych dni: wartość bezwzględna / przy spadku / przy wzroście	I
min	Średnia minimalna temperatura powietrza	I
min_a/min_d / min_u	Różnica między minimalną temperaturą powietrza dwóch kolejnych dni: wartość bezwzględna / przy spadku / przy wzroście	I
MRT	Średnia temperatura promieniowania	III
NDBI	Znormalizowany różnicowy wskaźnik zabudowy	III
NDVI	Znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności	III
RBVA	Wskaźnik terenów biologicznie czynnych	I, II, III
RH	Wilgotność względna powietrza	III
SVF	Współczynnik widoku nieba	I, III
ta	Temperatura powietrza	III
TCD	Gęstość pokrycia koronami drzew	III
TCS	Termiczne „cold spoty”	II
tg	Temperatura termometru kulistego	III
THCS	Termiczne „hot spoty” i „cold spoty”	II
THS	Termiczne „hot spoty”	II
UHI	Miejska wyspa ciepła	I
up	Czas (w minutach) między wystąpieniem minimalnej i maksymalnej temperatury powietrza	I
UTCI	Uniwersalny wskaźnik obciążeń termicznych	III
UTCI _{diff}	Różnica wartości UTCI między stanowiskiem in situ a pochodzącymi z reanalizy	III
va	Prędkość wiatru	III
VEG _{gen}	Uogólniony typ roślinności	III
VEG _{spec}	Szczegółowy typ roślinności	III

II. Część badawcza rozprawy doktorskiej

1. Wprowadzenie

Urbanizacja jest jednym z najbardziej znaczących przejawów antropogenicznych zmian powierzchni Ziemi, prowadzącym do istotnych modyfikacji procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych kształtujących klimat lokalny (IPCC, 2023; Das i in., 2024). Wraz z rozrastaniem i zagęszczaniem obszarów zurbanizowanych powstaje środowisko termiczne zasadniczo odmienne od otaczających je terenów peryferyjnych. Jednym z najlepiej udokumentowanych przejawów tej transformacji jest efekt miejskiej wyspy ciepła (UHI), definiowany jako zjawisko polegające na występowaniu obszaru podwyższonej temperatury powietrza względem otaczającego go „oceanu chłodu” lub – w przypadku analiz temperatury powierzchni terenu (LST) – obszaru podwyższonej wartości LST (Oke, 1973; A. Błażejczyk i in., 2018; Fortuniak, 2019; Hidalgo-García i Arco-Díaz, 2022). Miejskie środowisko termiczne jest jednak znacznie bardziej złożone niż pojedynczy gradient temperatury. W mniejszych skalach przestrzennych ujawnia się złożona mozaika termiczna kształtowana przez niejednorodne pokrycie terenu, intensywność zabudowy, obecność lub brak roślinności oraz lokalną geometrię ulic i przestrzeni otwartych (Grimmond i in., 2010; J. Chen i in., 2020; Kuchcik i in., 2024; Ramani i in., 2024). W efekcie, w środowisku miejskim występują obszary o lokalnie znacznie wyższej lub niższej temperaturze powietrza lub powierzchni, często tworzące przestrzenie wyizolowane skupiska. Określane są one mianem termicznych „hot spotów” (THS) i „cold spotów” (TCS) (Mavrakou i in., 2018; Guerri i in., 2022; Kuchcik i in., 2026).

Rozmieszczenie obszarów wyróżniających się termicznie jest uzależnione od pory roku, pory dnia, rodzaju analizowanej charakterystyki termicznej oraz wysokości, na której wykonywany jest pomiar (K. Błażejczyk, Kuchcik i in., 2014; Naserikia i in., 2023; Hajto i in., 2025). Wynika to ze złożoności procesów kształtujących lokalny bilans cieplny miasta. W warstwie dachowej (ang. *canopy layer*) jest on modyfikowany m.in. przez właściwości termiczne materiałów sztucznych i naturalnych oraz przez

trójwymiarową strukturę urbanistyczną (Offerle i in., 2006; Grimmond i in., 2010; Crawford i in., 2017; Zieliński i in., 2018). Gęsta, wysoka zabudowa sprzyja wielokrotnym odbiciom promieniowania pomiędzy ścianami budynków i podłożem, a także może ograniczać nocne wychładzanie. Co więcej, uszczelnione powierzchnie sztuczne cechują się dużą zdolnością do magazynowania energii cieplnej, którą następnie stopniowo oddają do atmosfery po zachodzie słońca (Oke, 1988; Schrijvers i in., 2015). Istotną rolę odgrywają również relacje pomiędzy strumieniami ciepła jawnego i utajonego. Na obszarach pokrytych roślinnością znaczna część energii wykorzystywana jest w procesie ewapotranspiracji, co jest jedną z przyczyn ograniczenia nagrzewania się powierzchni naturalnych i przyziemnej warstwy powietrza (House-Peters i Chang, 2011; Yu i in., 2024). Efekt chłodzący roślinności wynika również z wykorzystywania energii słonecznej w procesie fotosyntezy, wysokiej pojemności cieplnej wody zawartej w tkankach spowalniającej ich nagrzewanie oraz zacienienia – zarówno podłoża, jak i w obrębie struktur rośliny (Rahman i in., 2020; Winbourne i in., 2020; Schwaab i in., 2021). Zastępowanie terenów biologicznie czynnych materiałami nieprzepuszczalnymi prowadzi do osłabienia tych procesów oraz wzrostu udziału ciepła jawnego w bilansie energetycznym miasta. Na przestrzenną i czasową zmienność warunków termicznych wpływają także różnice w dopływie promieniowania słonecznego oraz intensywności antropogenicznych emisji ciepła związanych z procesami metabolicznymi, transportem, działalnością przemysłową oraz funkcjonowaniem budynków i infrastruktury technicznej (Paszyński i in., 1999; Grimmond i in., 2010; Nidzgorska-Lencewicz i Mąkosza, 2016).

Unikalny zbiór cech kształtujących klimat dużych obszarów zurbanizowanych bezpośrednio wpływa na lokalne i wielkoskalowe systemy ekologiczne, powiązane ze środowiskiem, zdrowiem mieszkańców oraz uwarunkowaniami społeczno-ekonomicznymi (Ai i in., 2024). Jak wskazują Kozłowska-Szczęsna i in. (1997), atmosfera oddziałuje bezpośrednio na organizm człowieka przez skórę, drogi oddechowe oraz układ nerwowy wraz ze zmysłami. Warunki termiczne, którym poświęcona jest niniejsza rozprawa, oddziałują na receptory ciepła i zimna w skórze

człowieka (Kozłowska-Szczęsna i in., 1997; Bandoła, 2020; El Kadri i in., 2020). Gdy temperatura powietrza wykracza poza zakres warunków termoneutralnych (około 18–23 °C), dochodzi do zaburzenia gospodarki cieplnej organizmu. Jednakże poziom stresu termicznego oraz efektywność termoregulacji zależą od zintegrowanego oddziaływania temperatury i wilgotności powietrza, prędkości wiatru oraz średniej temperatury promieniowania (K. Błażejczyk i Kunert, 2011; Bröde i in., 2012; Jendritzky i in., 2012). W warunkach postępującej zmiany klimatu, miasta stają się obszarami szczególnie wrażliwymi na wzrost temperatury powietrza, co może prowadzić do nadmiernego obciążenia układu termoregulacji mieszkańców (Kuchcik, 2006; Lim, 2020; Tomczyk i in., 2025). Silny stres cieplny może skutkować odwodnieniem, wyczerpaniem, omdleniami, udarem cieplnym, a w skrajnych przypadkach nawet śmiercią (Semenza i in., 1996; Kovats i Hajat, 2008). Do grup szczególnie narażonych należą osoby powyżej 65. roku życia, kobiety w ciąży, dzieci oraz osoby cierpiące na przewlekłe choroby, m.in. układu krążenia i oddechowego (Flynn i in., 2005; Kuchcik, 2017; A. Błażejczyk i in., 2018). Długotrwałe fale upałów, których częstość będzie w przyszłości wzrastać, powodują zwiększenie liczby zgonów (D'Ippoliti i in., 2010; Ebi i in., 2021). W konsekwencji, umieralność związana z wysoką temperaturą powietrza stanie się coraz większym zagrożeniem, również na tych obszarach miejskich, które dotychczas nie doświadczały tak ekstremalnych warunków termicznych.

W celu ograniczania obciążeń cieplnych mieszkańców oraz zagrożeń wynikających z postępującej zmiany klimatu, w miastach wdrażane są działania adaptacyjne i mitygacyjne. Obejmują one zarówno zrównoważone planowanie rozwoju zabudowy, jak i wprowadzanie do przestrzeni miasta adaptacyjnych rozwiązań opartych na przyrodzie (Ji i in., 2024; H. Huang i in., 2026; Maksymiuk i in., 2026). Szczególne wyzwanie stanowi realizacja tego typu działań na obszarach silnie zurbanizowanych i intensywnie zagospodarowanych. Przykładami takich

przedsięwzięć są projekty rewitalizacji i zazieleniania centrum Warszawy,¹ a także projekt Grow Green Wrocław realizowany wśród zabudowy mieszkaniowej na Ołbinie.² Podobne działania podejmowane są również w innych dużych miastach europejskich, m.in. w Atenach, Rzymie, Oslo czy Kopenhadze (Santamouris i in., 2012; Salata i in., 2015; Maksymiuk i in., 2026). W Polsce w ramach opracowywania Miejskich Planów Adaptacji wykonywana jest ocena podatności miast na zmianę klimatu, analiza ich zdolności adaptacyjnych oraz identyfikacja zagrożeń dla środowiska zurbanizowanego i funkcjonowania struktur miejskich (Ministerstwo Środowiska, 2018; Januchta-Szostak, 2020; Pancewicz i in., 2022). Wśród proponowanych działań adaptacyjnych szczególne znaczenie przypisuje się poprawie warunków przewietrzania miast oraz zwiększaniu udziału błękitno-zielonej infrastruktury. Dotychczas największy nacisk kładziono na rozwiązania związane z retencją wód opadowych, podczas gdy elementy planowania przestrzennego mające na celu ograniczanie stresu cieplnego nadal pozostają niewystarczająco zaadresowane.

W procesie kreowania odpornych środowisk miejskich szczególną rolę odgrywa transfer wiedzy między klimatologami a projektantami przestrzeni miejskiej, administracją publiczną i mieszkańcami (Mills, 2006; Oke, 2006; Hebbert, 2014). Pomimo rosnącej liczby badań dotyczących klimatu miast, wyniki analiz często pozostają trudne do bezpośredniego wykorzystania w procesie planowania przestrzennego. Wynika to m.in. z braku standaryzacji metod, niejednolitej terminologii oraz ograniczonej liczby badań opartych na pomiarach warunków termicznych i biotermicznych w różnych strukturach urbanistycznych (Eliasson, 2000; Birkmann i in., 2021; Liu i in., 2025). Jednocześnie architekci i decydenci muszą godzić wyzwania wynikające ze zmiany klimatu z oczekiwaniami mieszkańców oraz uwarunkowaniami ekonomicznymi i funkcjonalnymi miasta. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera również partycypacja społeczna, umożliwiająca

¹ Urząd m.st. Warszawy. *Zielona Marszałkowska*. <https://um.warszawa.pl/waw/nowe-centrum-warszawy/zielona-marszalkowska>. Dostęp: 20.05.2026 r.

² ARAW S.A., Gmina Wrocław. *Grow Green Wrocław*. <https://www.wroclaw.pl/zie-lony-wroclaw/grow-greenwroclaw>. Dostęp: 20.05.2026 r.

uwzględnienie potrzeb lokalnych społeczności oraz zwiększenie akceptacji dla wdrażanych działań adaptacyjnych (Brzeziński i in., 2024; Kuchcik i in., 2025). Mieszkańcy, poprzez codzienne wybory oraz zaangażowanie w życie społeczne i polityczne, odgrywają istotną rolę w transformacji obszarów zurbanizowanych w zrównoważone ośrodki miejskie.

W świetle przedstawionych uwarunkowań jednym z kluczowych wyzwań współczesnej klimatologii miejskiej pozostaje dostarczanie narzędzi i wiedzy umożliwiających identyfikację zależności pomiędzy cechami środowiska zurbanizowanego a warunkami termicznymi i biotermicznymi. Równie istotne pozostaje przełożenie tej wiedzy na rozwiązania możliwe do wykorzystania w praktyce planistycznej. Szczęólnego znaczenia nabiera przy tym identyfikacja i ilościowy opis takich cech morfologii miejskiej, które mogą wpływać na ograniczanie stresu cieplnego oraz zwiększenie odporności miast na skutki zmiany klimatu. Problematyce tej poświęcona jest niniejsza rozprawa doktorska.

1.1. Dotychczasowy stan badań

Klimatologia miejska jest interdyscyplinarną dziedziną nauki koncentrującą się na badaniu oddziaływania obszarów zurbanizowanych na klimat oraz wykorzystaniu tej wiedzy do wspierania procesów planowania, projektowania i kształtowania środowiska miejskiego (Mills, 2014). Jej rozwój był ściśle związany z postępującą urbanizacją, nasileniem antropogenicznych przekształceń krajobrazu, wzrostem zainteresowania wpływem działalności człowieka na atmosferę oraz rozwojem metod badawczych (Arnfield, 2003; Mills, 2014). Choć pierwsze znane zapiski dotyczące warunków meteorologicznych osad ludzkich powstały tysiące lat temu (Yoshino, 1990), za jedno z pionierskich opracowań stanowiących naukowe podstawy współczesnej klimatologii miejskiej uznaje się trzypiętomową pracę *The Climate of London* autorstwa Howarda (1833). Dzieło to opierało się na wieloletnich obserwacjach meteorologicznych prowadzonych w Londynie i jego otoczeniu, a jednym z najważniejszych rezultatów było udokumentowanie miejskiej wyspy ciepła.

Dynamiczny rozwój dziedziny nastąpił w pierwszej połowie XX wieku przede wszystkim w europejskich i północnoamerykańskich ośrodkach miejskich (Oke, 1974; Janković, 2013). Po okresie spowolnienia związanego z II wojną światową, obserwowano intensyfikację badań obejmujących również inne regiony świata.

W Polsce początki badań prowadzonych na obszarach miejskich związane były z rozwojem pomiarów meteorologicznych oraz powstaniem pierwszych opracowań regionalnych już w XVII wieku (Kozłowska-Szczęsna i in., 1996), natomiast w XIX w. zaczęto zwracać uwagę na szczególny klimatotwórczy wpływ dużych ośrodków miejskich (Jastrzębowski, 1841). Na początku XX w. pojawiły się bardziej szczegółowe opracowania wskazujące między innymi na występowanie miejskiej wyspy ciepła, zmniejszenie dopływu promieniowania słonecznego, modyfikację pola opadów atmosferycznych oraz wpływ zabudowy na lokalne warunki przewietrzania (Merecki, 1914; Zych, 1961; Kaczorowska, 1967; Lewińska, 1967; Kossowska, 1973). Po II wojnie światowej nastąpił intensywny rozwój polskiej klimatologii miejskiej, zgodny z trendami obserwowanymi na świecie (Fortuniak, 2019). Współczesne nurty badań klimatu największych ośrodków miejskich w Polsce obejmują m.in. bioklimatologię i ocenę komfortu termicznego człowieka, wykorzystanie modelowania numerycznego i technik teledetekcyjnych, pomiary składowych bilansu cieplnego, analizę uwarunkowań topograficznych i morfologicznych oraz rozwój gęstych sieci pomiarowych (Bokwa, 2019; Filipiak i Miętus, 2019; Fortuniak i in., 2019; Kaszewski, 2019; Kuchcik i in., 2019; Półrolniczak i in., 2019; Przybylak i Uscka-Kowalkowska, 2019; Szymanowski i in., 2019; Żmudzka, 2019).

W ostatnich latach badania nad klimatem miast na świecie charakteryzowały się dynamicznym rozwojem metod badawczych, obejmujących coraz szersze wykorzystanie wysokorozdzielczych baz danych przestrzennych, modelowania numerycznego, symulacji, metod uczenia maszynowego oraz narzędzi opartych na sztucznej inteligencji (Di Napoli i in., 2021; Li i in., 2023; Manapragada i in., 2025; Suleimany i in., 2025). Podejścia te stwarzają nowe możliwości pozyskiwania, integracji i przetwarzania danych klimatycznych oraz przestrzennych, umożliwiając

coraz dokładniejsze rozpoznawanie procesów kształtujących klimat lokalny, wspierając wykorzystanie wyników badań w praktyce planistycznej. Przykładem tego kierunku są badania wykorzystujące dane teledetekcyjne i reanalizy klimatyczne, zapewniające wysoką porównywalność danych oraz możliwość analizy procesów w różnych skalach (Cheval i in., 2020). Produkty te są powszechnie wykorzystywane w klimatologii obszarów zurbanizowanych m.in. do identyfikacji powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła, detekcji termicznych „hot spotów” i „cold spotów” oraz oceny komfortu termicznego (Mavrakou i in., 2018; Hidalgo-García i Arco-Díaz, 2022; E. Krüger i in., 2024; Hajto i in., 2025), a także analiz związku charakterystyk termicznych z pokryciem terenu i morfologią miejską (Walawender i in., 2014; Tomczyk i in., 2018; Santos i in., 2022; Zwolska i in., 2025). Jednocześnie należy mieć na uwadze, że ograniczenia związane z rozdzielczością przestrzenną i czasową tych danych mogą wpływać na ich zdolność do odwzorowywania warunków zróżnicowanej tkanki miejskiej (Geletič i in., 2016; Cheval i in., 2020; Śleszyński i in., 2020; Demuzere i in., 2022). Janković (2013) zwraca również uwagę, że coraz powszechniejsze wykorzystanie danych globalnych może prowadzić do stopniowego przesuwania zainteresowania badawczego z lokalnych uwarunkowań klimatu ku procesom zachodzącym w większych skalach przestrzennych. W konsekwencji istnieje ryzyko niedostatecznego uwzględniania heterogeniczności środowiska miejskiego, mimo że to właśnie ona w istotnym stopniu kształtuje rzeczywiste warunki termiczne istotne z perspektywy funkcjonowania mieszkańców.

W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera pozyskiwanie danych terenowych, które stanowią niezbędny punkt odniesienia dla analiz modelowych oraz warunków właściwej interpretacji procesów zachodzących w obrębie różnych struktur urbanistycznych (Lehnert i in., 2025; Sharma i in., 2026). Istotną rolę odgrywa również rozwój i dogęszczanie istniejących sieci pomiarowo-obserwacyjnych poprzez tworzenie lokalnych systemów monitoringu oraz prowadzenie specjalistycznych kampanii pomiarowych, umożliwiających pozyskiwanie danych reprezentatywnych dla warstwy przygruntowej przy rozdzielczości czasowej pozwalającej na

identyfikację lokalnych kontrastów termicznych (Sheng i in., 2017; Cheval i in., 2020; Květoňová i in., 2024). Warunkiem koniecznym pozostaje jednak stosowanie aparatury zapewniającej odpowiednią jakość danych, w tym rejestratorów wyposażonych w osłony radiacyjne, a także lokalizowanie ich w miejscach reprezentatywnych dla analizowanych typów środowiska miejskiego, co – jak wskazuje Fortuniak (2019) – nie zawsze jest spełnione. Jednocześnie badacze podkreślają potrzebę opracowań syntetycznych opartych na integracji danych pochodzących z wielu źródeł, obejmujących różne elementy środowiska miejskiego oraz uwzględniających specyfikę poszczególnych stref klimatycznych, tak aby możliwie wiernie odzwierciedlać rzeczywiste warunki termiczne i biotermiczne miast (Bartesaghi Koc i in., 2018; Qi i in., 2023; C. Wang i in., 2023; Cheval i in., 2024; Lindner-Cendrowska i in., 2025). Szczególnie istotnym zagadnieniem pozostaje wieloźródłowa parametryzacja elementów morfologii miejskiej w sposób umożliwiający powiązanie cech środowiska zurbanizowanego z procesami kształtującymi klimat lokalny.

Pomimo dynamicznego rozwoju badań nad klimatem miast i działaniami adaptacyjnymi, nadal identyfikowane są obszary wymagające pogłębionych analiz, szczególnie w zakresie zależności pomiędzy strukturą środowiska miejskiego, a charakterystykami termicznymi i biotermicznymi oraz sposobów ich opisu. Mimo że problemy związane z ograniczonym transferem wiedzy pomiędzy klimatologią miejską a praktyką planistyczną zostały wyraźnie wskazane już pod koniec ubiegłego wieku (Eliasson, 2000) i były wielokrotnie podnoszone w kolejnych latach (Mills, 2006; Oke, 2006; Alcoforado i in., 2009), autorzy nowszych opracowań nadal zwracają uwagę na ograniczone wykorzystanie wyników badań klimatologicznych w procesach planowania i projektowania przestrzeni miejskich (Brandsma i in., 2024; Liu i in., 2025). Istnieje zatem realna potrzeba określenia wskaźników o rzeczywistej wartości aplikacyjnej oraz wyników badań możliwych do wykorzystania nie tylko przez środowisko naukowe, lecz również przez projektantów i decydentów.

W związku ze zidentyfikowanymi lukami badawczymi, szerzej omówionymi w poszczególnych publikacjach składających się na niniejszą rozprawę, sformułowano następujące pytania badawcze:

P1. Które elementy zagospodarowania przestrzeni miejskiej wywierają największy wpływ na warunki termiczne oraz jaki jest ich zasięg oddziaływania?

P2. Jak rozmieszczone są ekstrema temperatury powierzchni terenu („hot spoty” i „cold spoty”) w przestrzeni miasta, jakie typy pokrycia terenu sprzyjają ich występowaniu oraz jaki reżim temperatury powietrza je charakteryzuje?

P3. Czy warunki biotermiczne w parkach wykazują zróżnicowanie przestrzenne oraz jak elementy środowiska miejskiego je kształtują?

W celu odpowiedzi na postawione pytania zaprojektowano badania obejmujące zróżnicowane skale czasowe (od wybranych miesięcy, przez okres wegetacyjny, po analizy wieloletnie) oraz przestrzenne (od pojedynczych punktów pomiarowych, przez strefy o różnym zasięgu dookoła nich, po obszar całego miasta). Szczególny nacisk położono na wieloźródłową parametryzację środowiska miejskiego przy pomocy wskaźników odnoszących się do miar stosowanych w dokumentach planistycznych, a także wybranych charakterystyk powszechnie wykorzystywanych w badaniach z zakresu klimatologii miejskiej. Przyjęcie takiego podejścia było motywowane chęcią zwiększenia aplikacyjności badań oraz ułatwienia dialogu pomiędzy klimatologami, urbanistami i decydentami. Ponadto istotnym elementem badań była identyfikacja obszarów o relatywnie korzystnych warunkach termicznych wśród terenów zabudowanych oraz miejsc charakteryzujących się podwyższonym obciążeniem cieplnym, pomimo dominującego udziału roślinności. Uzyskane wyniki przedstawiono w trzech powiązanych ze sobą tematycznie publikacjach, poświęconych kolejno temperaturze powietrza, temperaturze powierzchni i stresowi termicznemu, stanowiących podstawę niniejszej rozprawy doktorskiej.

1.2. Cel badań

Celem głównym rozprawy doktorskiej jest **określenie wpływu struktury środowiska miejskiego na kształtowanie lokalnych warunków termicznych i biotermicznych w różnych skalach przestrzennych i czasowych**. Do celów szczegółowych zalicza się:

C1. Identyfikację wpływu elementów środowiska parametryzowanych wskaźnikami zagospodarowania przestrzennego na charakterystyki temperatury powietrza w trakcie ekstremalnie ciepłych miesięcy oraz określenie skali przestrzennej, w której zależności te są najsilniejsze (artykuł I).

C2. Określenie przestrzennego zróżnicowania „hot spotów” i „cold spotów”, ich powiązań z typami pokrycia terenu oraz reżimem temperatury powietrza w ujęciu rocznym i sezonowym (lato i zima) (artykuł II).

C3. Ocenę wpływu elementów środowiska na kształtowanie obciążeń termicznych człowieka w przestrzeni parków miejskich w różnych fazach sezonu wegetacyjnego i skalach przestrzennych (artykuł III).

Hipoteza testowana w ramach prowadzonych badań zakłada, że zróżnicowanie warunków termicznych i biotermicznych w środowisku miejskim jest w istotnym stopniu determinowane przez zagospodarowanie przestrzenne, którego oddziaływanie różni się w zależności od zasięgu analizy i sezonu.

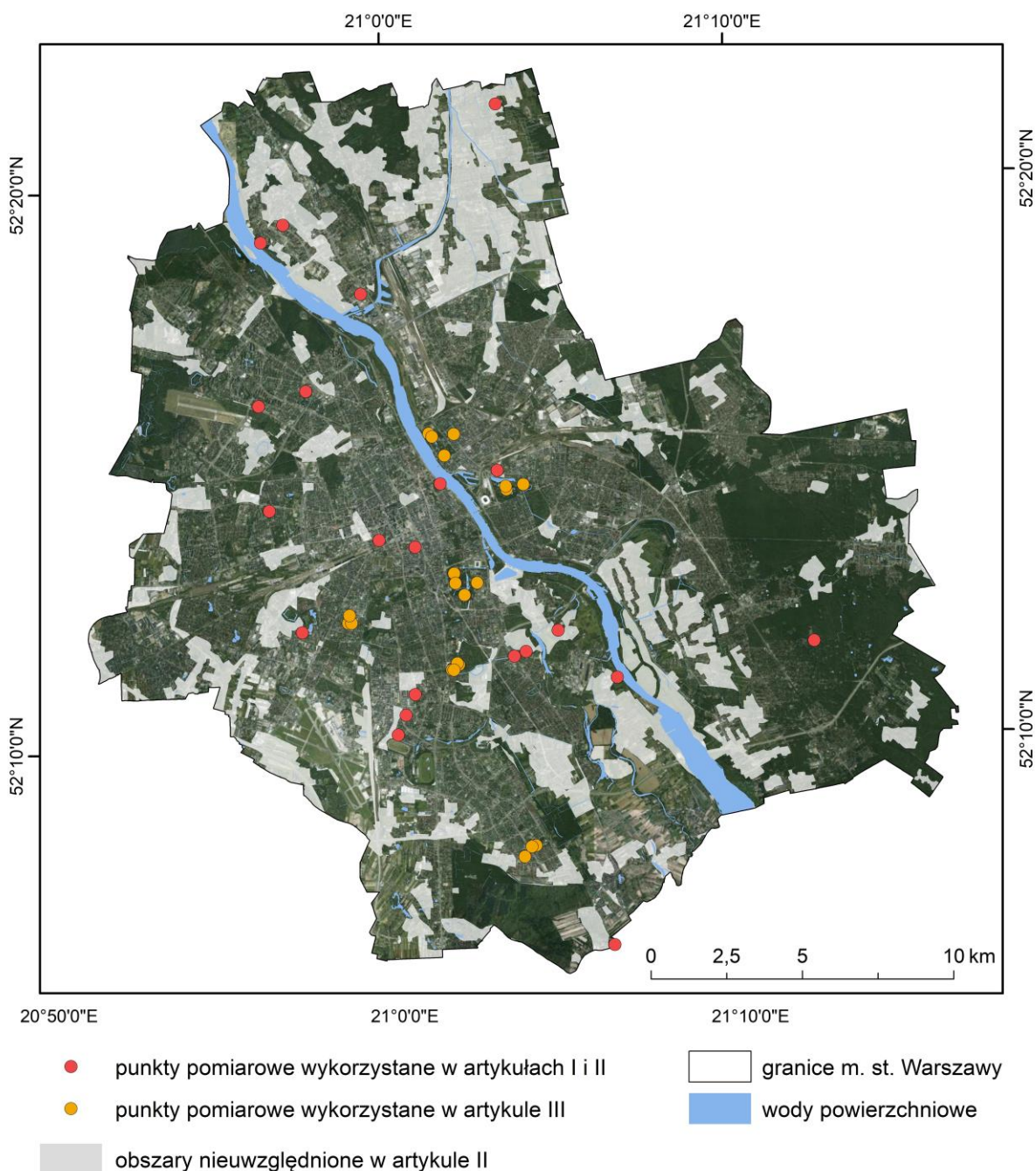
Cele rozprawy zrealizowano na przykładzie Warszawy, która stanowi reprezentatywny obszar miejski umiarkowanej strefy klimatycznej, cechujący się silnym zróżnicowaniem struktury urbanistycznej i pokrycia terenu oraz wyraźnymi sezonowymi kontrastami termicznymi. Dostępność licznych wysokorozdzielczych źródeł danych przestrzennych i pomiarowych umożliwiła zastosowanie podejścia wielowskaźnikowego w różnych skalach analizy.

2. Obszar badań

Warszawa (52°06'-52°22'N, 20°51'-21°16'E) jest miastem stołecznym o powierzchni 517,2 km² położonym w środkowo-wschodniej części Polski w centrum Niziny Mazowieckiej (GUS, 2025). Zlokalizowana jest na terenie makroregionu Niziny Środkowomazowieckiej na styku czterech mezoregionów: Równiny Warszawskiej, Równiny Garwolińskiej, Doliny Środkowej Wisły i Kotliny Warszawskiej (Kondracki, 2002). Współczesna rzeźba terenu Warszawy została ukształtowana w wyniku procesów związanych ze zlodowaceniami i okresami interglacjalnymi, a także działalnością Wisły oraz późniejszych przekształceń antropogenicznych. Wysokość bezwzględna terenu miasta mieści się w przedziale od 74,8 do 152 m n.p.m., przy średniej wysokości wynoszącej około 100 m n.p.m. (*Atlas ekofizjograficzny m.st. Warszawy*, 2018).

Warszawa jest największym ośrodkiem miejskim w Polsce, zamieszkanym przez około 1,86 mln mieszkańców (GUS, 2025). Miasto charakteryzuje się również największą gęstością zaludnienia wśród polskich powiatów, wynoszącą 3604 osoby na 1 km² przy utrzymującym się wzroście liczby ludności. W zależności od przyjętego wariantu prognozy w 2060 r. liczba ta może wynieść od 1,62 do 2,13 mln osób, podczas gdy liczba osób rezydujących może osiągnąć nawet 2,25 mln (*Diagnoza m.st. Warszawy. Demografia*, dostęp: 17.05.2026 r.).

Badania przedstawione w niniejszej rozprawie obejmują większość obszaru Warszawy (z wyłączeniem terenów wskazanych na s. 31, szczegółowo opisanych w artykule II), a także wybrane lokalizacje w obrębie zabudowy i terenów zieleni rozmieszczone w różnej odległości od centrum miasta (ryc. 1).



Rycina 1. Zasięg obszaru badawczego i lokalizacja punktów pomiarowych.

Źródło: mapa bazowa Bing Aerial (Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID and the GIS User Communities).

2.1. Klimat Warszawy

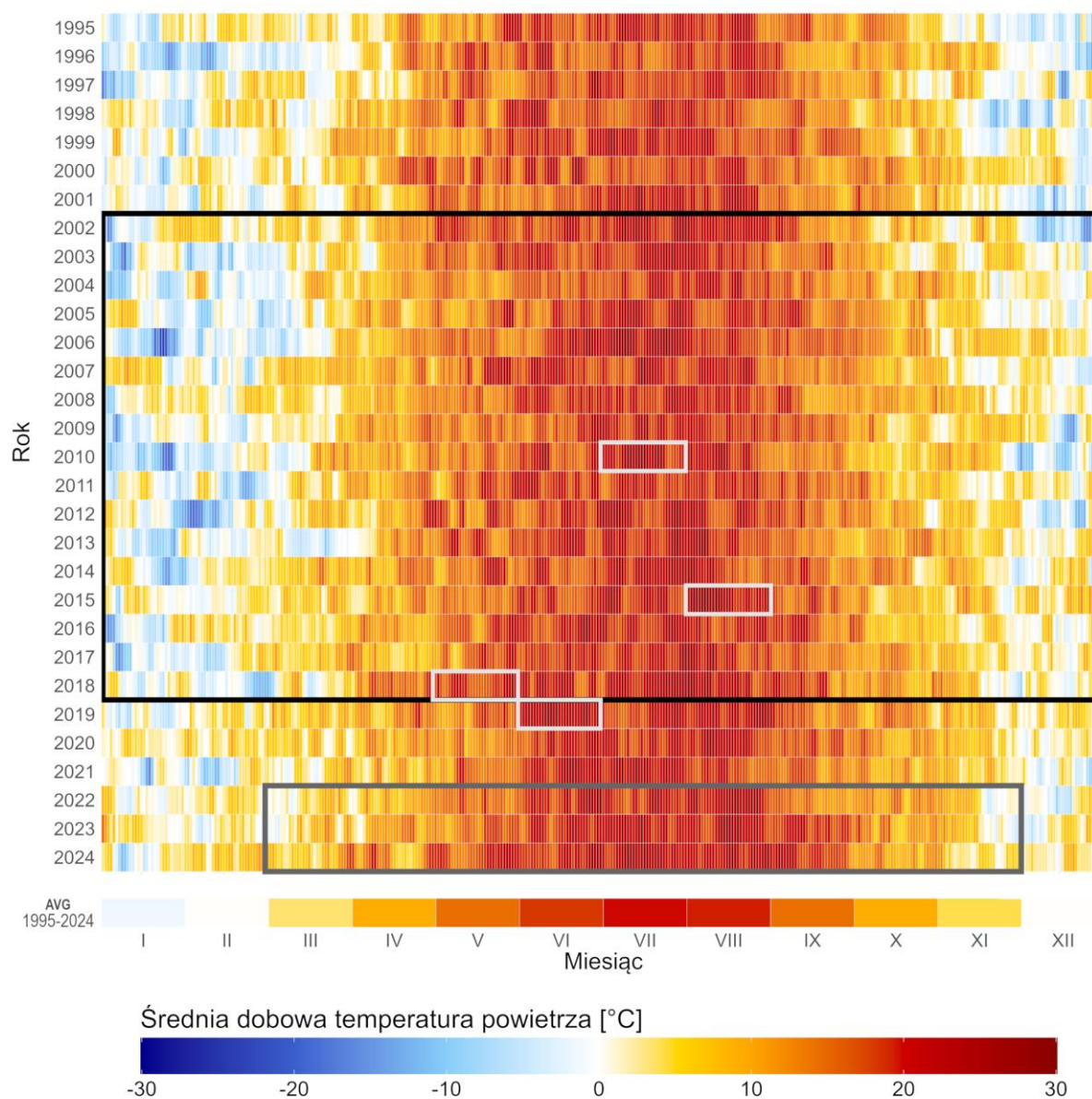
Według klasyfikacji Okołowicza, Warszawa leży w strefie klimatu umiarkowanego ciepłego przejściowego (Okołowicz, 1991), natomiast zgodnie z klasyfikacją Köppena-Geigera znajduje się na granicy klimatu oceanicznego (Cfb) oraz wilgotnego kontynentalnego z łagodnym latem i opadami rozłożonymi stosunkowo

równomiernie w ciągu roku bez wyraźnej pory suchej (Dfb) (Peel i in., 2007; Rubel i Kottek, 2010). Klimat Warszawy charakteryzuje się wyraźnym zróżnicowaniem sezonowym pozwalającym na wyodrębnienie czterech pór roku (w niniejszej rozprawie przyjęto definicję: wiosna od marca do maja, lato od czerwca do sierpnia, jesień od września do listopada oraz zima od grudnia do lutego), a także okresu wegetacyjnego, definiowanego jako czas ze średnią dobową temperaturą powietrza wyższą lub równą 5 °C. W Warszawie sezon ten najczęściej rozpoczyna się w marcu, a kończy w listopadzie (Tomczyk i Szyga-Pluta, 2016).

Średnia roczna temperatura powietrza w Warszawie w latach 1995-2024 wyniosła 9,3 °C (IMGW-PIB, dostęp: 29.04.2026 r.). W analizowanym trzydziestoleciu wartości te wahały się od 6,9 °C w 1996 r. do 11,7 °C w 2024 r., wykazując tendencję wzrostową (ryc. 2). Najchłodniejszym miesiącem był styczeń, ze średnią temperaturą powietrza równą -1,5 °C. Absolutne minimum temperatury powietrza odnotowano 24 stycznia 2006 r. i wyniosło -27,1 °C. Najwyższą średnią temperaturą powietrza charakteryzował się lipiec (19,9 °C), a absolutne maksimum temperatury powietrza (37,0 °C) zarejestrowano 8 sierpnia 2013 r. Pozostałe elementy klimatu Warszawy również wykazują typową dla klimatu umiarkowanego przejściowego sezonowość – największe sumy opadów występują latem, natomiast największe zachmurzenie, wilgotność względna oraz prędkość wiatru obserwowane są zimą (*Klimat Warszawy*, 2017; IMGW-PIB, dostęp: 29.04.2026 r.).

Na specyfikę mezoklimatu miejskiego Warszawy składają się: zmniejszenie dopływu promieniowania słonecznego, zwiększenie temperatury powietrza (szczególnie temperatury minimalnej), obniżenie wilgotności powietrza i wzrost ewapotranspiracji w okresie wegetacyjnym, zmniejszenie średniej prędkości wiatru przy jednoczesnym lokalnym wzroście jego porywistości, zwiększenie sumy opadów oraz wyższy poziom zanieczyszczenia atmosfery w porównaniu z terenami otaczającymi Warszawę (Chojnacki, 1991; K. Błażejczyk, 2002; K. Błażejczyk i A. Błażejczyk, 2023). Jednocześnie postępująca zmiana klimatu oraz dynamiczny rozwój przestrzenny miasta przyczyniają się do wzrostu temperatury powietrza

i częstszego występowania zjawisk ekstremalnych, zwłaszcza fal upałów obserwowanych także poza sezonem letnim (K. Błażejczyk, A. Błażejczyk i in., 2014; K. Błażejczyk i in., 2022; Mărmureanu i in., 2025). Procesy te sprzyjają intensyfikacji UHI oraz pogłębianiu zróżnicowania warunków mikroklimatycznych w obrębie miasta (K. Błażejczyk, Kuchcik i in., 2014; Kuchcik i in., 2024).



Biała ramka wskazuje miesiące analizowane w artykule I; czarna ramka wskazuje okres badawczy analizowany w artykule II; szara ramka wskazuje okres wegetacyjny analizowany w artykule III.

Rycina 2. Średnia dobowa temperatura powietrza na stacji Warszawa-Okęcie w latach 1995-2024 oraz średnie miesięczne wartości temperatury powietrza w wieloleciu.

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych meteorologicznych ze stacji Warszawa-Okęcie (WMO 12375) IMGW-PIB, <https://danepubliczne.imgw.pl/data/>, dostęp: 29.04.2026 r.

2.2. Struktura przestrzenna Warszawy

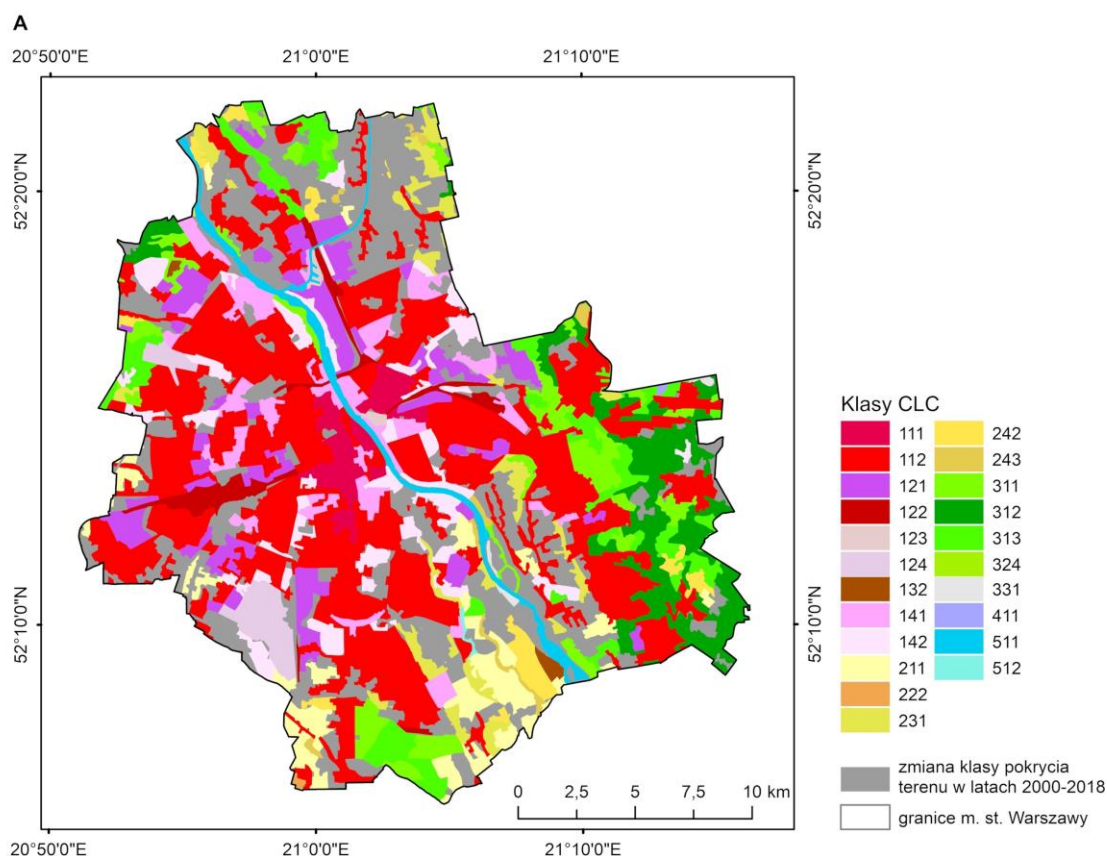
Układ funkcjonalno-przestrzenny Warszawy podlega dynamicznym przemianom, którym towarzyszy intensyfikacja procesów urbanizacyjnych. Jest to związane zarówno ze wzrostem liczby mieszkańców, jak i z pełnieniem przez miasto funkcji głównego centrum administracyjnego i gospodarczego kraju o rosnącym znaczeniu międzynarodowym (*Atlas ekofizjograficzny m.st. Warszawy*, 2018). Rozwój miasta zachodzi zarówno poprzez przekształcenia istniejących, silnie zurbanizowanych struktur, jak i ekspansję na tereny peryferyjne, co prowadzi do zmiany ich dotychczasowych funkcji. Polityka przestrzenna Warszawy prowadzona jest wciąż na podstawie *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego m.st. Warszawy* z 2006 r. (nowelizacje w latach 2009, 2010, 2013, 2014, 2018 i 2021). Dokument ten określa m.in. udział terenów biologicznie czynnych, wysokość zabudowy oraz intensywność zagospodarowania w poszczególnych strefach funkcjonalno-przestrzennych miasta (*Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego m.st. Warszawy*, uchwała nr LXXXII/2746/2006 z dnia 10 października 2006 r., zmieniana uchwałami: nr LXII/1667/2018 (2018) oraz nr LIII/1611/2021 (2021), Warszawa, 2006). Termin obowiązywania tego dokumentu wyznaczony jest na 31 sierpnia 2026 r., po czym zostanie zastąpiony Planem Ogólnym.³

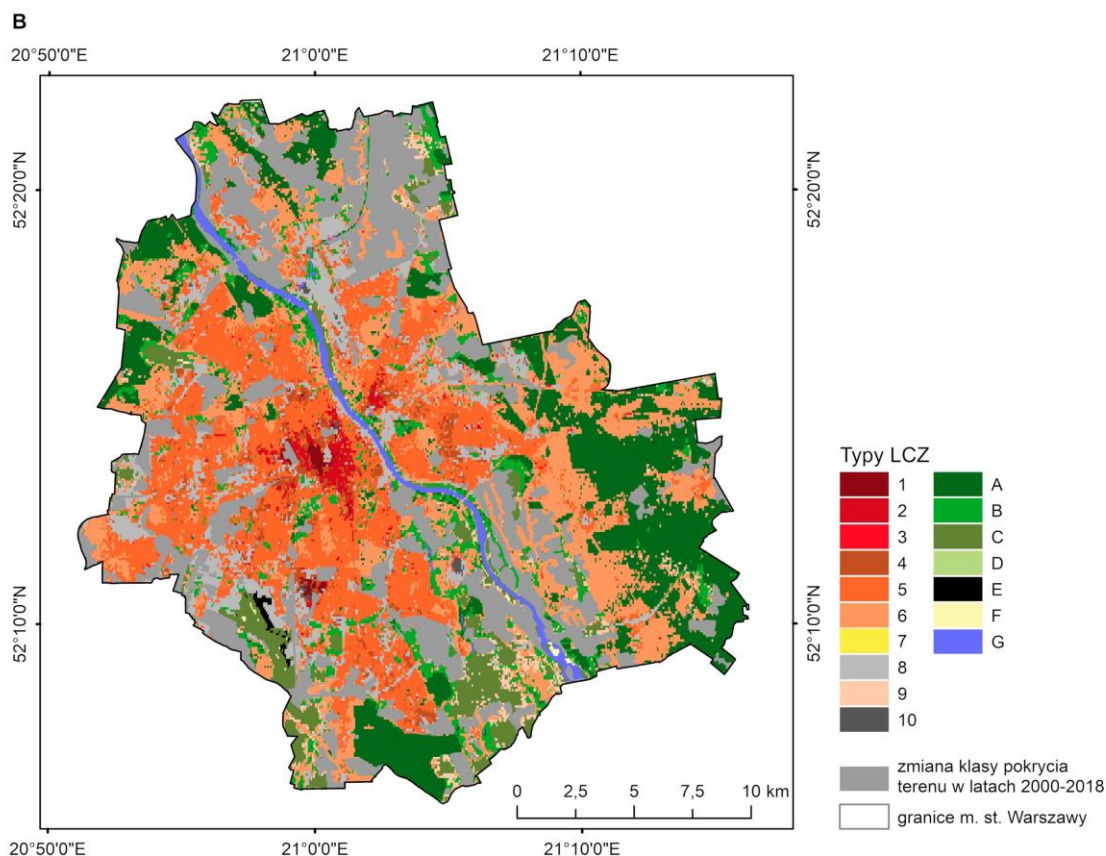
Pokrycie i użytkowanie terenu Warszawy cechuje się dużą różnorodnością i obejmuje zarówno zwarte, intensywnie zabudowane centrum jak i rozległe dzielnice mieszkaniowe, tereny przemysłowe i rolnicze, infrastrukturę transportową, liczne obszary zieleni miejskiej, wody powierzchniowe, a także lokalnie występujące tereny podmokłe (ryc. 3). Na tle innych dużych miast europejskich Warszawa wyróżnia się stosunkowo wysokim udziałem zielonej infrastruktury zajmując 12. miejsce wśród 37 stolic analizowanych przez Europejską Agencję Środowiska.⁴

³ Serwis Rzeczypospolitej Polskiej gov.pl. *Reforma planowania przestrzennego: usprawnienia i więcej czasu na plany ogólne*. <https://www.gov.pl/web/rozwój-technologia/reforma-planowania-przestrzennego-usprawnienia-i-wiecej-czasu-na-plan-y-ogolne>. Dostęp: 7.06.2026 r.

⁴ European Environment Agency. *Percentage of total green infrastructure, urban green space, and urban tree cover in the area of EEA-38 capital cities (excluding Liechtenstein)*. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/percentage-of-total-green-infrastructure>. Dostęp: 5.08.2025 r.

W ujęciu CORINE Land Cover z 2018 r. (CLC2018; jedna z baz danych wykorzystanych do analiz w artykule II) dominującą kategorię stanowią *tereny antropogeniczne* zajmujące 67,5% powierzchni miasta z przewagą *zabudowy miejskiej luźnej* (Chief Inspectorate for Environmental Protection, dostęp: 1.05.2024 r.-a). Jednocześnie zgodnie z typologią lokalnych stref klimatycznych (LCZ; również wykorzystanej w artykule II) największy udział powierzchniowy przypada typom *luźnej zabudowy średniej wysokości* (25,9%) oraz *luźnej zabudowy niskiej* (23,0%). Istotny udział w pokryciu terenu przypada również kategorii *lasy i ekosystemy seminaturalne*, które w klasyfikacji CLC2018 obejmują 18,7% powierzchni miasta z dominującymi *lasami iglastymi*. W typologii LCZ odpowiada im przede wszystkim *zwarty drzewostan* (19,7%), co podkreśla znaczącą rolę zielonej infrastruktury w strukturze przestrzennej Warszawy. Dodatkowo, *obszary rolnicze* zajmują 11,2% powierzchni miasta, stanowiąc istotny element stref peryferyjnych w ujęciu CLC2018. Ich odpowiednikiem wśród lokalnych stref klimatycznych są przede wszystkim obszary *roślinności niskiej*, które zajmują relatywnie niewielki udział powierzchniowy. Pozostałe klasy pokrycia terenu i typy LCZ łącznie obejmują mniej niż 10% powierzchni miasta.





Objaśnienia kodów klas pokrycia terenu znajdują się w tab. 4E (str. 36-37).

Rycina 3. Pokrycie terenu Warszawy wg klasyfikacji CORINE Land Cover (A) oraz typów lokalnych stref klimatycznych (B) z wykluczeniem obszarów, których pokrycie terenu uległo zmianie w latach 2000-2018.

Źródło: pokrycie terenu na podstawie CORINE Land Cover 2000 i 2018 (Chief Inspectorate for Environmental Protection, 1.05.2024 r.- a, 1.08.2024 r.-b); lokalne strefy klimatyczne na podstawie *Global map of Local Climate Zones* (Demuzere i in., 2022).

3. Materiały i metody badawcze

3.1. Charakterystyki termiczne

Miary parametryzujące miejskie warunki termiczne obliczono dla różnych okresów badawczych, dostosowanych do odmiennych celów szczegółowych, realizowanych w poszczególnych artykułach składających się na rozprawę. Artykuł I koncentrował się na okresach szczególnie gorących, gdy kontrasty termiczne w mieście są największe, a zależności pomiędzy zagospodarowaniem przestrzennym a temperaturą powietrza najbardziej wyraźne. Artykuł II opierał się na całorocznych danych temperatury powierzchni terenu, jednak w analizie reżimów temperatury powietrza na obszarach różniących się występowaniem termicznych „hot spotów” i „cold spotów” dodatkowo wyodrębniono sezon letni i zimowy. Artykuł III obejmował okres wegetacyjny, co umożliwiło ocenę obciążeń termicznych człowieka w poszczególnych fazach fenologicznych roślinności – od wczesnej wiosny po późną jesień.

W artykule I charakterystyki termiczne wyznaczono na podstawie pomiarów temperatury powietrza pochodzących z warszawskiej sieci monitoringu Zakładu Badań Klimatu Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk (ZBK IGiPZ PAN) (tab. 1). Na podstawie kryteriów przedstawionych w tabeli 1 oraz szczegółowo opisanych w rozdziale 2 artykułu I wybrano 21 punktów badawczych, wyposażonych w czujniki umieszczone w osłonach radiacyjnych. Następnie, na podstawie map synoptycznych oraz danych ze stacji IMGW-PIB Warszawa–Okęcie (WMO 12375), wytypowano konkretne okresy badawcze. Obliczenia przeprowadzono dla czterech ekstremalnie ciepłych miesięcy, podczas których występowały fale upałów: lipca 2010 r., sierpnia 2015 r., maja 2018 r. oraz czerwca 2019 r. (Kuchcik, 2017; K. Błażejczyk i in., 2022). Okresy te wybrano jako najcieplejsze po 2008 r., tj. po rozbudowie sieci pomiarowej. Łącznie wyznaczono 17 charakterystyk opisujących podstawowe parametry temperatury powietrza (temperatura minimalna, maksymalna i średnia), dynamikę zmian (różnice dobowe

i kierunkowe zmiany temperatury), częstość wartości ekstremalnych (percentyle wyznaczone na podstawie bazy danych z danego miesiąca dla wszystkich punktów pomiarowych) oraz czas nagrzewania i wychładzania powietrza.

Tabela 1. Charakterystyka danych termicznych w artykule I.

Element	Opis
Zmienna zależna	Temperatura powietrza
Instrumenty pomiarowe	Rejestratory danych HOBO U23 Pro-v2 (001)
Rozdzielczość czasowa	10 minut
Wysokość pomiaru	2 m
Rozdzielczość przestrzenna	21 punktów pomiarowych
Okres analizy	lipiec 2010, sierpień 2015, maj 2018, czerwiec 2019
Kryteria wyboru	Jedna masa powietrza i brak frontów atmosferycznych; kompletne miesięczne szeregi czasowe; w nielicznych przypadkach zmian zagospodarowania przestrzennego w promieniu 100 m od punktu pomiarowego, analizę ograniczano do okresów o zachowanej jednorodności warunków przestrzennych.
Zakres charakterystyk	Minimalna temperatura powietrza (min); maksymalna temperatura powietrza (max); średnia temperatura powietrza (avg); liczba 10-minutowych pomiarów temperatury powietrza poniżej 1./5./10. percentyla (k1; k5; k10); liczba 10-minutowych pomiarów temperatury powietrza powyżej 90./95./99. percentyla (k90; k95; k99); różnica między maksymalną temperaturą powietrza dwóch kolejnych dni: wartość bezwzględna / przy spadku / przy wzroście (max_a; max_d; max_u); różnica między minimalną temperaturą powietrza dwóch kolejnych dni: wartość bezwzględna / przy spadku / przy wzroście (min_a; min_d; min_u); czas (w minutach) między wystąpieniem maksymalnej a minimalnej temperatury powietrza (down); czas (w minutach) między wystąpieniem minimalnej a maksymalnej temperatury powietrza (up).

Podstawę analiz przedstawionych w artykule II stanowiły dane temperatury powierzchni terenu pozyskane z 25 zobrażeń satelitarnych z lat 2002–2018, wykonanych w godzinach porannych (ok. 9:00–9:30 UTC) (tab. 2).⁵ Szczegółowy opis

⁵ Wykorzystano mapy pochodzące z opracowania końcowego określającego stan ekosystemu m.st. Warszawy w kontekście zmian klimatu, przygotowane na rzecz Fundacji Instytut na rzecz Ekorozwoju w ramach projektu LIFE_ADAPTCITY_PL przez zespół Instytutu Geodezji i Kartografii pod kierunkiem prof. Katarzyny Dąbrowskiej-Zielińskiej w składzie: dr Radosław Gurdak, mgr inż. Patryk Grzybowski, mgr Damian Olszewski. Projekt

procedury przetwarzania danych oraz wyznaczania temperatury powierzchni terenu przez autorów map bazowych przedstawiono w rozdziale *Material and methods* artykułu II. Na podstawie danych LST zidentyfikowano obszary charakteryzujące się istotnie wyższą i niższą temperaturą powierzchni względem otoczenia, określane odpowiednio jako termiczne „hot spoty” i „cold spoty”. Dodatkowo wykorzystano dane temperatury powietrza rejestrowane co 10 minut w latach 2009-2018 przez 21 czujników, wchodzących w skład sieci pomiarowej ZBK IGiPZ PAN (stanowiących również podstawę analiz przedstawionych w artykule I). Na ich podstawie obliczono podstawowe wieloletnie charakterystyki temperatury powietrza dla całego roku, lata oraz zimy, co pozwoliło na scharakteryzowanie reżimu termicznego klastrów o częstym, umiarkowanym i rzadkim występowaniu THS i TCS.

Tabela 2. Charakterystyka danych termicznych w artykule II.

Element	Opis
Zmienna zależna	Temperatura powierzchni terenu
Zmienna towarzysząca	Temperatura powietrza
Instrumenty pomiarowe	Landsat 5 TM oraz Landsat 8 OLI/TIRS; Rejestratory danych HOBO U23 Pro-v2 (001 i 002)
Rozdzielczość czasowa	LST: epizodyczna (25 scen, 2002–2018); AT: 10 minut
Wysokość pomiaru	LST: około 705 km; AT: 2 m
Rozdzielczość przestrzenna	LST: 30 m (po resamplingu); AT: 21 punktów
Okres analizy	LST: 2002–2018; AT: 2009–2018
Kryteria wyboru	Wykluczenie pikseli bez danych (>50% braków); wykluczenie obszarów, na których typ pokrycia terenu uległ zmianie w latach 2000-2018; wykluczenie obszarów wód powierzchniowych.
Zakres charakterystyk	LST: częstość THS; częstość TCS. AT: średnia wieloletnia temperatura powietrza o danej godzinie; średnia wieloletnia temperatura powietrza (AT_{avg}); średnia wieloletnia minimalna temperatura powietrza (AT_{min}); absolutna minimalna temperatura powietrza w wieloleciu (AT_{abs_min});

średnia wieloletnia maksymalna temperatura powietrza (AT_{max});
absolutna maksymalna temperatura powietrza w wieloleciu (AT_{abs_max}).

W artykule III warunki biometeorologiczne scharakteryzowano za pomocą Uniwersalnego Wskaźnika Obciążeń Termicznych (UTCI), umożliwiającego ocenę poziomu stresu termicznego człowieka (tab. 3) (Bröde i in., 2012). Dane wejściowe do obliczeń obejmowały temperaturę powietrza (AT), średnią temperaturę promieniowania (MRT) wyznaczoną na podstawie temperatury termometru kulistego (tg), prędkość wiatru (va) oraz wilgotność względną powietrza (RH). Parametry te rejestrowano w 23 punktach pomiarowych różniących się ekspozycją na promieniowanie słoneczne na wysokości odpowiadającej położeniu środka ciężkości ciała dorosłego człowieka (Lindner-Cendrowska i Baranowski, 2023). Badania przeprowadzono w sezonach wegetacyjnych lat 2022–2024 na obszarze sześciu warszawskich parków miejskich. W przypadku czterech największych parków dane pozyskano w trzech porach roku, natomiast dla dwóch mniejszych obiektów pomiary wykonano latem oraz podczas jednego z sezonów przejściowych. Wartości UTCI obliczono w środowisku R zgodnie z procedurą operacyjną opartą na modelu Fialy, wykorzystując przybliżenie wielomianowe 6. stopnia (Bröde i in., 2012; R Core Team, 2024). Ponadto zastosowano wartości UTCI pochodzące z reanalizy klimatycznej „Human thErmaI comforT” (ERA5-HEAT) jako tło biometeorologiczne dla obszaru Warszawy, aby ograniczyć wpływ różnic wynikających z odmiennych terminów kampanii pomiarowych (Di Napoli i in., 2020).

Tabela 3. Charakterystyka danych biotermicznych w artykule III.

Element	Opis
Zmienna zależna	Uniwersalny wskaźnik obciążeń termicznych (UTCI)
Instrumenty pomiarowe	Onset S-THC-M002 (AT, RH), Onset S-WSB-M003 i Senseca Delta OHM HD32.3TC1 z AP3203 (va), termometr kulisty w kolorze czarnym Ø4 cm z THSS-18G-RSC-6 (tg); dane reanalizy ERA5-HEAT.
Rozdzielczość czasowa	10 minut (dane in situ uśrednione z 1 minuty, dane reanalizy przeskalowane z 1 godziny)
Wysokość pomiaru	1.1 m (AT, RH, tg), 1.4 m (wiatr – przeskalowany do 10 m)

Rozdzielczość przestrzenna	in situ: 6 parków miejskich, 23 stanowiska pomiarowe; reanaliza: pojedyncza komórka siatki (0.25° x 0.25°) z centralnym węzłem zlokalizowanym w Warszawie (52°15' N, 21°00' E)
Okres analizy	wiosna 2023 i 2024, lato 2022 i 2023, jesień 2023
Kryteria wyboru	Pogoda radiacyjna (mała prędkość wiatru, małe zachmurzenie); warunki typowe dla danej pory roku.
Zakres charakterystyk	Poszczególne wartości UTCI; średnia, minimalna i maksymalna wartość UTCI; różnica wartości UTCI między stanowiskiem in situ a danymi reanalizy (UTCI_{diff}).

3.2. Charakterystyki przestrzenne i pokrycie terenu

W niniejszym cyklu artykułów do analizy wpływu morfologii miejskiej na warunki termiczne i biotermiczne zastosowano podejście wieloźródłowe oraz wielowskaźnikowe dostosowane do analizowanych danych i skali przestrzennej (tab. 4). Charakterystyki obliczono dla pojedynczych punktów pomiarowych lub stref buforowych wyznaczonych wokół nich (o promieniach wynoszących 10 m, 50 m i 100 m), odpowiadających zakresowi od mikroskali do dolnej granicy skali lokalnej według Oke (1997). Podejście takie umożliwiło ilościową ocenę wpływu otoczenia na temperaturę powietrza (artykuł I), częstość lokalnych ekstremów temperatury powierzchni terenu (artykuł II) oraz kształtowanie obciążeń termicznych (artykuł III). W artykule II obejmującym również skalę całego miasta, szczególny nacisk położono na analizę występowania termicznych „hot spotów” i „cold spotów” (THCS) w odniesieniu do klas pokrycia terenu CORINE Land Cover (Chief Inspectorate for Environmental Protection, dostęp: 1.05.2024 r.-a) oraz typów lokalnych stref klimatycznych (Demuzere i in., 2022). Zastosowanie obu baz danych dostarczyło komplementarnych informacji dotyczących zarówno pokrycia terenu, jak i struktury urbanistycznej miasta.

Charakterystyki przestrzenne analizowane w niniejszej rozprawie obejmowały zarówno parametry odnoszące się do terminologii stosowanej w planowaniu przestrzennym (artykuły I, III oraz częściowo II), jak i klasyfikacje (CLC, LCZ) opisujące strukturę przestrzenną miasta (artykuł II). W analizach dotyczących parków

miejskich (artykuł III) rozszerzono zestaw zmiennych o parametry opisujące strukturę roślinności oraz ekspozycję punktów pomiarowych. Zastosowane charakterystyki można podzielić na: wskaźniki zabudowy (tab. 4A), roślinności (tab. 4B), lokalizacji (tab. 4C), ekspozycji (tab. 4D) oraz klasyfikacje pokrycia terenu (tab. 4E).

Tabela 4. Zestawienie wykorzystanych wskaźników przestrzennych.

A) Zabudowa

Wskaźnik	Opis	Skala analizy	Artykuł
Gęstość zabudowy (BCR)	udział powierzchni zabudowy liczonej po zewnętrznym obrysie budynków w powierzchni poletka badawczego (Z. Wu i in., 2024).	bufory	I, II, III
Intensywność zabudowy (WIZ)	stosunek iloczynu powierzchni zabudowy i liczby kondygnacji do powierzchni poletka badawczego (Xu i in., 2024).	bufory	I, II, III
Średnia wysokość budynków (BH _{mean})	średnia wysokość budynków w analizowanym poletku badawczym (Xu i in., 2017).	bufory	I, II, III
Maksymalna wysokość budynków (BH _{max})	wysokość najwyższego budynku w analizowanym poletku badawczym (Tsichritzis i Nikolopoulou, 2019).	bufory	I, II, III
Znormalizowany różnicowy wskaźnik zabudowy (NDBI)	Spektralny wskaźnik określający udział powierzchni zabudowanych na danym obszarze z wykorzystaniem pasma bliskiej i krótkofalowej podczerwieni (Muhaimin i in., 2022).	bufory	III

B) Roślinność

Wskaźnik	Opis	Skala analizy	Artykuł
Wskaźnik terenów biologicznie czynnych (RBVA)	Udział terenów biologicznie czynnych obejmujących przepuszczalne powierzchnie zdolne do pełnienia funkcji ekologicznych (w tym 50% powierzchni dachów i tarasów o powierzchni powyżej 10 m ² pokrytych roślinnością naturalną) oraz wody otwarte w analizowanym poletku badawczym (Szulczewska i in., 2014).	bufory	I, II, III
Znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności (NDVI)	Wskaźnik spektralny obliczany jako znormalizowana różnica między odbiciem w zakresie bliskiej podczerwieni i czerwieni, umożliwiający estymację zawartości chlorofilu i biomasy (Santos i in., 2022).	bufory	III

Ulepszony wskaźnik roślinności (EVI)	Wskaźnik spektralny stosowany do analizy kondycji roślinności, charakteryzujący się zwiększoną czułością na gęstą roślinność oraz ograniczonym wpływem atmosfery i tła koron drzew (R. Chen i in., 2024).	bufory	I, II, III
Gęstość pokrycia koronami drzew (TCD)	Procent powierzchni terenu pokrytej koronami drzew w projekcji pionowej (Cheung i in., 2021).	bufory	I, II, III
Efektywny wskaźnik powierzchni liści (ELAI)	Powierzchnia liści przypadająca na jednostkę powierzchni gruntu, uwzględniająca przechwytywanie światła przez koronę, lecz nieuwzględniająca agregacji liści; w zakresie kątów zenitalnych 0–60° (Stenberg i in., 1994).	bufory	III
Uogólniony typ roślinności (VEG _{gen})	TC – drzewostan; M – łąka; L – trawnik; AS – stanowisko zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie nieprzepuszczalnych powierzchni sztucznych.	punkt	III
Szczegółowy typ roślinności (VEG _{spec})	TC_A – zwarty, wysoki (≥ 10 m), liściasty drzewostan z krzewami i niską, koszoną lub rzadką trawą; TC_B – zwarty, wysoki (≥ 10 m), liściasty drzewostan z krzewami, podszytem i niską, koszoną lub rzadką trawą; TC_C – zwarty, wysoki (≥ 10 m), liściasty drzewostan z krzewami i wysoką lub niekoszoną trawą; TC_D – zwarty, wysoki (≥ 10 m), liściasty drzewostan bez krzewów, z niską, koszoną lub rzadką trawą; TC_E – zwarty, wysoki (≥ 10 m), mieszany drzewostan bez krzewów, z niską, koszoną lub rzadką trawą; TC_F – luźny, wysoki (≥ 10 m), liściasty drzewostan z krzewami i niską, koszoną lub rzadką trawą; L – trawnik bez pojedynczych drzew; LT – trawnik z pojedynczymi drzewami; M – łąka bez krzewów; MS – łąka z krzewami; AS/L – trawnik w bezpośrednim sąsiedztwie nieprzepuszczalnych powierzchni sztucznych; AS/LT – trawnik z pojedynczymi drzewami w bezpośrednim sąsiedztwie nieprzepuszczalnych powierzchni sztucznych.	punkt	III

C) Lokalizacja

Wskaźnik	Opis	Skala analizy	Artykuł
Odległość od centrum miasta (DC)	Odległość punktu pomiarowego od centrum miasta, przyjętego jako środek ronda Dmowskiego (52°13'47.4"N, 21°00'42.3"E)	miasto	II

D) Ekspozycja

Wskaźnik	Opis	Skala analizy	Artykuł
Współczynnik widoku nieba (SVF)	Ułamek widocznej półsfery niebieskiej z danego punktu pomiarowego (0-1); modelowany zgodnie z metodą Holmera i in. (2001); w literaturze często funkcjonuje pod angielską nazwą <i>Sky View Factor</i>	punkt	III
Typ ekspozycji na słońce – w cieniu/ na słońcu (EXPO)	Zmienna binarna określająca ekspozycję stanowiska na bezpośrednie promieniowanie słoneczne w okresie pomiarowym; wartość 1 oznacza lokalizację w cieniu, a 0 na słońcu.	punkt	III

E) Pokrycie terenu

Wskaźnik	Opis	Skala analizy	Artykuł
Klasa CORINE Land Cover (CLC)	Zidentyfikowane klasy pokrycia terenu na poziomie 3 na podstawie CLC (Chief Inspectorate for Environmental Protection, dostęp: 1.05.2024 r.-a): 111 – Zabudowa miejska zwarta; 112 – Zabudowa miejska luźna; 121 – Tereny przemysłowe lub handlowe; 122 – Tereny komunikacyjne i związane z komunikacją drogową i kolejową; 123 – Porty; 124 – Lotniska; 132 – Zwałowiska i hałdy; 141 – Tereny zielone; 142 – Tereny sportowe i wypoczynkowe; 211 – Grunty orne poza zasięgiem urządzeń nawadniających; 222 – Sady i plantacje; 231 – Łąki, pastwiska; 242 – Złożone systemy upraw i działek; 243 – Tereny zajęte głównie przez rolnictwo z dużym udziałem roślinności naturalnej; 311 – Lasy liściaste; 312 – Lasy iglaste; 313 – Lasy mieszane; 324 – Lasy i roślinność krzewiasta w stanie zmian; 331 – Plaże, wydmy, piaski; 411 – Bagna śródlądowe; 511 – Cieki; 512 – Zbiorniki wodne.	miasto	II

Typ lokalnej strefy klimatycznej (LCZ)	Zidentyfikowane typy lokalnych stref klimatycznych na podstawie LCZ (Demuzere i in. 2022): LCZ 1 – zwarta, wysoka zabudowa; LCZ 2 – zwarta zabudowa średniej wysokości; LCZ 3 – zwarta, niska zabudowa; LCZ 4 – luźna, wysoka zabudowa; LCZ 5 – luźna zabudowa średniej wysokości; LCZ 6 – luźna, niska zabudowa; LCZ 7 – zwarta, parterowa zabudowa o lekkiej konstrukcji; LCZ 8 – wielkopowierzchniowa niska zabudowa; LCZ 9 – rozproszona zabudowa; LCZ 10 – zabudowa przemysłowa; LCZ A – zwarty drzewostan; LCZ B – rozproszony drzewostan; LCZ C – krzewy i zarośla; LCZ D – niska roślinność; LCZ E – odsłonięta skała lub powierzchnie utwardzone; LCZ F – odsłonięta gleba lub piasek; LCZ G – woda.	miasto	II
--	--	--------	----

Ze względu na rodzaj wykorzystanych materiałów źródłowych charakterystyki zastosowane w analizach podzielono na następujące grupy:

- **Wskaźniki wyznaczone w środowisku systemów informacji przestrzennej** (FAR, BCR, RBVA, BH_{mean} , BH_{max} , TCD, DC) obliczono na podstawie danych z inwentaryzacji terenowej, estymowanej wysokości budynków oraz odległości punktów pomiarowych od centrum miasta, pozyskanych z aplikacji Google Earth Pro, a także z zobrazowań referencyjnych i publicznych baz danych przestrzennych. Kontury koron drzew pozyskano z Mapy Koron Drzew.⁶ Kontury zabudowy oraz terenów biologicznie czynnych, wraz z informacją o liczbie kondygnacji, zdigitalizowano w programach QGIS 3.4.9 i ArcMap 10.2.2 na podstawie Bazy Danych Obiektów Topograficznych, OpenStreetMap oraz zobrazowań Bing Aerial (OpenLayers Plugin 2.0.0).
- **Wskaźniki spektralne** (NDVI, NDBI, EVI) w artykule III obliczono na podstawie zobrazowań satelitarnych Sentinel-2 o rozdzielczości przestrzennej 10 m, pozyskanych w środowisku Google Earth Engine dla dat możliwie najbliższych

⁶ Zarząd Zieleni m.st. Warszawy. *Miliony warszawskich drzew na jednej mapie*. 2021. <https://zzw.waw.pl/2021/02/26/miliony-warszawskich-drzew-na-jednej-mapie>. Dostęp: 18.11.2025 r.

terminom kampanii pomiarowych. W celu uzyskania informacji o roślinności oraz powierzchniach zabudowanych wykorzystano obrazy skorygowane do współczynnika odbicia na poziomie gruntu (ang. *surface reflectance*) oraz zastosowano maskowanie chmur na podstawie kanału *Quality Assessment* (QA). Powierzchnie wód, które wykluczono z analiz, wyznaczono na podstawie Mapy Podziału Hydrograficznego Polski oraz mapy użytkowania terenu Warszawy z 2019 roku. Następnie w oprogramowaniu QGIS 2.22 obliczono średnie wartości wskaźników wokół stanowisk pomiarowych (10 m, 50 m i 100 m) z wykorzystaniem narzędzia *Zonal Statistics*.

- **Wskaźniki modelowane w specjalistycznym oprogramowaniu** (SVF, ELAI) wyznaczono na podstawie zdjęć hemisferycznych wykonywanych w trakcie każdej kampanii pomiarowej (artykuł III) bezpośrednio nad osłoną rejestratora temperatury powietrza (na wysokości 1,3 m nad powierzchnią terenu) z wykorzystaniem aparatu Canon EOS M50 oraz obiektywu typu „rybie oko”. Po przetworzeniu obrazów, wartości SVF obliczono w programie Sky View Factor Calculator v1.1, natomiast ELAI w Gap Light Analyzer v2.0.
- **Charakterystyki jakościowe** podzielono na dwie podgrupy: klasyfikacje przestrzenne oparte na bazach danych pokrycia terenu i struktury urbanistycznej (CLC, LCZ) oraz wskaźniki wyznaczone na podstawie inwentaryzacji terenowej (EXPO, VEG_{spec}, VEG_{gen}). Do pierwszej podgrupy należą dane pozyskane z programu CORINE Land Cover (Chief Inspectorate for Environmental Protection, 1.05.2024 r.-a, 1.08.2024 r.-b) oraz Global Map of Local Climate Zones (Demuzere i in., 2022) (artykuł II). W analizach CLC i LCZ wykluczono obszary wód powierzchniowych (51 – *wody śródlądowe*; LCZ G – *woda*) oraz tereny, dla których stwierdzono zmianę pokrycia między bazami z lat 2000 i 2018. Drugą podgrupę stanowiły typy ekspozycji oraz roślinności, określone na podstawie szczegółowego rozpoznania terenowego prowadzonego w bezpośrednim otoczeniu punktów pomiarowych, wspartego materiałami kartograficznymi (artykuł III).

3.3. Analizy statystyczne

Zależności między warunkami termicznymi i biotermicznymi a przestrzennymi charakterystykami środowiska miejskiego badano z wykorzystaniem metod statystycznych dostosowanych do pytań badawczych, charakteru danych oraz skali analizy. W niniejszym rozdziale przedstawiono ich skrócony przegląd, natomiast szczegółowy opis zastosowanych procedur znajduje się w poszczególnych artykułach wchodzących w skład rozprawy.

W artykule I zbadano zależności pomiędzy charakterystykami temperatury powietrza a wskaźnikami opisującymi morfologię miejską, obliczonymi dla różnych stref buforowych wokół punktów pomiarowych (promień 10 m, 50 m i 100 m). Do analizy wykorzystano współczynnik korelacji liniowej Pearsona (istotność statystyczna na poziomach $\alpha = 0,05$ oraz $\alpha = 0,01$). Uwzględniono łącznie 1020 par obejmujących poszczególne charakterystyki przestrzenne oraz termiczne. Ponadto zastosowano metodę analizy skupień k-średnich z wykorzystaniem odległości euklidesowej. Dla wszystkich zmiennych (termicznych i przestrzennych) wyodrębniono po trzy klastry odpowiadające niskim, średnim i wysokim wartościom danego parametru. Następnie oceniono zgodność klasyfikacji punktów pomiarowych pomiędzy klastrami wyznaczonymi na podstawie wskaźników przestrzennych a klastrami utworzonymi dla charakterystyk termicznych, wyrażając ją jako odsetek pokrywających się przyporządkowań punktów badawczych. Dodatkowo podjęto próbę identyfikacji modeli nieliniowych, które mogłyby opisywać zależności pomiędzy warunkami termicznymi a morfologią miejską lepiej niż model liniowy. W tym celu dla każdej analizowanej relacji przetestowano zestaw 27 funkcji krzywoliniowych dopasowanych metodą najmniejszych kwadratów, wybierając model charakteryzujący się najwyższą wartością współczynnika determinacji (R^2). Wszystkie analizy statystyczne przedstawione w artykule I przeprowadzono w oprogramowaniu Statgraphics Centurion XVI.II.

W artykule II, dotyczącym analizy temperatury powierzchni terenu, po wykluczeniu obszarów niespełniających przyjętych kryteriów analizy (str. 31), zastosowano metody autokorelacji przestrzennej. Obszary skupień istotnie niższych i wyższych wartości względem otoczenia („cold spoty” i „hot spoty”) zidentyfikowano z wykorzystaniem statystyki Getis-Ord Gi* w narzędziu *Optimized Hot Spot Analysis* w programie ArcMap 10.2.2. Analiza umożliwiła wykrycie przestrzennych koncentracji wysokich i niskich wartości temperatury powierzchni terenu przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Na podstawie 25 zobrazowań wejściowych określono występowanie THCS w całym okresie badawczym (z wykluczeniem obszarów o niewystarczającym pokryciu danymi), a następnie porównano uzyskane wyniki z bazami pokrycia terenu i struktury urbanistycznej (CLC, LCZ). Kolejnym etapem była ekstrakcja częstości THS i TCS dla punktów sieci monitoringu temperatury powietrza wraz z przypisanymi im charakterystykami środowiska miejskiego (zastosowano strefę buforową o promieniu 100 m, zgodnie z wynikami artykułu I). W odniesieniu do danych punktowych zastosowano nieparametryczną korelację rang Spearmana ($\alpha = 0,05$). Dodatkowo, w celu identyfikacji grup stanowisk o podobnych cechach termicznych, przeprowadzono hierarchiczną analizę skupień metodą Warda z wykorzystaniem odległości euklidesowej. Następnie porównano roczny, letni i zimowy dobowy reżim temperatury powietrza dla punktów przypisanych do klastrów o różnej częstości THCS. Obliczenia wykonano w oprogramowaniu Statgraphics Centurion XVI.II.

W artykule III analizę warunków biotermicznych oparto na połączeniu danych pomiarowych z danymi reanalizy klimatycznej. W pierwszym etapie oceniono zgodność pomiędzy wartościami wskaźnika UTCI obliczonymi na podstawie pomiarów in situ a odpowiadającymi im wartościami pochodzącymi z bazy ERA5-HEAT. Różnice pomiędzy zbiorami danych analizowano w środowisku R (wersja 4.5.1) (R Core Team, 2025) wykorzystując podstawowe miary błędu: średni błąd bezwzględny (MAE), pierwiastek z błędu średniokwadratowego (RMSE) oraz błąd systematyczny (Bias). Następnie przeprowadzono analizę zależności pomiędzy

wskaźnikiem obciążeń termicznych człowieka a miarami opisującymi lokalne cechy środowiska z wykorzystaniem uogólnionych modeli addytywnych (GAM) w programie R (wersja 4.4.2) (R Core Team, 2024). Umożliwiły one równoczesne uwzględnienie nieliniowych zależności pomiędzy zmiennymi oraz efektów losowych (identyfikator parku, lokalizacja punktu pomiarowego, dzień obserwacji). Ze względu na współliniowość części wskaźników przestrzennych zastosowano podejście jednoczynnikowe. Zmienną objaśnianą była każdorazowo różnica pomiędzy wskaźnikiem UTCI obliczonym na podstawie danych pomiarowych a wartością referencyjną reanalizy klimatycznej ERA5-HEAT ($UTCI_{diff}$), co umożliwiło analizę odchyłeń od warunków tła. Analizy przeprowadzono oddzielnie dla całego sezonu wegetacyjnego oraz osobno dla wiosny, lata i jesieni. W celu ułatwienia interpretacji wyników zmienne ilościowe przeskalowano do zakresów odpowiadających ich typowej zmienności (zmiana o 10 punktów procentowych dla wskaźników udziału pokrycia terenu, 0,1 dla wskaźników spektralnych i współczynnika widoku nieba, 1 jednostka dla pozostałych parametrów ilościowych). Zmienne jakościowe analizowano względem kategorii referencyjnych: trawnik dla VEG_{gen} , trawnik bez pojedynczych drzew dla VEG_{spec} oraz cień dla EXPO.

4. Wyniki badań i dyskusja

W niniejszym opracowaniu syntetycznie omówiono najważniejsze wyniki poszczególnych publikacji. Szczegółowe opisy rezultatów, w tym pełne zestawienia analiz statystycznych, przedstawiono w publikacjach i materiałach uzupełniających, do których odwołania zamieszczono w tekście.

4.1. Wpływ najbliższego otoczenia na temperaturę powietrza

Pierwszy cel szczegółowy został zrealizowany w publikacji I (ryc. 4). **C1: Identyfikacja wpływu elementów środowiska parametryzowanych wskaźnikami zagospodarowania przestrzennego na charakterystyki temperatury powietrza w trakcie ekstremalnie ciepłych miesięcy oraz określenie skali przestrzennej, w której zależności te są najsilniejsze.**

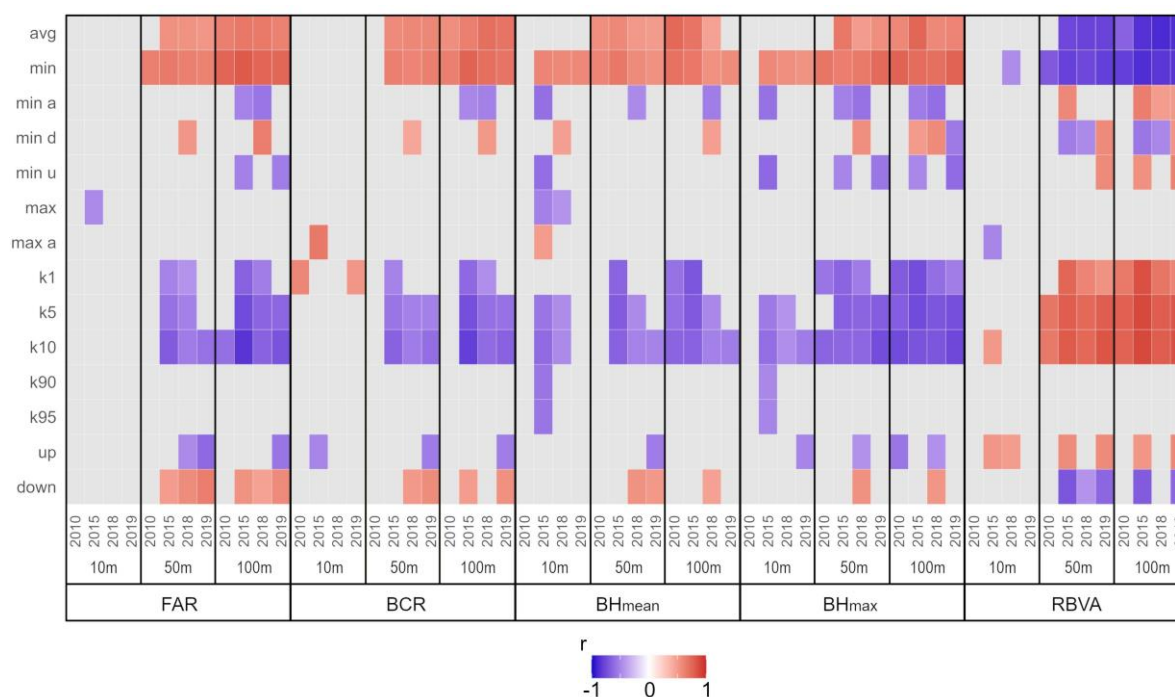


Rycina 4. Schemat graficzny artykułu I.

Źródło: opracowanie własne na podstawie artykułu I.

W analizie zależności między charakterystykami temperatury powietrza podczas ekstremalnie ciepłych miesięcy a wskaźnikami zagospodarowania przestrzennego stwierdzono 274 statystycznie istotne korelacje (ryc. 5). Większość z nich charakteryzowała się umiarkowaną siłą związku, przy czym nie odnotowano relacji bardzo silnych ani bardzo słabych (patrz 3. *Results*, str. 5, akapit 1). Ponadto dla 111 analizowanych par stwierdzono ponad 50% zgodność przyporządkowania punktów pomiarowych pomiędzy klastrami grupującymi wysokie, średnie

i niskie wartości charakterystyk termicznych oraz wskaźników zagospodarowania przestrzennego (patrz str. 5, akapity 9-10). Oznacza to, że morfologia miejska analizowanych obszarów w znacznym stopniu odpowiada zróżnicowaniu lokalnej temperatury powietrza.



Na rycinie uwzględniono jedynie te charakterystyki termiczne, które wykazały istotną statystycznie korelację z przynajmniej jednym ze wskaźników zagospodarowania przestrzennego.

Rycina 5. Macierz korelacji pomiędzy charakterystykami termicznymi a wskaźnikami zagospodarowania przestrzennego.

Źródło: opracowanie własne na podstawie tab. 3 w materiałach uzupełniających do artykułu I.

Spośród analizowanych charakterystyk termicznych najsilniejszą zależność od wskaźników zagospodarowania przestrzennego wykazywała minimalna temperatura powietrza, dla której stwierdzono również największą liczbę silnych korelacji (str. 5, akapity 2-4 i 11). Najsilniejszy związek odnotowano między minimalną temperaturą powietrza a udziałem terenów biologicznie czynnych w promieniu 100 m od punktu pomiarowego ($r = -0,87$). Wysokie wartości współczynników korelacji uzyskano również dla średniej temperatury powietrza oraz charakterystyk opisujących dolną część rozkładu danych (k5, k10). Wyniki dotyczące najwyższych wartości temperatury powietrza wykazały natomiast wyraźnie słabsze zależności od wskaźników zagospodarowania przestrzennego. Nie stwierdzono ponadto istotnych statystycznie

relacji z większością miar zmienności maksymalnej dobowej temperatury powietrza ani z częstością wartości powyżej 99. percentyla w danym punkcie pomiarowym.

Uzyskane wyniki wskazywały, że okoliczna struktura miasta kształtowała przede wszystkim najniższe wartości temperatury powietrza, które w warunkach radiacyjnych występowały głównie w porze nocnej. Podobny mechanizm był wcześniej opisywany w badaniach klimatu miejskiego, zwłaszcza w analizach efektu miejskiej wyspy ciepła, wskazujących na silniejsze zróżnicowanie temperatury powietrza w warstwie przyziemnej nocą niż w ciągu dnia (Fortuniak, 2001; K. Błażejczyk, Kuchcik i in., 2014; Jurek i in., 2025; Lehnert i in., 2025). W porze dziennej powierzchnie intensywnie nagrzewają się pod wpływem promieniowania słonecznego w zależności od ekspozycji, co sprzyja rozwojowi ruchów konwekcyjnych oraz zmniejsza przestrzenne kontrasty temperatury powietrza. Nocą zaś powierzchnie sztuczne oddają zgromadzone ciepło zgodnie ze swoimi właściwościami termicznymi, a straty promieniowania długofalowego są ograniczane przez zasłonięcie horyzontu.

Analiza wskaźników zagospodarowania przestrzennego potwierdziła, że udział terenów biologicznie czynnych cechował się największą liczbą istotnych statystycznie zależności z charakterystykami termicznymi oraz najwyższą zgodnością przyporządkowania punktów pomiarowych między klastrami w analizie skupień (str. 5, akapity 5-6, 8 i 10). Wskaźnik RBVA wykazywał ujemne relacje ze średnią i minimalną temperaturą powietrza, natomiast dodatnie zależności dotyczyły liczby wartości poniżej 1., 5. i 10. percentyla wyznaczonego na podstawie bazy danych z danego miesiąca dla każdego z punktów pomiarowych. Uzyskane wyniki są zgodne z rezultatami innych badań wskazujących na wzrost chłodzącej roli zieleni miejskiej wraz ze wzrostem jej udziału w przestrzeni (Beele i in., 2024; Lehnert i in., 2025; Petralli i in., 2014; Szulczewska i in., 2014). Efekt ten wynika z właściwości cieplnych powierzchni naturalnych, ograniczenia dopływu promieniowania oraz procesów ewapotranspiracji i fotosyntezy. Co więcej, badania sugerują również, że wielkość tego oddziaływania zależy od rodzaju i konfiguracji roślinności (Cheng i in., 2025; Nie i in.,

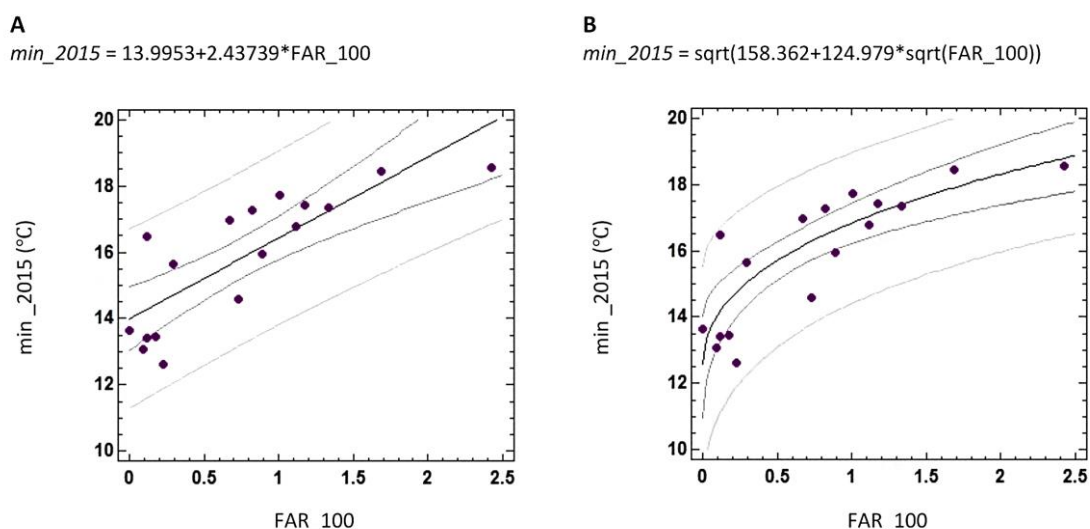
2024; Rahman i in., 2020), podczas gdy podstawowy wskaźnik RBVA nie uwzględnia tych cech.

Spośród wskaźników opisujących zabudowę, najsilniejszy związek z charakterystykami termicznymi wykazywały maksymalna wysokość budynków oraz wskaźnik intensywności zabudowy, natomiast najsłabszy – gęstość zabudowy (str. 5, akapity 5-7 i 10). W większości analizowanych przypadków wzrost wartości parametrów opisujących morfologię budynków był związany z lokalnym wzrostem temperatury powietrza, choć zgodność przyporządkowania punktów pomiarowych w analizie skupień była wyraźnie mniejsza niż w przypadku RBVA. Uzyskane wyniki sugerowały, że wskaźniki uwzględniające pionowe cechy zabudowy (wysokość lub liczbę kondygnacji) silniej wpływały na temperaturę powietrza na wysokości 2 m nad powierzchnią gruntu niż parametry opisujące jedynie poziomy wymiar zabudowy. Podobne zależności opisywano również w literaturze (Stewart i Oke, 2012; Tian i in., 2019; Apreda i in., 2020; X. Wu i in., 2025), wskazując, że zróżnicowanie temperatury jest silniej związane z geometrią zabudowy niż wyłącznie z pokryciem terenu. Pionowe cechy budynków wpływają m.in. na warunki radiacyjne, modyfikując tempo nagrzewania i wychładzania powierzchni.

W niniejszym badaniu wszystkie wskaźniki obliczane dla większej skali przestrzennej (strefa buforowa o promieniu 100 m) wykazywały większą liczbę i siłę korelacji niż wskaźniki wyznaczone dla najbliższego otoczenia punktu pomiarowego (strefa buforowa o promieniu 10 m) (str. 5, akapity 5-6). Oznaczało to, że temperatura powietrza na poziomie 2 m nad powierzchnią gruntu nie była determinowana wyłącznie przez bezpośrednie otoczenie punktu, lecz przez szerszy układ przestrzenny, co jest zgodne z dotychczasowym stanem wiedzy (Petralli i in., 2014; Simović i in., 2025; X. Wu i in., 2025). Wielkość obszaru badawczego przyjęta do analiz zależności warunków termicznych od morfologii miejskiej jest w literaturze zróżnicowana i zależy zarówno od lokalnych uwarunkowań przestrzennych, jak i od celu prowadzonych analiz (Oke, 1997; Qian i in., 2018; Cheung i Jim, 2019; Beele i in., 2024; X. Wu i in., 2025). W niniejszej rozprawie przyjęto podejście aplikacyjne,

skoncentrowane na określeniu wielkości obszaru badawczego istotnego z punktu widzenia potencjalnych działań adaptacyjnych od mikroskali do skali lokalnej (bufory o promieniu 10 m, 50 m i 100 m).

Ostatnim etapem analizy było określenie typu zależności między charakterystykami termicznymi a wskaźnikami zagospodarowania przestrzennego. W tym celu przetestowano dopasowanie modeli alternatywnych. Mimo istotnych statystycznie zależności liniowych, zarówno na poziomie $\alpha = 0,05$ jak i $\alpha = 0,01$, większość relacji była lepiej opisywana przez modele krzywoliniowe (ryc. 6) (str. 5-6, akapity 12-15). Spośród 1020 analizowanych zależności model liniowy okazał się najlepszy jedynie w 4,8% przypadków. Wyniki te wskazywały, że zależności pomiędzy cechami zagospodarowania przestrzennego a charakterystykami temperatury powietrza nie były wprost proporcjonalne i nie przebiegały liniowo wraz ze wzrostem analizowanych parametrów. Przewagę modeli nieliniowych w analizach temperatury powietrza sugerowały również nieliczne badania (Y. Chen i in., 2025; Shi i in., 2025; Beele i in., 2026), co potwierdza złożony charakter relacji pomiędzy cechami środowiska miejskiego a warunkami termicznymi oraz wskazuje na potrzebę dalszych badań nad mechanizmami kształtującymi lokalne warunki termiczne.



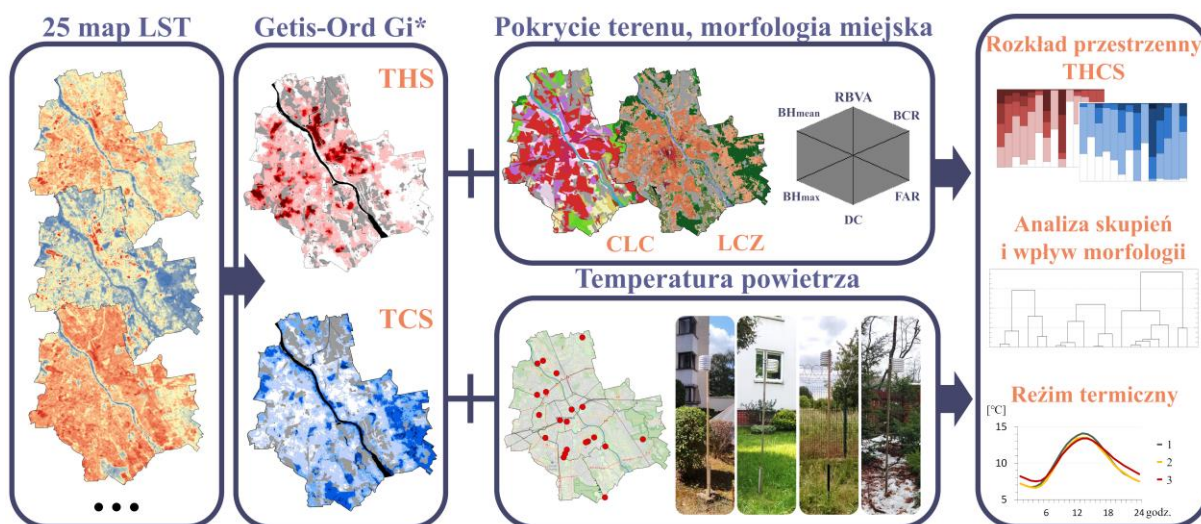
Rycina 6. Model liniowy (A) i najlepiej dopasowany alternatywny model krzywoliniowy (B) dla relacji minimalnej temperatury powietrza w sierpniu 2015 r. ze wskaźnikiem intensywności zabudowy dla buforu o promieniu 100 m od punktu pomiarowego.

Źródło: opracowanie własne na podstawie ryc. 3, artykuł I.

W artykule I potwierdzono część hipotezy badawczej, wykazując, iż temperatura powietrza rejestrowana 2 m nad powierzchnią gruntu była kształtowana przez lokalną morfologię miejską. Jednakże siła związku charakterystyk termicznych ze wskaźnikami zagospodarowania przestrzennego różniła się w zależności od badanych parametrów, a nie tylko od konkretnego elementu środowiska (np. wymiar poziomy i pionowy w FAR oraz wymiar poziomy w BCR). Siła korelacji zależała również od skali przestrzennej analizy – wraz ze wzrostem promienia strefy buforowej (do 100 m), obserwowano silniejszy wpływ otoczenia na temperaturę powietrza w danym punkcie.

4.2. Wpływ pokrycia terenu na temperaturę powierzchni

Drugi cel szczegółowy został zbadany i przedstawiony w ramach publikacji II (ryc. 7). **C2: Określenie przestrzennego zróżnicowania „hot spotów” i „cold spotów”, ich powiązań z typami pokrycia terenu oraz reżimem temperatury powietrza w ujęciu rocznym i sezonowym (lato i zima).**

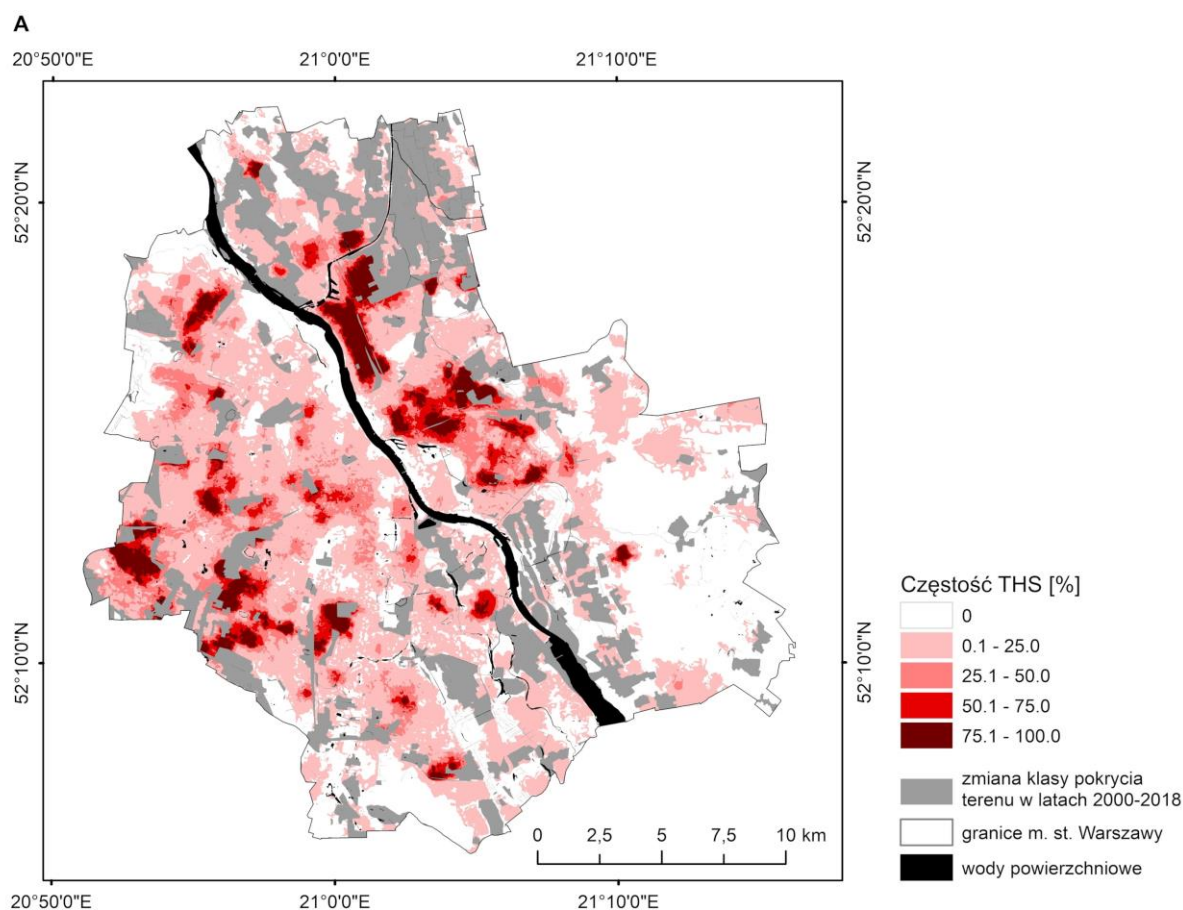


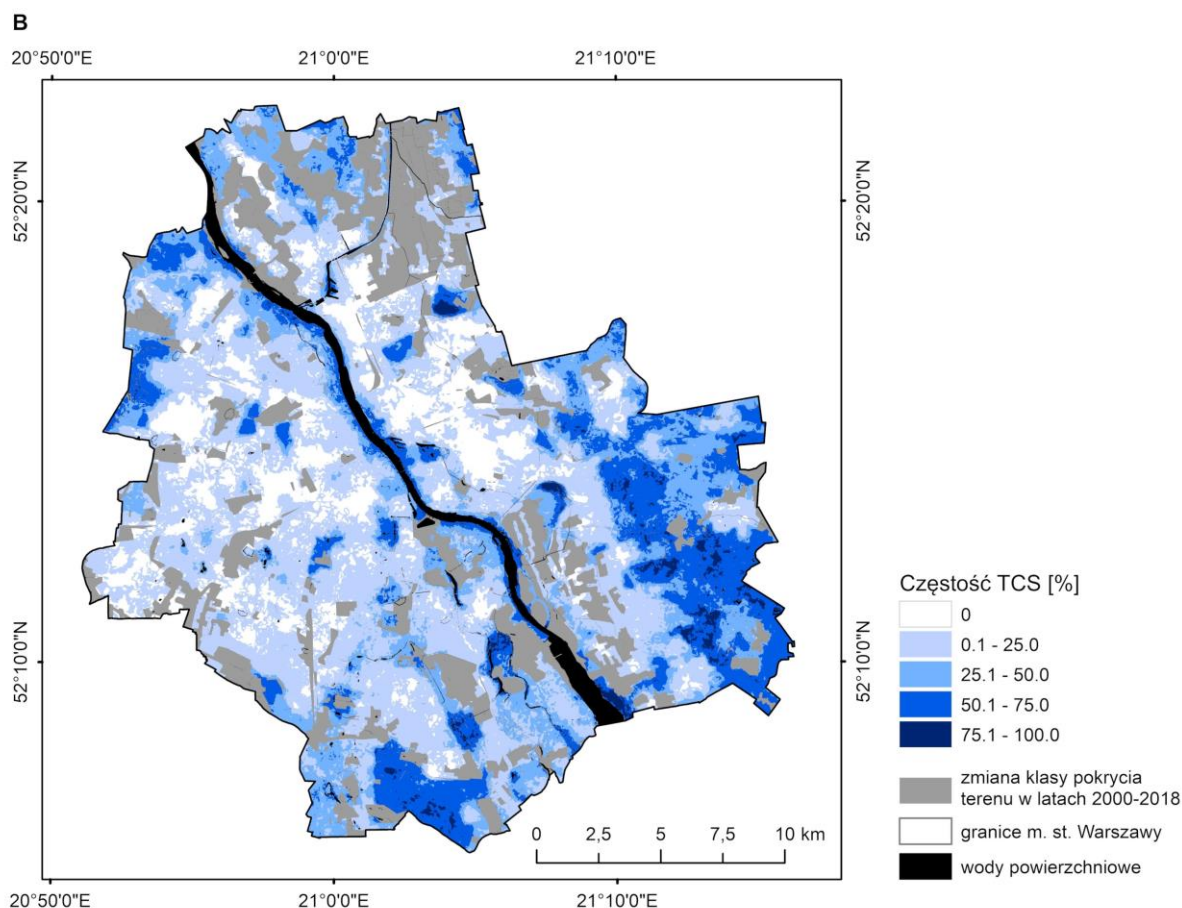
Rycina 7. Schemat graficzny artykułu II.

Źródło: opracowanie własne na podstawie artykułu II.

Analiza autokorelacji przestrzennej wykazała silne zróżnicowanie rozmieszczenia termicznych „hot spotów” i „cold spotów” na terenie Warszawy (ryc. 8) (patrz *Results*, str. 157-158, akapity 1-3). THS charakteryzowały się głównie punktowym

występowaniem i były związane z pojedynczymi obiektami lub niewielkimi fragmentami przestrzeni o wyższej LST względem otoczenia. Termiczne „hot spoty” wystąpiły co najmniej raz na 62,5% analizowanego obszaru, jednak ich wysoka częstość (ponad 50% obserwacji) była ograniczona do niewielkiego fragmentu miasta (9,0% powierzchni). Z kolei TCS tworzyły rozległe i przestrzennie spójne struktury, często związane z obszarami zieleni miejskiej oraz doliną Wisły. Obejmowały one zdecydowanie większą część Warszawy (84,4%) i obserwowano je ponad dwukrotnie częściej niż THS. Uzyskane wyniki wskazują, że obszary o podwyższonej LST mają zwykle lokalny charakter, podczas gdy strefy chłodniejsze tworzą rozległe struktury wynikające z większej ciągłości przestrzennej elementów środowiska odpowiedzialnych za ich kształtowanie, co potwierdzają badania Dąbrowskiej-Zielińskiej i in. (2019), Guerri i in. (2021) oraz Kuchcik i in. (2026). Natomiast obserwowane przez Wei’a i Wang’a (2022) nakładanie się obu zjawisk tłumaczono zmieniającymi się warunkami meteorologicznymi oraz silnym zróżnicowaniem właściwości termicznych struktur miejskich.





Rycina 8. Częstość termicznych „hot spotów” (A) i „cold spotów” (B) w Warszawie.

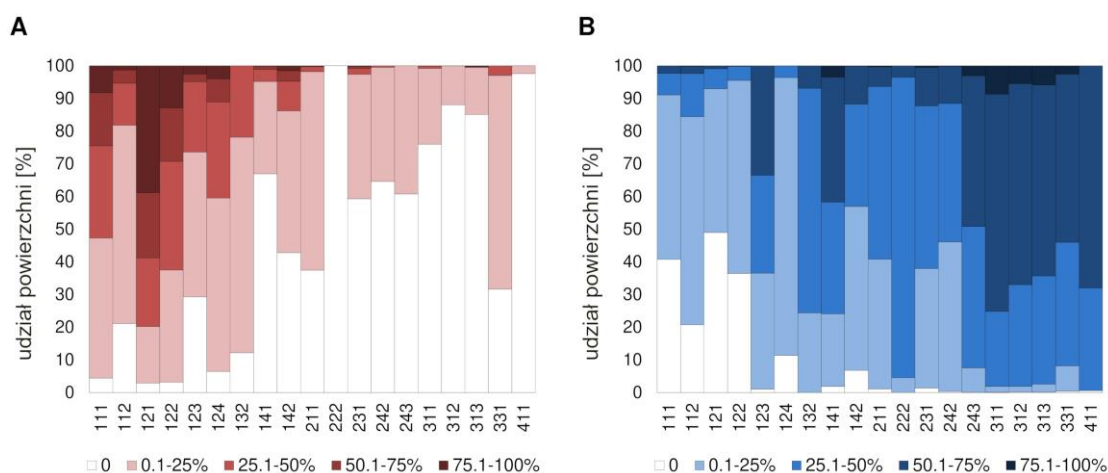
Źródło: opracowanie własne na podstawie ryc. 1, artykuł II.

Analiza wpływu roślinności na występowanie THCS przeprowadzona z wykorzystaniem klasyfikacji CLC (str. 158-160, akapity 4-5 i 9) i LCZ (str. 158-160, akapity 6-7 i 9), a także wskaźnika terenów biologicznie czynnych (str. 159-160, akapity 8-9), wykazała wyraźny związek między obecnością roślinności a termicznymi „cold spotami” (ryc. 9, ryc. 10A). Największe częstości TCS, według klasyfikacji CLC, obserwowano na terenach leśnych (311, 312, 313) oraz na obszarach bagien śródlądowych (411), natomiast według typologii LCZ – w strefach zwartego drzewostanu (LCZ A). Dodatkowo wskaźnik RBVA wykazywał silną dodatnią korelację z częstością TCS oraz ujemną z THS. Uzyskane wyniki są zgodne z wcześniejszymi badaniami wskazującymi na istotną rolę terenów zielonych w obniżaniu LST, wynikającą z właściwości termicznych powierzchni naturalnych, procesu ewapotranspiracji oraz efektu zacienienia (Jamei i in., 2019; Guerri i in., 2021; Hussain i in., 2023). Jednocześnie wyniki niniejszej pracy wykazały, że sama obecność

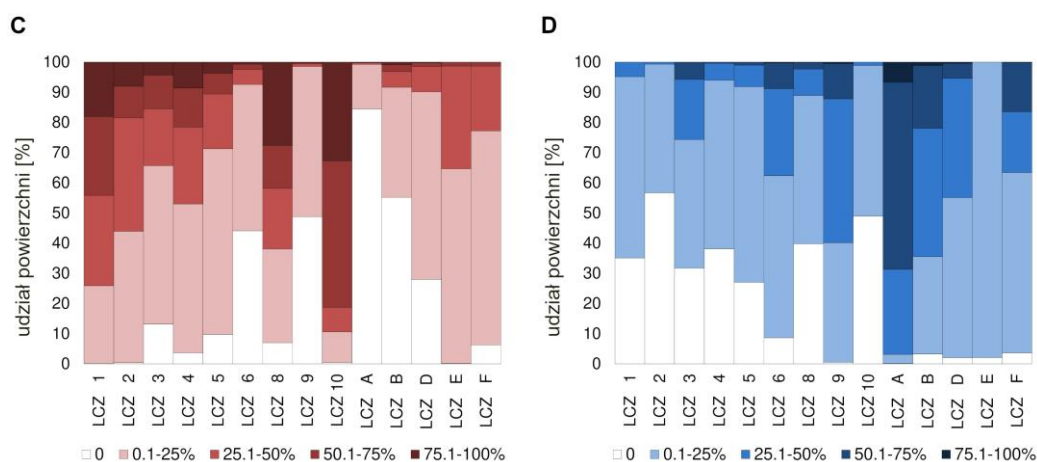
roślinności nie stanowi warunku wystarczającego do występowania TCS. Zarówno analiza oparta na klasyfikacji CLC, jak i LCZ wykazała, że THS mogą stosunkowo często pojawiać się również na terenach klasyfikowanych jako zieleń miejska, a także w strefach niskiej roślinności lub rozproszonego drzewostanu. Według obecnego stanu wiedzy, skuteczność redukcji LST przez rośliny determinowane jest przez ich kondycję, strukturę i konfigurację przestrzenną, a także charakter otoczenia, warunki meteorologiczne, porę roku oraz obecność systemów nawadniających (Greene i Kedron, 2018; Geletič i in., 2019; Rahman i in., 2020; Winbourne i in., 2020; Yuan i in., 2021; Cheung i in., 2024). Czynniki te wpływają m.in. na stan uwodnienia tkanek roślin, wilgotność gleby, intensywność procesów biofizycznych roślin czy lokalną modyfikację warunków radiacyjnych, a tym samym na lokalny bilans cieplny.

Ocena wpływu zabudowy na występowanie THCS została przeprowadzona z wykorzystaniem klasyfikacji CLC (str. 158-160, akapity 4-5 i 9), LCZ (str. 158-160, akapity 6-7 i 9) oraz wskaźników opisujących morfologię miejską i odległość od centrum Warszawy (str. 159-160, akapity 8-9). Analiza wykazała wyraźny związek pomiędzy parametrami zabudowy a występowaniem termicznych „hot spotów” (ryc. 9, ryc. 10A). Największe częstotliwości THS według klasyfikacji CLC obserwowano na obszarach zabudowy przemysłowej i handlowej (121) oraz terenach komunikacyjnych (122), natomiast według typologii LCZ – na obszarach przemysłowych (LCZ 10). Analiza korelacji wykazała ponadto dodatnie zależności pomiędzy częstością THS a wskaźnikami intensywności i gęstości zabudowy oraz ujemne z odległością od centrum miasta, natomiast w przypadku TCS obserwowano odwrotne zależności. Uzyskane wyniki są zgodne z literaturą, wskazując, że wraz ze wzrostem udziału powierzchni zabudowanych, rośnie również wartość LST (Guerri i in., 2022; Hidalgo-García i Arco-Díaz, 2022; Hussain i in., 2023; Sharma i in., 2026). Efekt ten związany jest z silnym nagrzewaniem materiałów budowlanych w ciągu dnia, mniejszym udziałem powierzchni naturalnych oraz zmianami warunków radiacyjnych i pola wiatru w przestrzeni miejskiej. Jednocześnie wyniki niniejszej pracy wskazują, że wskaźniki opisujące jedynie pionowy wymiar zabudowy wykazują nieistotny (THS)

lub niewielki (TCS) wpływ na kształtowanie się ekstremów LST, co jest zgodne z obserwacjami Huang'a i Wang'a (2019) oraz Zhao i in. (2023). Efekty te różnią się w zależności od pory roku, pory dnia i ekspozycji, skutkując wyższym LST wśród niskich, gęsto zabudowanych obszarów, natomiast niższym LST wśród wysokich budynków o niewielkiej powierzchni (Grimmond, 2007; Yuan i in., 2021). Ponadto obszary miejskie różnią się pod względem albedo, efektu zacieniania, właściwości termicznych materiałów budowlanych, a także obecności niewielkich obiektów o odmiennym temperaturze powierzchni, takich jak panele fotowoltaiczne czy zielone dachy (Matias i Lopes, 2020; Guerri i in., 2022; Ramani i in., 2024), co może być przyczyną występowania termicznych „cold spotów” nawet wśród miejskiej zabudowy. Należy jednak podkreślić, że morfologia miasta wpływa również na anizotropię termiczną, co oznacza, że wraz ze wzrostem stosunku wysokości do szerokości budynków, wartości LST mogą być przeszacowane (Krayenhoff i Voogt, 2016).



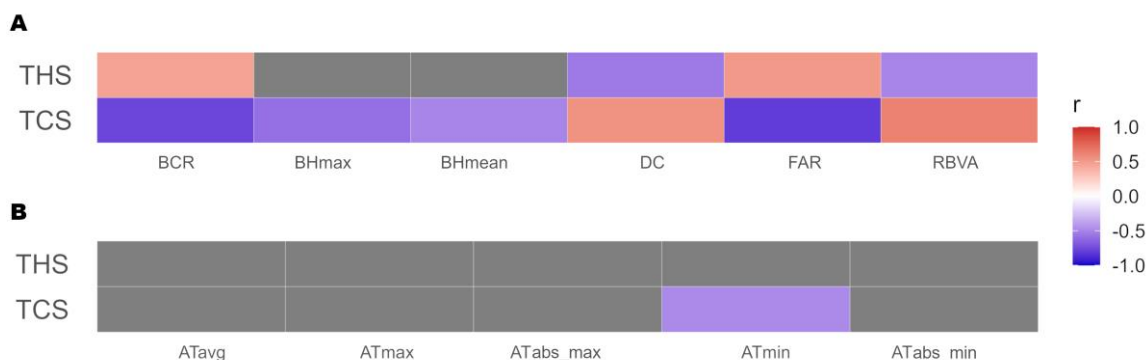
Legenda według: GIOŚ – CORINE Land Cover (<https://clc.gios.gov.pl/index.php/o-clc/legenda>); objaśnienia kodów klas pokrycia terenu znajdują się w tab. 4E (str. 36).



Legenda według ryc. 1 w: Demuzere i in. (2022); objaśnienia kodów lokalnych stref klimatycznych znajdują się w tab. 4E (str. 36-37).

Rycina 9. Częstość termicznych „hot spotów” (A, C) i „cold spotów” (B, D) w poszczególnych typach CORINE Land Cover (A, B) i Lokalnych Stref Klimatycznych (C, D).

Źródło: opracowanie własne na podstawie ryc. 5 i 6, artykuł II.



Rycina 10. Macierz korelacji pomiędzy częstością THCS a wskaźnikami zagospodarowania przestrzennego (A) oraz charakterystykami temperatury powietrza (B).

Źródło: opracowanie własne na podstawie tab. 2, artykuł II.

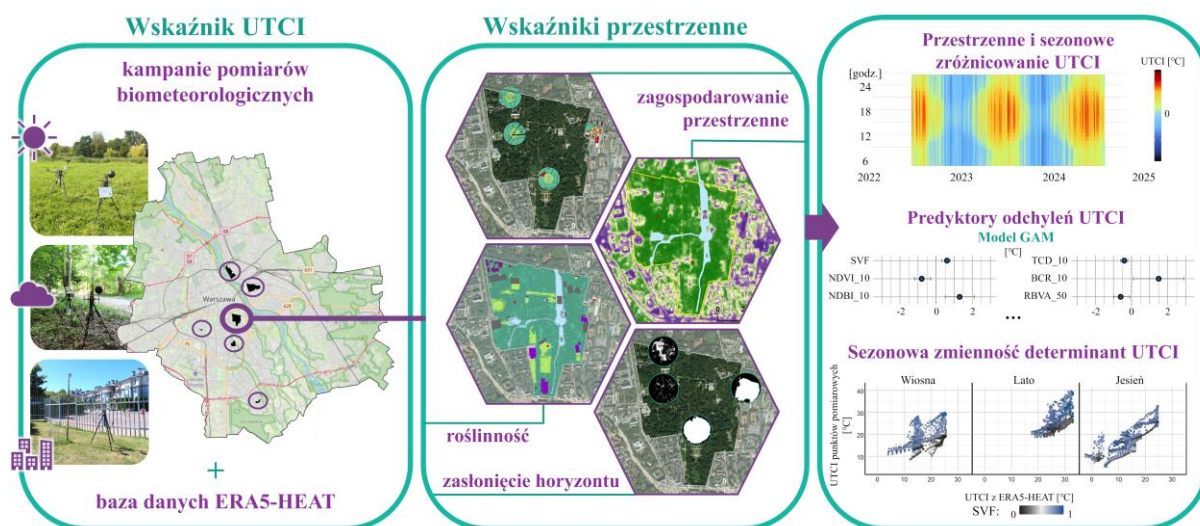
Analiza zależności pomiędzy częstością THCS a wybranymi wieloletnimi rocznymi charakterystykami temperatury powietrza w większości przypadków nie wykazała istotnych statystycznie zależności (ryc. 10B; str. 160-162, akapity 10-12). Wyjątkiem była umiarkowana ujemna korelacja pomiędzy częstością TCS a wieloletnią średnią minimalną temperaturą powietrza. Wyraźniejsze różnice pomiędzy wydzielonymi grupami punktów uwidoczniły się dopiero podczas analizy dobowego przebiegu temperatury powietrza. Punkty cechujące się niewielką częstością THS i dużą częstością TCS wykazywały w skali rocznej oraz w sezonie letnim najniższe wartości temperatury w godzinach nocnych, co może odpowiadać

efektowi chłodzącemu obszarów o większym udziale roślinności. Z kolei obszary o częstym występowaniu THS i małej częstości TCS osiągały w tym czasie najwyższe wartości temperatury powietrza, co może wskazywać na powolne oddawanie ciepła zmagazynowanego w ciągu dnia przez powierzchnie sztuczne. Zimą przez cały dzień najchłodniejsze były punkty o umiarkowanej częstości THCS otoczone zarówno strukturami zabudowanymi, jak i otwartymi. Obecny stan wiedzy wskazuje, że pomimo statystycznie istotnych zależności pomiędzy temperaturą powierzchni terenu a temperaturą powietrza, związek ten słabnie wraz ze wzrostem stopnia urbanizacji (Gawuc i in., 2020). Ponadto przestrzenny rozkład ich najwyższych i najniższych wartości nie musi być zgodny (Cao i in., 2021; Středová i in., 2021). Może to wynikać z różnic w dobowym przebiegu procesów nagrzewania i wychładzania powierzchni, związanych z bezpośrednim oddziaływaniem promieniowania słonecznego, akumulacją energii cieplnej oraz tempem jej oddawania po zachodzie słońca.

Opisana publikacja potwierdziła część hipotezy badawczej, wykazując, iż warunki termiczne reprezentowane przez częstość termicznych „hot spotów” i „cold spotów” były kształtowane przez pokrycie terenu i lokalne zagospodarowanie przestrzenne. Wpływ ten został uwidoczniiony zarówno w skali miejskiej, jak i lokalnej. Obszary o różnej częstości THCS nie wykazywały istotnych statystycznie relacji z wieloletnimi charakterystykami temperatury powietrza, jednakże cechowały się odmiennymi dobowymi reżimami w skali roku, a także latem oraz zimą.

4.3. Wpływ elementów środowiska miejskiego na kształtowanie obciążeń termicznych

Trzeci cel szczegółowy został zrealizowany w publikacji III (ryc. 11). **C3: Ocena wpływu elementów środowiska na kształtowanie obciążeń termicznych człowieka w przestrzeni parków miejskich w różnych fazach sezonu wegetacyjnego i skalach przestrzennych.**



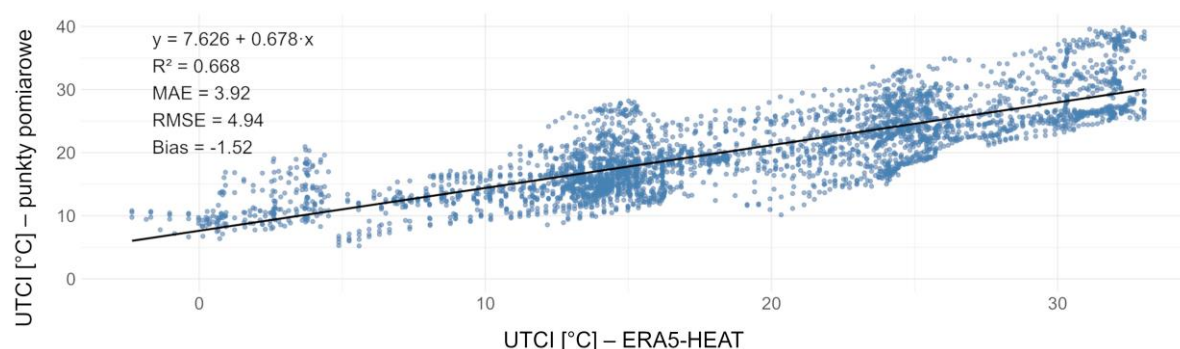
Rycina 11. Schemat graficzny artykułu III.

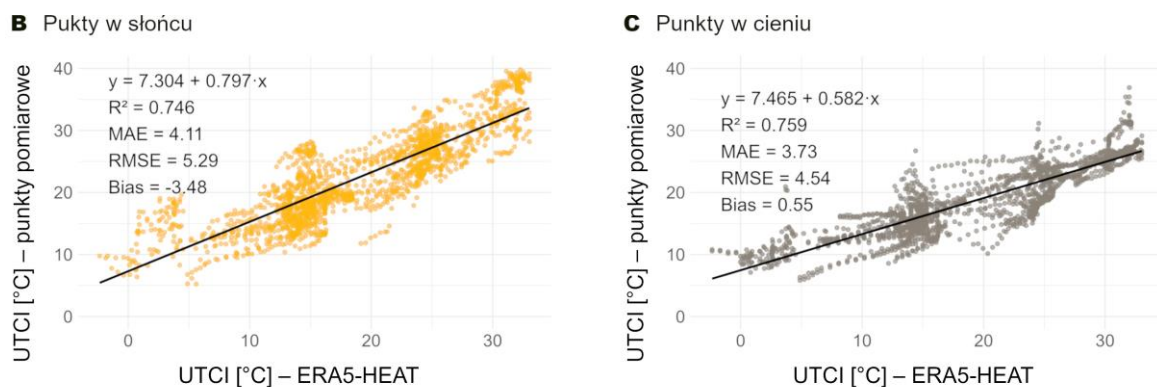
Źródło: opracowanie własne na podstawie artykułu III.

Warunki biometeorologiczne w okresie badań obejmowały szerokie spektrum obciążeń termicznych, od umiarkowanego stresu chłodu do silnego stresu gorąca (patrz 3. *Results*, str. 6-7, akapit 1). Na podstawie bazy danych ERA5-HEAT stwierdzono, że w analizowanych porach roku dominowały warunki termoneutralne (wiosna i jesień) oraz umiarkowanego stresu gorąca (lato). Pozwoliło to na ocenę środowiska parkowego w różnych warunkach obciążenia termicznego. Z kolei analiza zróżnicowania warunków biometeorologicznych na podstawie danych pochodzących z kampanii pomiarowych wykazała wyraźną zmienność zarówno pomiędzy parkami, jak i w ich obrębie (str. 7-8, akapity 3-6). Wartości UTCI z pomiarów in situ mieściły się w zakresie od niewielkiego stresu chłodu ($5,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) do bardzo silnego stresu gorąca ($39,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Niezależnie od analizowanego parku, największe kontrasty obserwowano między stanowiskami nasłonecznionymi i zacienionymi, szczególnie latem, kiedy różnice średnich wartości UTCI sięgały niemal $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Wiosną i jesienią kontrasty te były wyraźnie mniejsze (od $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), co wiązało się ze zmniejszonym dopływem promieniowania słonecznego oraz sezonową zmiennością ulistnienia. W niektórych przypadkach odnotowano nawet większe wartości UTCI w cieniu niż na słońcu, co można tłumaczyć większym wypromieniowaniem ciepła i przewietrzaniem stanowisk na otwartych przestrzeniach.

Porównanie wartości UTCI obliczonych na podstawie pomiarów terenowych z bazą ERA5-HEAT wykazało systematyczne zaniżenie wartości przez zasób reanalizy klimatycznej, przy umiarkowanym rozrzucie błędu (ryc. 12) (str. 7, akapit 2). Przyczyną obserwowanych rozbieżności może być tendencja ERA5-HEAT do niedoszacowania stresu ciepła oraz przeszacowania stresu chłodu w zróżnicowanym środowisku miejskim, na co wskazują wyniki badań Krüger'a i Di Napoli (2022). W niniejszej analizie stwierdzono, że obserwowane odchylenie w przypadku stresu chłodu było związane przede wszystkim z zawyżonymi wartościami prędkości wiatru (patrz *Electronic Supplemental Material* do artykułu III, ryc. 2), które z kolei znacznie obniżają wartości UTCI w warunkach niskiej temperatury powietrza, co wynika z wrażliwości wskaźnika na konwekcyjną utratę ciepła (Bröde i in., 2013; Provençal i in., 2016). W artykule III rozbieżności pomiędzy wartościami UTCI uzyskanymi z pomiarów terenowych a danymi reanalizy były większe w lokalizacjach nasłonecznionych, natomiast w punktach zacienionych zgodność była wyższa. Może to wynikać z silniejszego wpływu średniej temperatury promieniowania na kształtowanie warunków biometeorologicznych w miejscach bezpośrednio eksponowanych na promieniowanie słoneczne, co jest trudniejsze do uchwycenia w danych o stosunkowo niskiej rozdzielczości przestrzennej. Jednocześnie różnica w wyjaśnionej wariancji pomiędzy typami ekspozycji wyniosła jedynie 1,3%, co wskazuje, że ERA5-HEAT mogła zostać wykorzystana jako użyteczne tło odniesienia do analiz lokalnych warunków biometeorologicznych.

A Wszystkie punkty





Rycina 12. Wykresy rozrzutu wartości UTCI z pomiarów in situ i ERA5-HEAT: wszystkie punkty pomiarowe (A), punkty w słońcu (B), punkty w cieniu (C).

Źródło: opracowanie własne na podstawie ryc. 3, artykuł III.

Analiza uogólnionych modeli addytywnych wykazała istotny wpływ parametrów opisujących roślinność na lokalne odchylenia UTCI względem danych referencyjnych (ryc. 13) (str. 8-10, akapity 7-10). Wskaźniki związane z obecnością i strukturą terenów zieleni były konsekwentnie związane z ograniczeniem obciążeń termicznych. Siła tych zależności różniła się jednak w poszczególnych porach roku i analizowanych skalach przestrzennych. Uzyskane wyniki są zgodne z dotychczasowym stanem wiedzy, który wskazuje, że roślinność wpływa na lokalne warunki biometeorologiczne modyfikując pole wiatru, temperaturę i wilgotność powietrza oraz dopływ promieniowania słonecznego (Lindberg i Grimmond, 2011; Fu i in., 2022; Ma i in., 2025). Spośród analizowanych wskaźników udział terenów biologicznie czynnych oraz ulepszony wskaźnik roślinności wykazywały istotny wpływ na lokalne wartości UTCI jedynie wiosną oraz w analizie obejmującej cały sezon wegetacyjny, natomiast znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności pozostawał istotny również latem (RBVA: ujemny efekt przy wzroście o 10 pp.; od 0,5 °C do 0,6 °C; NDVI: ujemny efekt przy wzroście o 0,1 jednostki; od 0,8 °C do 0,9 °C; EVI: ujemny efekt przy wzroście o 0,1 jednostki; od 0,7 °C do 1,2 °C) (ryc. 13). Uzyskane wyniki są zgodne z badaniami Petralli i in. (2014) oraz Lindner-Cendrowskiej i in. (2025), wskazującymi, że choć wskaźniki dwuwymiarowe mogą dobrze opisywać relacje z temperaturą powietrza, ich przydatność w ocenie obciążeń termicznych człowieka pozostaje znacznie ograniczona. W niniejszym badaniu stabilne sezonowo zależności obserwowano dla

parametrów opisujących strukturę drzewostanu. Wzrost ELAI i TCD powodował systematyczne zmniejszanie wartości lokalnego UTCI względem danych referencyjnych, co wskazuje na wysoką skuteczność gęstych i rozległych koron drzew w ograniczaniu stresu cieplnego (TCD: ujemny efekt przy wzroście o 10 pp.; od 0,3 °C do 1,1 °C; ELAI: ujemny efekt przy wzroście o 1 jednostkę; od 0,7 °C do 1,7 °C). TCD był również jedynym wskaźnikiem rozpatrywanym w różnych skalach przestrzennych (strefy buforowe o promieniu 10 m, 50 m i 100 m), który wykazał istotne statystycznie zależności zarówno w mikroskali, jak i w skali lokalnej we wszystkich analizowanych sezonach (ryc. 14). Wyniki te potwierdzają wcześniejsze obserwacje wskazujące na fundamentalną rolę zacienienia jako jednego z najważniejszych mechanizmów łagodzenia obciążeń termicznych w przestrzeni miejskiej (Rahman i in., 2020; Lehnert i in., 2021; Guo i in., 2023; Lindberg i in., 2025).

Wpływ roślinności w artykule III został dodatkowo potwierdzony w analizie jakościowej (ryc. 13). Obecność skupisk drzew (kategoria TC w VEG_{gen}) w porównaniu z otwartymi trawnikami powodowała zmniejszenie UTCI_{diff} od 2,1 °C jesienią do 5,7 °C latem. Jeszcze silniejszy efekt stwierdzono dla gęstego, wysokiego drzewostanu z obecnością podszytu (kategoria TC_B w VEG_{spec}), gdzie redukcja lokalnego UTCI osiągała nawet 7,2 °C. Uzyskane wyniki są zgodne z dotychczasowym stanem wiedzy wskazującym, że zwarte skupiska drzew mogą skutecznie ograniczać obciążenia cieplne poprzez jednoczesne oddziaływanie procesów zacienienia, ewapotranspiracji oraz lokalnej modyfikacji pola wiatru (Lee i in., 2016; Lehnert i in., 2021; Nie i in., 2024). Należy jednak podkreślić, że obserwowane zależności odnoszą się do warunków dziennych. W godzinach nocnych zwarte korony drzew mogą ograniczać wypromieniowanie długofalowe i utrudniać wychładzanie terenu, podczas gdy otwarte powierzchnie trawiaste sprzyjają efektywniejszemu chłodzeniu radiacyjnemu (Jurek i in., 2025).

Parki miejskie to enklawy zieleni osadzone w tkance obszarów zurbanizowanych, ale ich środowisko termiczne jest kształtowane także przez cechy otaczającej zabudowy oraz arterii komunikacyjnych (Chan i Chau, 2021; Liang i in., 2023).

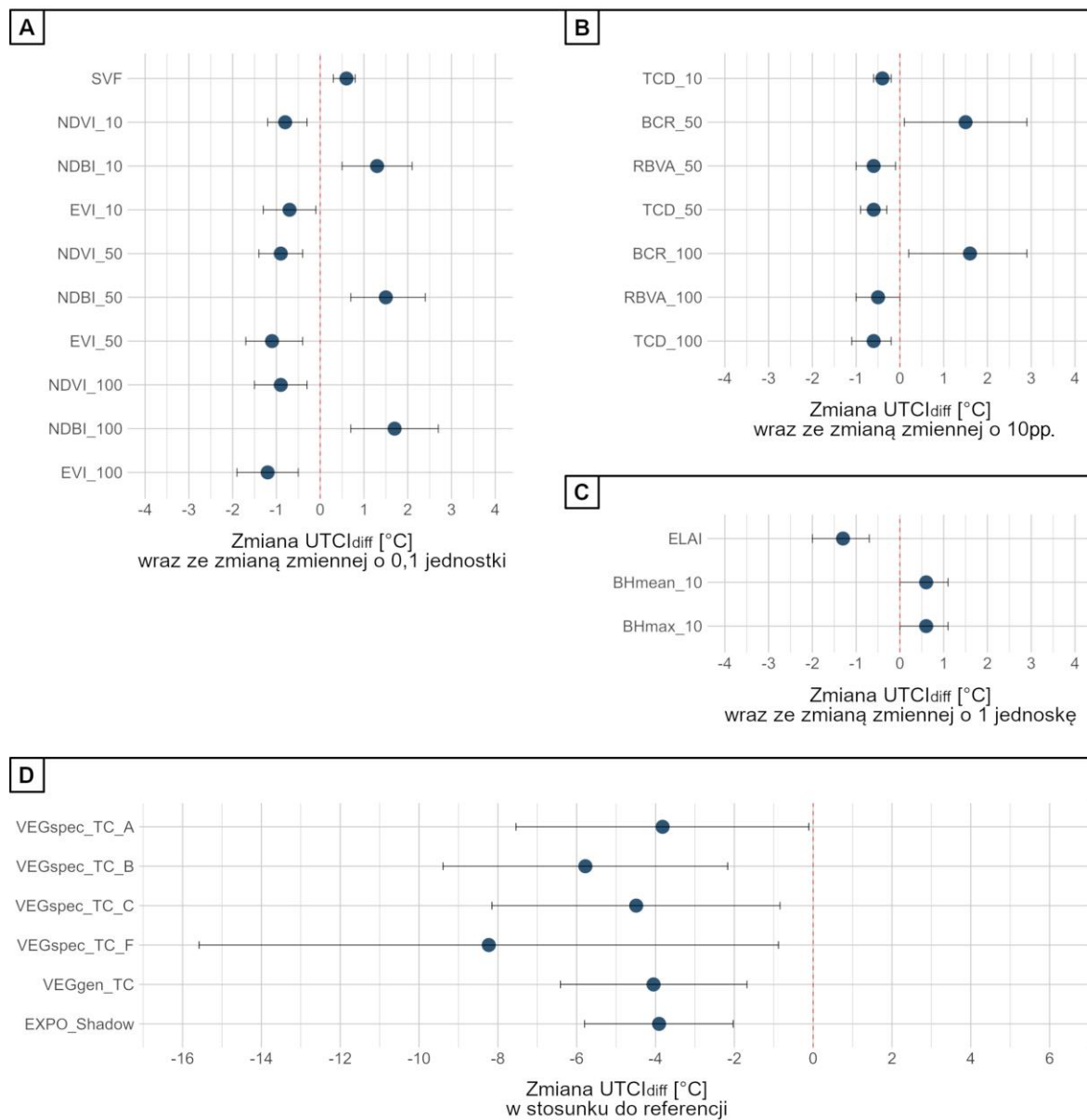
Ponadto w parkach występują pojedyncze budowle, place zabaw, altany, pergole i utwardzone ścieżki, zatem można obliczyć dla nich wskaźniki opisujące zabudowę oraz powierzchnie sztuczne. W niniejszej rozprawie, jedynym wskaźnikiem obliczonym dla parków, a bezpośrednio związanym z zabudową i powierzchniami nieprzepuszczalnymi, który wykazał statystycznie istotny wpływ na UTCI we wszystkich analizowanych porach roku, był znormalizowany różnicowy wskaźnik zabudowy (ryc. 13, 14) (str. 8-11, akapity 7-9 i 11). Jego wartości wskazywały na wzrost $UTCI_{diff}$ od 0,7 °C jesienią do 2,6 °C latem przy zwiększeniu wartości predyktora o 0,1 jednostki (ryc. 13). Skala przestrzenna, w której obserwowano najsilniejszy efekt tego wskaźnika, różniła się pomiędzy sezonami – jesienią największy wpływ odnotowano dla strefy buforowej o promieniu 10 m dookoła punktu pomiarowego, wiosną i latem dla 50 m, natomiast dla całego sezonu wegetacyjnego dla buforu o promieniu 100 m. Rezultaty potwierdzają szczególne znaczenie pokrycia terenu oraz właściwości materiałów powierzchniowych w intensyfikacji stresu cieplnego (Mahmoud, 2011; Petralli i in., 2020), podkreślając potrzebę świadomego kształtowania udziału powierzchni sztucznych podczas projektowania infrastruktury parkowej od mikroskali do skali lokalnej.

Pozostałe analizowane wskaźniki morfologii miejskiej w artykule III wykazywały zależności jedynie sporadycznie, jednocześnie wskaźnik intensywności zabudowy nie osiągnął istotności statystycznej w żadnej z analizowanych skal przestrzennych i czasowych (ryc. 13). Gęstość zabudowy obliczona dla lokalnego kontekstu przestrzennego (bufor o promieniu 100 m) wykazała istotny wpływ w całym sezonie wegetacyjnym oraz wiosną, zwiększając $UTCI_{diff}$ do 1,5 °C przy wzroście wartości wskaźnika o 10 punktów procentowych. Wynik ten może wskazywać na większe znaczenie szerszego kontekstu przestrzennego w okresach, gdy kontrasty termiczne w mieście są mniejsze, a pokrywa liściowa nie osiągnęła jeszcze pełnego rozwoju. Miary uwzględniające tylko wymiar pionowy zwiększały $UTCI_{diff}$ jedynie w najbliższym otoczeniu punktu pomiarowego (promień 10 m) w całym okresie wegetacyjnym, podczas gdy w poszczególnych porach roku nie były istotne

statystycznie. Uzyskane zależności są zgodne z wcześniejszymi badaniami dotyczącymi obciążeń termicznych zarówno w parkach miejskich (Yan i in., 2025), jak i na obszarach zabudowy mieszkaniowej (Lindner-Cendrowska i in., 2025). Należy jednak podkreślić, że otoczenie badanych lokalizacji charakteryzowało się stosunkowo niewielkim udziałem zabudowy, co mogło ograniczać wpływ miar morfologii miejskiej nawiązujących do budynków w zastosowanych modelach. W związku z tym uzyskane wyniki należy interpretować ostrożnie i nie powinny być bezpośrednio odnoszone do obszarów o zwartej i intensywnej zabudowie.

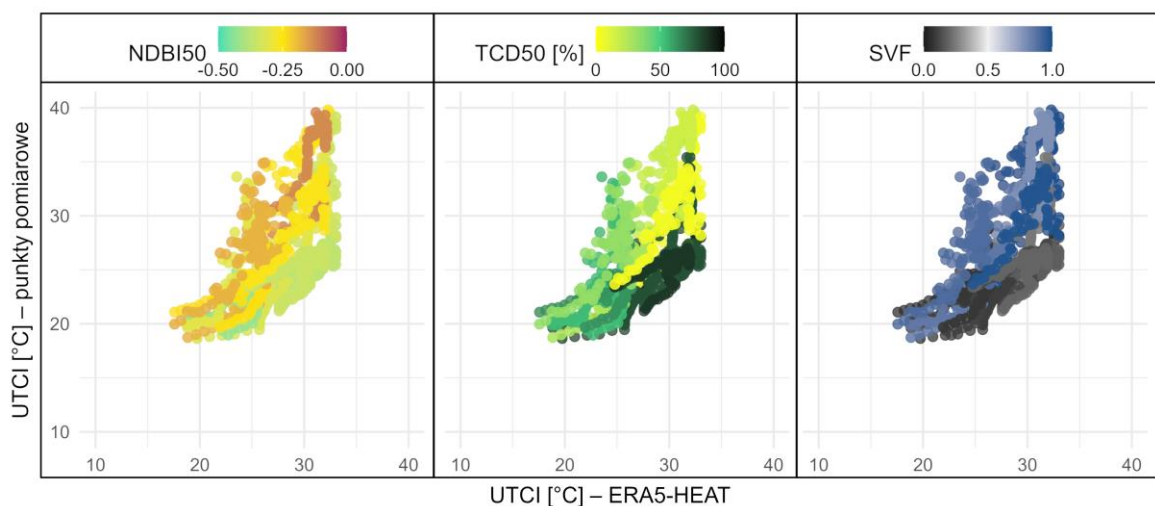
Oprócz wskaźników związanych ze strukturą roślinności i zabudowy, istotną rolę w kształtowaniu lokalnych warunków biometeorologicznych odgrywa zasłonięcie horyzontu i ekspozycja na promieniowanie słoneczne (Petralli i in., 2020; Fan i in., 2022; Q. Wang i in., 2025), co znalazło potwierdzenie również w niniejszej rozprawie (str. 8-11, akapity 7-9 i 12). Zarówno SVF, jak i EXPO należały do najbardziej stabilnych w czasie predyktorów lokalnych odchyłań UTCI, wykazując silny wpływ w różnych porach roku w trakcie okresu wegetacyjnego (ryc. 13, 14). Lokalizacje w pełnym słońcu charakteryzowały się wyższymi wartościami $UTCI_{diff}$ w porównaniu z punktami badawczymi w cieniu (dodatni efekt od 2,2 °C jesienią do 5,4 °C latem). Podobne zależności zaobserwowano w przypadku SVF – wraz ze wzrostem współczynnika widoku nieba o 0,1 jednostki, wartości $UTCI_{diff}$ zwiększały się od 0,4 °C jesienią do 0,7 °C wiosną i latem. Uzyskane rezultaty są zgodne z wynikami badań Mahmoud'a (2011) prowadzonych na terenach parków miejskich w klimacie gorącym i suchym, Shata i in. (2021) w warunkach letnich na obszarach kampusów uniwersyteckich oraz Lindner-Cendrowskiej i in. (2025) w nowoczesnej dzielnicy mieszkaniowej. Wyniki te wskazują, że w warunkach bezchmurnego nieba zacienienie – zarówno przez drzewa, jak i elementy zabudowy – pozostaje jednym z najskuteczniejszych mechanizmów ograniczania stresu termicznego (Middel i in., 2021; Lindner-Cendrowska i in., 2025). Jest to szczególnie istotne w kontekście postępującej zmiany klimatu i coraz częstszych fal upałów występujących również w sezonach przejściowych, kiedy niepełne

ulistnienie może zwiększać wartości SVF i ograniczać potencjał chłodzący parków miejskich.



Rycina 13. Wpływ zmiennych środowiska miejskiego na stres termiczny dla całego okresu badawczego, przedstawiony jako zmiana UTCI przy wzroście predyktorów: (A) o 0,1 jednostki, (B) o 10 pp., (C) o 1 jednostkę oraz (D) względem kategorii referencyjnej.

Źródło: opracowanie własne na podstawie ryc. 5, artykuł III.



Rycina 14. Wykresy rozrzutu wartości UTCI z pomiarów in situ i ERA5-HEAT dla wybranych wskaźników w sezonie letnim.

Źródło: opracowanie własne na podstawie ryc. 6, artykuł III.

Uzyskane wyniki potwierdziły hipotezę badawczą, wykazując, że warunki biotermiczne były kształtowane przez pokrycie terenu i lokalne zagospodarowanie przestrzenne oraz zależały od kombinacji parametrów roślinności, zabudowy i ekspozycji na promieniowanie słoneczne. Jednocześnie wykazano, że tereny zieleni miejskiej nie stanowiły jednorodnych „oaz chłodu”, a obciążenia termiczne człowieka zależały od struktury wewnętrznej parku oraz jego otoczenia. Siła poszczególnych efektów zmieniała się sezonowo oraz w zależności od skali przestrzennej badań. Wskazuje to na potrzebę bardziej kompleksowego podejścia do planowania rozwiązań opartych na zielonej infrastrukturze w procesie adaptacji miast do zmiany klimatu.

5. Podsumowanie

Głównym celem niniejszej rozprawy doktorskiej było określenie wpływu struktury środowiska miejskiego na kształtowanie lokalnych warunków termicznych i biotermicznych w różnych skalach przestrzennych i czasowych. Cele rozprawy zrealizowano na przykładzie m.st. Warszawy, reprezentatywnego obszaru miejskiego umiarkowanej strefy klimatycznej. W badaniach zastosowano podejście wieloskalowe, obejmujące zarówno zróżnicowanie czasowe (od analiz poszczególnych miesięcy, przez okres wegetacyjny, po analizy wieloletnie), jak i przestrzenne (od samych punktów pomiarowych, przez ich otoczenie w postaci stref buforowych o promieniach 10 m, 50 m i 100 m, aż po skalę całego miasta). Takie podejście umożliwiło kompleksową ocenę zależności oraz identyfikację relacji niewidocznych przy wykorzystaniu pojedynczych źródeł danych lub jednej skali analizy. Szczególną uwagę poświęcono parametryzacji środowiska miejskiego z wykorzystaniem wskaźników odnoszących się zarówno do miar stosowanych w dokumentach planistycznych, jak i wskaźników powszechnie wykorzystywanych w badaniach klimatu miasta. Podejście to miało na celu nie tylko ocenę zależności między zagospodarowaniem przestrzennym a lokalnymi warunkami termicznymi i biotermicznymi, ale również określenie potencjalnej przydatności analizowanych wskaźników w procesie planowania przestrzennego oraz zwiększenie możliwości wykorzystania wyników badań w praktyce.

Realizując poszczególne cele szczegółowe rozprawy (patrz str. 21), uzyskano następujące najważniejsze wyniki:

- (1) Spośród analizowanych cech użytkowania terenu najsilniejsze związki z charakterystykami temperatury powietrza podczas okresów szczególnie gorących wykazywał wskaźnik terenów biologicznie czynnych (RBVA), zwłaszcza w odniesieniu do wartości średnich i minimalnych.
- (2) W przypadku wskaźników opisujących zabudowę, najsilniejsze zależności z charakterystykami temperatury powietrza w miesiącach upalnych

wykazywały wskaźnik intensywności zabudowy (FAR) oraz maksymalna wysokość budynków (BH_{max}).

- (3) Dla większości analizowanych wskaźników skala lokalna (strefa buforowa o promieniu 100 m wokół punktu pomiarowego) okazała się najlepsza do oceny wpływu otoczenia na temperaturę powietrza. Wskaźniki zagospodarowania przestrzennego obliczone dla strefy do 10 m od stacji pomiarowych jedynie sporadycznie wykazywały istotne relacje z charakterystykami termicznymi.
- (4) Termiczne „hot spoty” (THS) i „cold spoty” (TCS) obejmowały ponad połowę analizowanego obszaru miasta. Zjawiska te występowały głównie w postaci izolowanych płatów, natomiast TCS często tworzyły również struktury o charakterze liniowym.
- (5) TCS najczęściej występowały na obszarach gęsto zadrzewionych, natomiast THS dominowały przede wszystkim na terenach zabudowy przemysłowej. Zaobserwowano również odstępstwa od dominujących wzorców, przejawiające się występowaniem termicznych „hot spotów” na terenach leśnych oraz termicznych „cold spotów” wśród gęstej zabudowy.
- (6) Zarówno wskaźniki związane z roślinnością, jak i zabudową wykazywały istotne relacje z występowaniem termicznych „hot spotów” i „cold spotów” (THCS). W przypadku THS najsilniejsze związki obserwowano z FAR oraz RBVA, podczas gdy wskaźniki odnoszące się wyłącznie do wysokości budynków nie wykazywały istotnych statystycznie zależności. W TCS najsilniejsze relacje stwierdzono z FAR i gęstością zabudowy (BCR).
- (7) Częstość THS nie wykazywała zależności istotnych statystycznie od analizowanych rocznych charakterystyk temperatury powietrza, podczas gdy występowanie TCS związane było jedynie ze średnią roczną temperaturą minimalną. Wyniki te wskazują, że częstość THS nie była związana z najwyższymi wartościami temperatury powietrza, natomiast w przypadku TCS nie obserwowano jednoznacznej zgodności wskazującej na chłodniejsze warunki termiczne.

- (8) Punkty o różnej częstotliwości THCS miały odmienny dobowy reżim termiczny zarówno w skali całego roku, jak i w sezonie letnim oraz zimowym. Różnice dotyczyły nie tylko wielkości kontrastów termicznych między grupami, lecz także kierunku tych zależności, zmieniającego się w zależności od pory dnia.
- (9) Baza danych reanalizy klimatycznej ERA5-HEAT może stanowić wartościowe tło odniesienia dla badań miejskich obciążeń termicznych, umożliwiając identyfikację odchylen uniwersalnego wskaźnika obciążeń termicznych człowieka (UTCI) wyznaczanego na podstawie lokalnych danych pomiarowych. Pomiar in situ wskazywały jednak na wyższy poziom stresu termicznego niż dane ERA5-HEAT, szczególnie w warunkach silnej ekspozycji na promieniowanie słoneczne.
- (10) Gęsty drzewostan okazał się jednym z najsilniejszych predyktorów odchylen UTCI, redukując jego lokalne wartości o ponad 7,0 °C. Zgodny kierunek oraz istotność statystyczna efektów wskaźników parametryzujących zieleni miejską podkreślają znaczenie kondycji i struktury roślinności, a także gęstości liści i pokrycia koronami drzew w łagodzeniu stresu termicznego.
- (11) Znormalizowany różnicowy wskaźnik zabudowy (NDBI) jako jedyny spośród analizowanych wskaźników zagospodarowania opisujących powierzchnie sztuczne wykazywał statystycznie istotne zależności w różnych porach roku w trakcie sezonu wegetacyjnego, powodując lokalne zwiększenie UTCI o 2,6 °C. Wyniki te wskazują, że na warunki biotermiczne analizowanych terenów zieleni wpływa zarówno infrastruktura parkowa, jak i zagospodarowanie ich bezpośredniego otoczenia.
- (12) Ekspozycja na słońce oraz współczynnik widoku nieba (EXPO, SVF) należały do najbardziej stabilnych predyktorów lokalnego zróżnicowania UTCI, podkreślając znaczenie zacienienia i dostępności promieniowania słonecznego w kształtowaniu warunków biotermicznych.
- (13) Siła zależności między zagospodarowaniem przestrzennym a UTCI różniła się w zależności od skali przestrzennej i czasowej, przy czym parametry środowiska

odnoszące się do najbliższego otoczenia punktów pomiarowych (strefa buforowa o promieniu 10 m) najrzadziej wykazywały istotny statystycznie wpływ na wartości lokalnego UTCI.

Uzyskane wyniki potwierdziły hipotezę testowaną w ramach prowadzonych badań, wskazując, że wpływ środowiska miejskiego na lokalne warunki termiczne i biotermiczne ma charakter złożony, często nieliniowy oraz jest silnie uwarunkowany skalą przestrzenną i czasową analiz. Jednocześnie relacje te różnią się w zależności od parametrów uwzględnianych przez poszczególne wskaźniki zagospodarowania oraz analizowanego aspektu środowiska termicznego. Przeprowadzone badania wskazują również, że dobór metod badawczych oraz działań adaptacyjnych powinien być ściśle uzależniony od celu ich prowadzenia, w szczególności, gdy intencją jest poprawa komfortu termicznego człowieka. W takim przypadku powszechnie stosowane wskaźniki zagospodarowania przestrzennego oraz najłatwiej dostępne źródła danych termicznych (zobrazowania satelitarne, stacje pomiarowe WMO) nie zawsze pozwalają na trafną identyfikację elementów środowiska wymagających interwencji, właściwe określenie skali podejmowanych działań ani wiarygodną ocenę ich skuteczności. W związku z tym zasadne wydaje się rozszerzenie zestawu narzędzi wykorzystywanych w dokumentach planistycznych o wskaźniki lepiej opisujące złożony wpływ morfologii miejskiej na lokalne warunki termiczne. Szczególnie istotne znaczenie mogą mieć parametry opisujące strukturę i kondycję roślinności oraz zdolność środowiska miejskiego do zapewnienia zacienienia i ograniczania ekspozycji na promieniowanie słoneczne. Uwzględnienie tego typu miar w procesach planistycznych i projektowych może zwiększyć skuteczność działań adaptacyjnych ukierunkowanych na budowanie odporności miast na skutki zmiany klimatu oraz poprawę jakości życia mieszkańców.

6. Spis tabel i rycin

Tabela 1. Charakterystyka danych termicznych w artykule I	30
Tabela 2. Charakterystyka danych termicznych w artykule II.....	31
Tabela 3. Charakterystyka danych biotermicznych w artykule III.....	32
Tabela 4. Zestawienie wykorzystanych wskaźników przestrzennych	34
Rycina 1. Zasięg obszaru badawczego i lokalizacja punktów pomiarowych.	23
Rycina 2. Średnia dobową temperatura powietrza na stacji Warszawa-Okęcie w latach 1995-2024 oraz średnie miesięczne wartości temperatury powietrza w wieloleciu.....	25
Rycina 3. Pokrycie terenu Warszawy wg klasyfikacji CORINE Land Cover (A) oraz typów lokalnych stref klimatycznych (B) z wykluczeniem obszarów, których pokrycie terenu uległo zmianie w latach 2000-2018.....	28
Rycina 4. Schemat graficzny artykułu I.	42
Rycina 5. Macierz korelacji pomiędzy charakterystykami termicznymi a wskaźnikami zagospodarowania przestrzennego.	43
Rycina 6. Model liniowy (A) i najlepiej dopasowany alternatywny model krzywoliniowy (B) dla relacji minimalnej temperatury powietrza w sierpniu 2015 r. ze wskaźnikiem intensywności zabudowy dla buforu o promieniu 100 m od punktu pomiarowego.....	46
Rycina 7. Schemat graficzny artykułu II.	47
Rycina 8. Częstość termicznych „hot spotów” (A) i „cold spotów” (B) w Warszawie.	49
Rycina 9. Częstość termicznych „hot spotów” (A, C) i „cold spotów” (B, D) w poszczególnych typach CORINE Land Cover (A, B) i Lokalnych Stref Klimatycznych (C, D).	52
Rycina 10. Macierz korelacji pomiędzy częstością THCS a wskaźnikami zagospodarowania przestrzennego (A) oraz charakterystykami temperatury powietrza (B).	52
Rycina 11. Schemat graficzny artykułu III.....	54
Rycina 12. Wykresy rozrzutu wartości UTCI z pomiarów in situ i ERA5-HEAT: wszystkie punkty pomiarowe (A), punkty w słońcu (B), punkty w cieniu (C).	56
Rycina 13. Wpływ zmiennych środowiska miejskiego na stres termiczny dla całego okresu badawczego, przedstawiony jako zmiana UTCI przy wzroście predyktorów: (A) o 0,1 jednostki, (B) o 10 pp., (C) o 1 jednostkę oraz (D) względem kategorii referencyjnej.	60
Rycina 14. Wykresy rozrzutu wartości UTCI z pomiarów in situ i ERA5-HEAT dla wybranych wskaźników w sezonie letnim.....	61

7. Bibliografia

- Ai, X., Zheng, X., Zhang, Y., Liu, Y., Ou, X., Xia, C., Liu, L. 2024. *Climate and land use changes impact the trajectories of ecosystem service bundles in an urban agglomeration: Intricate interaction trends and driver identification under SSP-RCP scenarios*. *Science of The Total Environment*, 944, 173828. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173828>.
- Alcoforado, M.-J., Andrade, H., Lopes, A., Vasconcelos, J. 2009. *Application of climatic guidelines to urban planning: The example of Lisbon (Portugal)*. *Landscape and Urban Planning*, 90(1), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.006>.
- Apreda, C., Reder, A., Mercogliano, P. 2020. *Urban morphology parameterization for assessing the effects of housing blocks layouts on air temperature in the Euro-Mediterranean context*. *Energy and Buildings*, 223, 110171. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110171>.
- Arnfield, A. 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(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>.
- Atlas ekofizjograficzny m.st. Warszawy*. 2018. Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego.
- Bandoła, D. 2020. *Modelowanie przepływu ciepła w tkankach organizmu ludzkiego*. [W:] *Współczesne Problemy Ochrony Środowiska i Energetyki* 2019. Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, Politechnika Śląska.
- Bartasaghi Koc, C., Osmond, P., Peters, A. 2018. *Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources*. *Solar Energy*, 166, 486–508. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.008>.
- Beele, E., Aerts, R., Reyniers, M., Somers, B. 2024. *Spatial configuration of green space matters: Associations between urban land cover and air temperature*. *Landscape and Urban Planning*, 249, 105121. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105121>.
- Beele, E., Aerts, R., Reyniers, M., Van Lipzig, N., Somers, B. 2026. *Cooling efficiency of urban green spaces affected by heat, humidity and solar radiation*. *Journal of Environmental Management*, 407, 129922. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.129922>.
- Birkmann, J., Sauter, H., Garschagen, M., Fleischhauer, M., Puntub, W., Klose, C., Burkhardt, A., Götsche, F., Laranjeira, K., Müller, J., Büter, B. 2021. *New methods for local vulnerability scenarios to heat stress to inform urban planning—Case study City of Ludwigsburg/Germany*. *Climatic Change*, 165(1), 37. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03005-3>.
- Błażejczyk, A., Błażejczyk, K., Baranowski, J., Kuchcik, M. 2018. *Heat stress mortality and desired adaptation responses of healthcare system in Poland*. *International Journal of Biometeorology*, 62(3), 307–318. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1423-0>.
- Błażejczyk, K. 2002. *Znaczenie czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej*. CBGiOŚ. IGiPZ PAN, 26, 161.233. Warszawa.
- Błażejczyk, K., Błażejczyk, A. 2023. *Zmiana klimatu i ich wpływ na budownictwo i komfort życia mieszkańców miast, przykład Warszawy*. *Przegląd Geofizyczny*, Z. 1-2. <https://doi.org/10.32045/PG-2023-036>.

- Błażejczyk, K., Błażejczyk, A., Kuchcik, M., Milewski, P., Szmyd, J. 2014. *Zmiany zagospodarowania Warszawy według... Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego i ich możliwy wpływ na warunki mikroklimatyczne i jakość życia mieszkańców*. *Studia Regionalne i Lokalne*, 2(56), 95–118. <https://doi.org/10.7366/1509499525605>.
- Błażejczyk, K., Kuchcik, M., Milewski, P., Dudek, W., Kręcisz, B., Błażejczyk, A., Szmyd, J., Degórska, B., Pałczyński. 2014. *Miejska wyspa ciepła w Warszawie: Uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne*. Wydawnictwo Akademickie SEDNO, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa.
- Błażejczyk, K., Kunert, A. (Red.). 2011. *Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce* (Wydanie 2. poprawione i uzupełnione). Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN im. Stanisława Leszczyckiego.
- Błażejczyk, K., Twardosz, R., Wałach, P., Czarnecka, K., Błażejczyk, A. 2022. *Heat strain and mortality effects of prolonged central European heat wave — An example of June 2019 in Poland*. *International Journal of Biometeorology*, 66(1), 149–161. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02202-0>.
- Bokwa, A. 2019. *Rozwój badań nad klimatem lokalnym Krakowa*. *Acta Geographica Lodziensia*, 108, 7–20. <https://doi.org/10.26485/AGL/2019/108/1>.
- Brandsma, S., Lenzholzer, S., Carsjens, G. J., Brown, R. D., Tavares, S. 2024. *Implementation of urban climate-responsive design strategies: An international overview*. *Journal of Urban Design*, 29(5), 598–623. <https://doi.org/10.1080/13574809.2024.2314760>.
- Bröde, P., Błażejczyk, K., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kuklane, K., Kampmann, B. 2013. *The Universal Thermal Climate Index UTCI Compared to Ergonomics Standards for Assessing the Thermal Environment*. *Industrial Health*, 51(1), 16–24. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2012-0098>.
- 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>.
- Brzeziński, K., Jurczak, T., Rzeńca, A., Fortuniak, K., Wasiak, A., Krauze, K., Wójcik, S., Sobol, A., Tokarski, D., Biskupski, J., Burlińska, A. 2024. *Spółeczny udział w tworzeniu miejskiej polityki klimatycznej: Przykład Łodzi*. *Interdyscyplinarne Studia Miejskie*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego. <https://doi.org/10.18778/8331-450-1>.
- Cao, J., Zhou, W., Zheng, Z., Ren, T., Wang, W. 2021. *Within-city spatial and temporal heterogeneity of air temperature and its relationship with land surface temperature*. *Landscape and Urban Planning*, 206, 103979. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103979>.
- Chan, S. Y., Chau, C. K. 2021. *On the study of the effects of microclimate and park and surrounding building configuration on thermal comfort in urban parks*. *Sustainable Cities and Society*, 64, 102512. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102512>.
- Chen, J., Jin, S., Du, P. 2020. *Roles of horizontal and vertical tree canopy structure in mitigating daytime and nighttime urban heat island effects*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 89, 102060. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102060>.

- Chen, R., Wang, C., Que, X., Liao, F. H., Ma, X., Wang, Z., Li, Z., Wen, K., Lai, Y., Xu, X. 2024. *Exploring Urban Heat Distribution and Thermal Comfort Exposure Using Spatiotemporal Weighted Regression (STWR)*. *Buildings*, 14(6), Article 6.
<https://doi.org/10.3390/buildings14061883>.
- Chen, Y., Wang, Y., Luo, X., Pei, L., Li, W. 2025. *Nonlinear force analysis of urban morphology and building heat emission based on multi-scale microclimate prediction*. *Energy and Buildings*, 346, 116146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116146>.
- Cheng, H., Han, Y., Park, C. 2025. *Quantitative analysis of differences in cooling effect and efficiency after changes in Green Infrastructure Types (GIT)*. *Sustainable Cities and Society*, 119, 106101. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.106101>.
- Cheung, P. K., Jim, C. Y. 2019. *Effects of urban and landscape elements on air temperature in a high-density subtropical city*. *Building and Environment*, 164, 106362.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106362>.
- Cheung, P. K., Jim, C. Y., Siu, C. T. 2021. *Effects of urban park design features on summer air temperature and humidity in compact-city milieu*. *Applied Geography*, 129, 102439.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102439>.
- Cheung, P. K., Meili, N., Nice, K. A., Livesley, S. J. 2024. *Identifying the mechanisms by which irrigation can cool urban green spaces in summer*. *Urban Climate*, 55, 101914.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101914>.
- Cheval, S., Amihăesei, V.-A., Chitu, Z., Dumitrescu, A., Falcescu, V., Iraşoc, A., Micu, D. M., Mihuleţ, E., Ontel, I., Paraschiv, M.-G., Tudose, N. C. 2024. *A systematic review of urban heat island and heat waves research (1991–2022)*. *Climate Risk Management*, 44, 100603.
<https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100603>.
- Cheval, S., Micu, D., Dumitrescu, A., Irimescu, A., Frighenciu, M., Iojă, C., Tudose, N. C., Davidescu, Şerban, Antonescu, B. 2020. *Meteorological and Ancillary Data Resources for Climate Research in Urban Areas*. *Climate*, 8(3), Article 3.
<https://doi.org/10.3390/cli8030037>.
- Chief Inspectorate for Environmental Protection. *Corine Land Cover 2018* [Dataset]. Dostęp: 1.05.2024 r.-a, <https://clc.gios.gov.pl/index.php/clc-2018/udostepnianie>.
- Chief Inspectorate for Environmental Protection. *Corrected database CORINE Land Cover 2000* [Dataset]. Dostęp: 1.08.2024 r.-b,
<https://clc.gios.gov.pl/index.php/clc-2006/udostepnianie>.
- Chojnacki, J. 1991. *Zróżnicowanie przestrzenne roślinności Warszawy*. Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego. Warszawa.
- Crawford, B., Grimmond, C. S. B., Ward, H. C., Morrison, W., Kotthaus, S. 2017. *Spatial and temporal patterns of surface–atmosphere energy exchange in a dense urban environment using scintillometry*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(703), 817–833.
<https://doi.org/10.1002/qj.2967>.
- Das, S., Choudhury, M. R., Chatterjee, B., Das, P., Bagri, S., Paul, D., Bera, M., Dutta, S. 2024. *Unraveling the urban climate crisis: Exploring the nexus of urbanization, climate change, and their impacts on the environment and human well-being – A global perspective*. *AIMS Public Health*, 11(3), 963–1001. <https://doi.org/10.3934/publichealth.2024050>.

- Dąbrowska-Zielińska, K., Gurdak, R., Grzybowski, P., Olszewski, D. 2019. *Opracowanie końcowe określające stan ekosystemu m.st. Warszawy w kontekście zmian klimatu w ramach projektu LIFE_ADAPTCTY_PL*. Instytut Geodezji i Kartografii, Centrum Teledetekcji, Warszawa.
- Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I. D., van Vliet, J., Bechtel, B. 2022. *A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science*. *Earth System Science Data*, 14(8), 3835–3873. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022>.
- Di Napoli, C., Barnard, C., Prudhomme, C., Cloke, H. L., Pappenberger, F. 2020. *Thermal comfort indices derived from ERA5 reanalysis* [Dataset]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.553b7518>.
- Di Napoli, C., Barnard, C., Prudhomme, C., Cloke, H. L., Pappenberger, F. 2021. *ERA5-HEAT: A global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis*. *Geoscience Data Journal*, 8(1), 2–10. <https://doi.org/10.1002/gdj3.102>.
- Diagnoza m.st. Warszawy. Demografia*. Urząd m.st. Warszawy. Dostęp: 17.05.2026 r., https://um.warszawa.pl/documents/56602/123223502/16_DEMOGRAFIA.pdf/6e695dfd-d2bd1-844e-5c96-cb0dec2af1d1?t=1742383774270.
- D'Ippoliti, D., Michelozzi, P., Marino, C., de'Donato, F., Menne, B., Katsouyanni, K., Kirchmayer, U., Analitis, A., Medina-Ramón, M., Paldy, A., Atkinson, R., Kovats, S., Bisanti, L., Schneider, A., Lefranc, A., Iñiguez, C., Perucci, C. A. 2010. *The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: Results from the EuroHEAT project*. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 9, 37. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-9-37>.
- Ebi, K. L., Capon, A., Berry, P., Broderick, C., Dear, R. de, Havenith, G., Honda, Y., Kovats, R. S., Ma, W., Malik, A., Morris, N. B., Nybo, L., Seneviratne, S. I., Vanos, J., Jay, O. 2021. *Hot weather and heat extremes: Health risks*. *The Lancet*, 398(10301), 698–708. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)01208-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)01208-3).
- El Kadri, M., De Oliveira, F., Inard, C., Demouge, F. 2020. *New neurophysiological human thermal model based on thermoreceptor responses*. *International Journal of Biometeorology*, 64(12), 2007–2017. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01990-1>.
- Eliasson, I. 2000. *The use of climate knowledge in urban planning*. *Landscape and Urban Planning*, 48(1), 31–44. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00034-7).
- Fan, Q., Li, X., Li, H. 2022. *Crowd Gathering and Thermal Comfort Research in Different Park Shading Spaces*. *Sustainability*, 14(5), 2687. <https://doi.org/10.3390/su14052687>.
- Filipiak, J., Miętus, M. 2019. *Badania klimatu miejskiego Gdańska i Gdyni*. *Acta Geographica Lodziensia*, 108, 21–34. <https://doi.org/10.26485/AGL/2019/108/2>.
- Flynn, A., McGreevy, C., Mulkerrin, E. C. 2005. *Why do older patients die in a heatwave?* *QJM: An International Journal of Medicine*, 98(3), 227–229. <https://doi.org/10.1093/qjmed/hci025>.
- Fortuniak, K. 2001. *The influence of the thermal properties of the bedding on the intensity of the urban heat island—The model-based analysis of the nighttime cooling of the ground surface*. *Prace i Studia Geograficzne*, 29, 297–302.
- Fortuniak, K. 2019. *Badania klimatu miast w Polsce*. *Przegląd Geofizyczny*, 64(1–2), 73–105. <https://doi.org/10.32045/pg-2019-003>.

- Fortuniak, K., Pawlak, W., Podstawczyńska, A., Siedlecki, M., Wibig, J., Wilk, S. 2019. *Łódzkie badania klimatu miasta*. Acta Geographica Lodziensia, 108, 35–49.
<https://doi.org/10.26485/AGL/2019/108/3>.
- Fu, J., Wang, Y., Zhou, D., Cao, S.-J. 2022. *Impact of Urban Park Design on Microclimate in Cold Regions using newly developped prediction method*. Sustainable Cities and Society, 80, 103781. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103781>.
- Gawuc, L., Jefimow, M., Szymankiewicz, K., Kuchcik, M., Sattari, A., Struzewska, J. 2020. *Statistical Modeling of Urban Heat Island Intensity in Warsaw, Poland Using Simultaneous Air and Surface Temperature Observations*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 13, 2716–2728.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2989071>.
- Geletič, J., Lehnert, M., Dobrovolný, P. 2016. *Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities*. Remote Sensing, 8(10), Article 10.
<https://doi.org/10.3390/rs8100788>.
- Geletič, J., Lehnert, M., Savić, S., Milošević, D. 2019. *Inter-/intra-zonal seasonal variability of the surface urban heat island based on local climate zones in three central European cities*. Building and Environment, 156, 21–32.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.011>.
- Greene, C. S., Kedron, P. J. 2018. *Beyond fractional coverage: A multilevel approach to analyzing the impact of urban tree canopy structure on surface urban heat islands*. Applied Geography, 95, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.04.004>.
- Grimmond, S. 2007. *Urbanization and global environmental change: Local effects of urban warming*. The Geographical Journal, 173(1), 83–88.
https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2007.232_3.x.
- Grimmond, S., Roth, M., Oke, T. R., Au, Y. C., Best, M., Betts, R., Carmichael, G., Cleugh, H., Dabberdt, W., Emmanuel, R., Freitas, E., Fortuniak, K., Hanna, S., Klein, P., Kalkstein, L. S., Liu, C. H., Nickson, A., Pearlmutter, D., Sailor, D., Voogt, J. 2010. *Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective)*. Procedia Environmental Sciences, World Climate Conference - 3, 1, 247–274. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.016>.
- Guerri, G., Crisci, A., Congedo, L., Munafò, M., Morabito, M. 2022. *A functional seasonal thermal hot-spot classification: Focus on industrial sites*. Science of The Total Environment, 806, 151383. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151383>.
- Guerri, G., Crisci, A., Messeri, A., Congedo, L., Munafò, M., Morabito, M. 2021. *Thermal Summer Diurnal Hot-Spot Analysis: The Role of Local Urban Features Layers*. Remote Sensing, 13(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/rs13030538>.
- Guo, T., Zhao, Y., Yang, J., Zhong, Z., Ji, K., Zhong, Z., Luo, X. 2023. *Effects of Tree Arrangement and Leaf Area Index on the Thermal Comfort of Outdoor Children's Activity Space in Hot-Humid Areas*. Buildings, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/buildings13010214>.
- GUS. 2025. *Powierzchnia i ludność w przekroju terytorialnym w 2025 r.* <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/ludnosc/ludnosc/powierzchnia-i-ludnosc-w-przekroju-terytorialnym-w-2025-r-7,22.html>.

- Hajto, M. J., Walawender, J. P., Bokwa, A., Szymanowski, M. 2025. *The Impact of Heat Waves on Diurnal Variability and Spatial Structure of Atmospheric and Surface Urban Heat Islands in Kraków, Poland*. Sustainability, 17(7), 3117. <https://doi.org/10.3390/su17073117>.
- Hebbert, M. 2014. *Climatology for city planning in historical perspective*. Urban Climate, ICUC8: The 8th International Conference on Urban Climate and the 10th Symposium on the Urban Environment, 10, 204–215. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.07.001>.
- Hidalgo-García, D., Arco-Díaz, J. 2022. *Modeling the Surface Urban Heat Island (SUHI) to study of its relationship with variations in the thermal field and with the indices of land use in the metropolitan area of Granada (Spain)*. Sustainable Cities and Society, 87, 104166. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104166>.
- Holmer, B., Postgård, U., Eriksson, M. 2001. *Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI*. Theoretical and Applied Climatology, 68(1), 33–40. <https://doi.org/10.1007/s007040170051>.
- House-Peters, L. A., Chang, H. 2011. *Modeling the impact of land use and climate change on neighborhood-scale evaporation and nighttime cooling: A surface energy balance approach*. Landscape and Urban Planning, 103(2), 139–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.005>.
- Howard, L. 1833. *The Climate of London, vols. I–III*. Harvey and Dorton (Republished by IAUC).
- Huang, H., Chen, Y., Guo, W., Lu, L., Jiang, J., Lin, H., Zhang, X., Chen, S., Gao, Y. 2026. *A robust decision-support framework for urban green space planning: Integrating biophysical supply and social vulnerability for thermal resilience in a high-density city*. Urban Climate, 67, 102944. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2026.102944>.
- Huang, X., Wang, Y. 2019. *Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 152, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.010>.
- Hussain, N., Ahmed, S. M. S., Shumi, A. M. 2023. *Remote sensing-based geostatistical hot spot analysis of Urban Heat Islands in Dhaka, Bangladesh*. Singapore Journal of Tropical Geography, 44(3), 438–458. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12507>.
- IMGW-PIB. *Index of /data /dane_pomiarowo_obserwacyjne /dane_meteorologiczne /dobowe /synop* [Dataset]. Dostęp: 29.04.2026 r., <https://danepubliczne.imgw.pl/data/>.
- IPCC. 2023. *Summary for Policymakers In: 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*. [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 1–34. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.
- Jamei, Y., Rajagopalan, P., Sun, Q. (Chayn). 2019. *Spatial structure of surface urban heat island and its relationship with vegetation and built-up areas in Melbourne, Australia*. Science of The Total Environment, 659, 1335–1351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.308>.
- Janković, V. 2013. *A historical review of urban climatology and the atmospheres of the industrialized world*. WIREs Climate Change, 4(6), 539–553. <https://doi.org/10.1002/wcc.244>.

- Januchta-Szostak, A. 2020. *Błękitno-zielona infrastruktura jako narzędzie adaptacji miast do zmian klimatu i zagospodarowania wód opadowych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Architektura, Urbanistyka, 3774. <https://doi.org/10.21008/J.2658-2619.2020.3.3>.
- Jastrzębowski, W. 1841. *Wypadki dostrzeżeń meteorologicznych czynionych w Warszawie blisko przez pół wieku tj. Od 1779 do 1828 roku włącznie przez Karola Bystrzyckiego, Antoniego Magiera i przez innych, oraz uwagi nad niemi dotyczące klimatu Polski. Rzecz wypracowana r. 1829*. Biblioteka Warszawska, t. 2, 687-776.
- Jendritzky, G., de Dear, R., Havenith, G. 2012. *UTCI—Why another thermal index?* International Journal of Biometeorology, 56(3), 421–428. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>.
- Ji, L., Shu, C., Gaur, A., Wang, L., Lacasse, M. 2024. *A state-of-the-art review of studies on urban green infrastructure for thermal resilient communities*. Building and Environment, 257, 111524. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111524>.
- Jurek, M., Geletič, J., Koukalová, A., Květoňová, V., Létal, A., Lehnert, M. 2025. *Measured nighttime effect of green, blue, and grey features on thermal exposure: A pilot study in Czech cities*. Energy and Buildings, 343, 115952. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115952>.
- Kaczorowska, Z. 1967. *Opady Wielkiej Warszawy i jej okolic w okresie 1956-1960*. Przegląd Geofizyczny, 12 (3-4), 251–271.
- Kaszewski, B. M. 2019. *Badania klimatu Lublina*. Acta Geographica Lodziensia, 108, 51–61. <https://doi.org/10.26485/AGL/2019/108/4>.
- Klimat Warszawy*. 2017. Biuro Architektury i Planowania Przestrzennego w Urzędzie m.st. Warszawy. https://architektura.um.warszawa.pl/documents/12025039/22491719/klimat_broszura.pdf/b654b97c-8c88-dbf2-0168-38fa1971c4ca?t=1634497936327
- Kondracki, J. 2002. *Geografia regionalna Polski*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.
- Kossowska, U. 1973. *Osobliwości klimatu wielkomiejskiego na przykładzie Warszawy*. Prace i Studia Instytutu Geograficznego Uniwersytetu Warszawskiego. Klimatologia, 12(7), 141–185.
- Kovats, R. S., Hajat, S. 2008. *Heat Stress and Public Health: A Critical Review*. Annual Review of Public Health, 29, 41–55. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>.
- Kozłowska-Szczęsna, T., Błażejczyk, K., Krawczyk, B. 1997. *Bioklimatologia człowieka: Metody i ich zastosowanie w badaniach bioklimatu Polski = Human bioclimatology*. Monografie - Polska Akademia Nauk. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego. Warszawa.
- Kozłowska-Szczęsna, T., Kozłowska-Szczęsna, T., Krawczyk, B., Krawczyk, B., Błażejczyk, K., Błażejczyk, K. 1996. *Środowisko fizycznogeograficzne: Niektóre zagadnienia*. CBGiOŚ. IGiPZ PAN, Warszawa.
- Krayenhoff, E. S., Voogt, J. A. 2016. *Daytime Thermal Anisotropy of Urban Neighbourhoods: Morphological Causation*. Remote Sensing, 8(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/rs8020108>.
- Krüger, E., Gobo, J. P. A., Tejas, G. T., da Silva de Souza, R. M., Neto, J. B. F., Pereira, G., Mendes, D., Di Napoli, C. 2024. *The impact of urbanization on heat stress in Brazil: A multi-city study*. Urban Climate, 53, 101827. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101827>

- Krüger, E. L., Di Napoli, C. 2022. *Feasibility of climate reanalysis data as a proxy for onsite weather measurements in outdoor thermal comfort surveys*. Theoretical and Applied Climatology, 149(3), 1645–1658. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04129-x>.
- Kuchcik, M. 2006. *Pogoda w Polsce a umieralność: Współcześnie oraz w świetle prognoz zmian klimatu*. Balneologia Polska, (48.4), 239–244.
- Kuchcik, M. 2017. *Warunki termiczne w Polsce na przełomie XX i XXI wieku i ich wpływ na umieralność = Thermal conditions in Poland at the turn of the 20th and 21st centuries, and their impact on mortality*. Prace Geograficzne 263, IGiPZ PAN. Warszawa.
- 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>.
- Kuchcik, M., Czarnecka, K., Rabczenko, D. 2026. *Cooling the City of Warsaw: Thermal Insights From Vistula River Valley*. International Journal of Climatology, e70202. <https://doi.org/10.1002/joc.70202>.
- Kuchcik, M., Łączyński, M., Cieszewska, A., Adamczyk-Jabłońska, J., Giedych, R., Maksymiuk, G., Pusłowska-Tyszewska, D. 2025. *Can the serious game serve as a tool for education in founding local adaptation solutions to climate change?* Geographia Polonica, 97(4), 485–498. <https://doi.org/10.7163/GPol.0289>.
- Kuchcik, M., Szmyd, J., Błażejczyk, K., Baranowski, J. 2019. *Badania klimatu i bioklimatu miasta prowadzone w IGiPZ PAN*. Acta Geographica Lodziensia, 108, 63–77. <https://doi.org/10.26485/AGL/2019/108/5>.
- Květoňová, V., Pánek, J., Geletič, J., Šimáček, P., Lehnert, M. 2024. *Where is the heat threat in a city? Different perspectives on people-oriented and remote sensing methods: The case of Prague*. Heliyon, 10(16), e36101. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36101>.
- Lee, H., Mayer, H., Chen, L. 2016. *Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany*. Landscape and Urban Planning, 148, 37–50. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>.
- Lehnert, M., Janků, Z., Novotný, D., Jurek, M., Geletič, J. 2025. *Assessment of air temperature indices and urban heat island intensity based on two meteorological networks in Prague, Czechia*. Theoretical and Applied Climatology, 156(9), 470. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05707-5>.
- Lehnert, M., Tokar, V., Jurek, M., Geletič, J. 2021. *Summer thermal comfort in Czech cities: Measured effects of blue and green features in city centres*. International Journal of Biometeorology, 65(8), 1277–1289. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02010-y>.
- Lewińska, J. 1967. *Opady atmosferyczne w Wielkim Krakowie*. Prace Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego, 91, 19–28.
- Li, F., Yigitcanlar, T., Nepal, M., Nguyen, K., Dur, F. 2023. *Machine learning and remote sensing integration for leveraging urban sustainability: A review and framework*. Sustainable Cities and Society, 96, 104653. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104653>.
- Liang, Z., Li, Z., Fan, Z. 2023. *Seasonal impacts of built environment and its interactions on urban park cooling effects in Nanjing, China*. Building and Environment, 242, 110580. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110580>.

- Lim, C. L. 2020. *Fundamental Concepts of Human Thermoregulation and Adaptation to Heat: A Review in the Context of Global Warming*. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(21), 7795. <https://doi.org/10.3390/ijerph17217795>.
- Lindberg, F., Grimmond, C. S. B. 2011. *The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: Model development and evaluation*. Theoretical and Applied Climatology, 105(3), 311–323. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0382-8>.
- Lindberg, F., Wallenberg, N., Thorsson, S., Haeger-Eugensson, M., Lönn, J., Holmberg, B., Frid, M., Fahlström, J. 2025. *Micro-scale, city-wide analysis of outdoor thermal comfort during heatwaves in high latitude cities: Influence of building geometry and vegetation*. International Journal of Biometeorology, 69(12), 3421–3434. <https://doi.org/10.1007/s00484-025-03030-2>.
- Lindner-Cendrowska, K., Baranowski, J. 2023. *Niepewność pomiarów średniej temperatury promieniowania za pomocą termometrów kulistych = Uncertainty of mean radiant-temperature measurements using globe thermometers*. Przegląd Geograficzny, 95(3), 271–290. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2023.3.4>.
- Lindner-Cendrowska, K., Czarnecka, K., Rabczenko, D. 2025. *From regulations to reality: Testing urban planning metrics against human thermal comfort in a modern residential district*. Sustainable Cities and Society, 107011. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.107011>.
- Liu, Y., Guaralda, M., Yigitcanlar, T., Limb, M., Garcia-Hansen, V. 2025. *Navigating urban climate design implementation challenges: Insights from Brisbane's built environment experts*. Journal of Urban Design, 30(3), 275–294. <https://doi.org/10.1080/13574809.2024.2376680>.
- Ma, W., Yu, Z., Chen, J., Yang, W., Zhang, Y., Hu, Y., Shao, M., Hu, J., Zhang, Y., Zhang, H., Yang, G. 2025. *What drives the cooling dynamics of urban vegetation via evapotranspiration and shading under extreme heat?* Sustainable Cities and Society, 130, 106659. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106659>.
- Mahmoud, A. H. A. 2011. *Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions*. Building and Environment, 46(12), 2641–2656. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.025>.
- Maksymiuk, G., Giedych, R., Kuchcik, M., Łączyński, M., Pusłowska-Tyszewska, D., Adamczyk, J., Czarnecka, K., Klimaszewski, K., Cieszewska, A. 2026. *Neighborhood ecosystem services: Insights from a multi-expert assessment of nature-based solutions in Scandinavian cities*. Ecological Indicators, 186, 114820. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2026.114820>.
- Manapragada, N. V. S. K., Mandelmilch, M., Roitberg, E., Kizel, F., Natanian, J. 2025. *Remote sensing for environmentally responsive urban built environment: A review of tools, methods and gaps*. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 38, 101529. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101529>.
- Mărmureanu, L., Antonescu, B., Ene, D., Andrei, S., Turcu, R. 2025. *Changes in the thermal stress across Europe between 1940–2023*. International Journal of Biometeorology. <https://doi.org/10.1007/s00484-025-03043-x>.

- Matias, M., Lopes, A. 2020. *Surface Radiation Balance of Urban Materials and Their Impact on Air Temperature of an Urban Canyon in Lisbon, Portugal*. Applied Sciences, 10(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/app10062193>.
- Mavrakou, T., Polydoros, A., Cartalis, C., Santamouris, M. 2018. *Recognition of Thermal Hot and Cold Spots in Urban Areas in Support of Mitigation Plans to Counteract Overheating: Application for Athens*. Climate, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/cli6010016>.
- Merecki, R. 1914. *Klimatologia ziem polskich. Z zapomogi Kasy Pomocy dla Osób Pracujących im. J. Mianowskiego, 1914 (Warszawa : J. Cotty)*. Warszawa.
- Middel, A., AlKhaled, S., Schneider, F. A., Hagen, B., Coseo, P. 2021. *50 Grades of Shade*. Bulletin of the American Meteorological Society, 102(9), E1805–E1820. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0193.1>.
- Mills, G. 2006. Progress toward sustainable settlements: *A role for urban climatology*. Theoretical and Applied Climatology, 84(1), 69–76. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0145-0>.
- Mills, G. 2014. *Urban climatology: History, status and prospects*. Urban Climate, Measurement and modelling of the urban atmosphere in the present and the past, 10, 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.004>.
- Ministerstwo Środowiska. 2018. *Plany adaptacji do zmian klimaty 44 miast Polski. Publikacja podsumowująca*. IOŚ-PIB, IMGW, IETU, ARCADIS. Warszawa.
- Muhaimin, M., Adyatma, D., Fitriani, S., Arisanty, D. 2022. *Mapping build-up area density using normalized difference built-up index (ndbi) and urban index (ui) wetland in the city banjarmasin*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 1089, 4th IGEOS: International Geography Seminar 2020 29/09/2020 - 30/09/2020 Online. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1089/1/012036>.
- Naserikia, M., Hart, M. A., Nazarian, N., Bechtel, B., Lipson, M., Nice, K. A. 2023. *Land surface and air temperature dynamics: The role of urban form and seasonality*. Science of The Total Environment, 905, 167306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167306>.
- Nidzgorska-Lencewicz, J., Mąkosza, A. 2016. *Specyficzne cechy klimatu miasta w aspekcie zdrowia człowieka*. Kosmos, 65(4), 637–645.
- Nie, X., Lin, J., Ma, J., Cao, B., Li, Y., Lu, Y., Bian, Y., Liu, J., Zhang, P. 2024. *The Cooling Effect of Plant Configuration on Urban Parks Green Space in Temperate Continental Climate Zones*. Applied Spatial Analysis and Policy, 17(4), 1463–1483. <https://doi.org/10.1007/s12061-024-09590-x>.
- Offerle, B., Grimmond, S., Fortuniak, K., Pawlak, W. 2006. *Intraurban Differences of Surface Energy Fluxes in a Central European City*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 45(1), 125–136. <https://doi.org/10.1175/JAM2319.1>.
- Oke, T. R. 1973. *City size and the urban heat island*. Atmospheric Environment, 7(8), 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6).
- Oke, T. R. 1974. *Review of urban climatology 1973-1976*.
- Oke, T. R. 1988. *The urban energy balance*. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 12(4), 471–508. <https://doi.org/10.1177/030913338801200401>.
- Oke, T. R. 1997. *Urban environments*. [W:] WG Bailey i in. (Eds), *The Surface Climates of Canada*. McGill-Queen's University Press.

- Oke, T. R. 2006. *Towards better scientific communication in urban climate*. Theoretical and Applied Climatology, 84(1), 179–190. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0153-0>.
- Okołowicz, W. 1991. *Strefy klimatyczne świata*. [W:] Geograficzny atlas świata.
- Pancewicz, A., Anczykowska, W., Dąbrowska, Z., Żak, N. 2022. *Działania adaptacyjne do zmian klimatu w miastach polskich – planowanie i realizacja*. BUILDER, 305(12), 33–35. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.0923>.
- Paszyński, J., Miara, K., Skoczek, J., Paszyński, J., Skoczek, J. 1999. *Wymiana energii między atmosferą a podłożem jako podstawa kartowania topoklimatycznego*. Polska Akademia Nauk, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., McMahon, T. A. 2007. *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification*. Hydrology and Earth System Sciences, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Petralli, M., Massetti, L., Brandani, G., Orlandini, S. 2014. *Urban planning indicators: Useful tools to measure the effect of urbanization and vegetation on summer air temperatures*. International Journal of Climatology, 34(4), 1236–1244. <https://doi.org/10.1002/joc.3760>.
- Petralli, M., Massetti, L., Pearlmutter, D., Brandani, G., Messeri, A., Orlandini, S. 2020. *UTCI field measurements in an urban park in Florence (Italy)*. Miscellanea Geographica, 24(3), 111–117. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2020-0017>.
- Półrolniczak, M., Kolendowicz, L., Majkowska-Juskowiak, A. 2019. *Stan badań klimatu Poznania ze szczególnym uwzględnieniem pola temperatury i zjawiska miejskiej wyspy ciepła*. Acta Geographica Lodziensia, 108, 79–92. <https://doi.org/10.26485/AGL/2019/108/6>.
- Provençal, S., Bergeron, O., Leduc, R., Barrette, N. 2016. *Thermal comfort in Quebec City, Canada: Sensitivity analysis of the UTCI and other popular thermal comfort indices in a mid-latitude continental city*. International Journal of Biometeorology, 60(4), 591–603. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1054-2>.
- Przybylak, R., Uscka-Kowalkowska, J. 2019. *Badania klimatu miejskiego w Toruniu prowadzone przez Katedrę Meteorologii i Klimatologii UMK – zarys historii i uzyskanych wyników*. Acta Geographica Lodziensia, 108, 93–107. <https://doi.org/10.26485/AGL/2019/108/7>.
- Qi, Y., Li, X., Liu, Y., He, X., Gao, W., Miao, S. 2023. *The Influence of Block Morphology on Urban Thermal Environment Analysis Based on a Feed-Forward Neural Network Model*. Buildings, 13(2), 528. <https://doi.org/10.3390/buildings13020528>.
- Qian, Y., Zhou, W., Hu, X., Fu, F. 2018. *The Heterogeneity of Air Temperature in Urban Residential Neighborhoods and Its Relationship with the Surrounding Greenspace*. Remote Sensing, 10(6), 965. <https://doi.org/10.3390/rs10060965>.
- R Core Team. 2024. *R: A Language and Environment for Statistical Computing* [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>. [Software].
- R Core Team. 2025. *R: A Language and Environment for Statistical Computing* [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. [Software]. <https://www.R-project.org/>.

- Rahman, M. A., Stratopoulos, L. M. F., Moser-Reischl, A., Zölch, T., Häberle, K.-H., Rötzer, T., Pretzsch, H., Pauleit, S. 2020. *Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis*. Building and Environment, 170, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106606>.
- Ramani, V., Arjunan, P., Poolla, K., Miller, C. 2024. *Semantic segmentation of longitudinal thermal images for identification of hot and cool spots in urban areas*. Building and Environment, 249, 111112. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111112>.
- Rubel, F., Kottek, M. 2010. *Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification*. Meteorol. Z., 19, 135–141. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430>.
- Salata, F., Golasi, I., Vollaro, E. D. L., Bisegna, F., Nardecchia, F., Coppi, M., Gugliermetti, F., Vollaro, A. D. L. 2015. *Evaluation of Different Urban Microclimate Mitigation Strategies through a PMV Analysis*. Sustainability, 7(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su7079012>.
- Santamouris, M., Xirafi, F., Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., Vassilakopoulou, K. 2012. *Improving the Microclimate in a Dense Urban Area Using Experimental and Theoretical Techniques—The Case of Marousi, Athens*. International Journal of Ventilation, 11(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/14733315.2012.11683966>.
- Santos, A., Santil, F., Silva, C., Santos, A., Santil, F., Silva, C. 2022. *The Use of NDVI and NDBI to Provide Subsidies to Public Manager's Decision Making on Maintaining the Thermal Comfort in Urban Areas. W Vegetation Index and Dynamics*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.97350>.
- Schrijvers, P. J. C., Jonker, H. J. J., Kenjereš, S., de Roode, S. R. 2015. *Breakdown of the night time urban heat island energy budget*. Building and Environment, Special Issue: Climate adaptation in cities, 83, 50–64. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.012>.
- Schwaab, J., Meier, R., Mussetti, G., Seneviratne, S., Bürgi, C., Davin, E. L. 2021. *The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities*. Nature Communications, 12(1), 6763. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26768-w>.
- Semenza, J. C., Rubin, C. H., Falter, K. H., Selanikio, J. D., Flanders, W. D., Howe, H. L., Wilhelm, J. L. 1996. *Heat-Related Deaths during the July 1995 Heat Wave in Chicago*. New England Journal of Medicine, 335(2), 84–90. <https://doi.org/10.1056/NEJM199607113350203>.
- Sharma, P., Singh, R., Yogeswaran, N. 2026. *Global review of urban heat island research across varied climatic regions*. Discover Environment, 4(1), 84. <https://doi.org/10.1007/s44274-026-00571-0>.
- Shata, R. O., Mahmoud, A. H., Fahmy, M. 2021. *Correlating the Sky View Factor with the Pedestrian Thermal Environment in a Hot Arid University Campus Plaza*. Sustainability, 13(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su13020468>.
- Sheng, L., Tang, X., You, H., Gu, Q., Hu, H. 2017. *Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China*. Ecological Indicators, 72, 738–746. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.009>.
- Shi, T., Chen, M., Li, J., Lu, G. 2025. *Quantifying the driving force of urban morphologies on canopy urban heat island: A machine learning approach with educational application*. Frontiers in Environmental Science, 13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1647596>.

- Simović, I., Radulović, M., Dunjić, J., Savić, S., Šećerov, I. 2025. *Influence of Urban Greenery on Microclimate Across Temporal and Spatial Scales*. *Forests*, 16(11), 1729. <https://doi.org/10.3390/f16111729>.
- Stenberg, P., Linder, S., Smolander, H., Flower-Ellis, J. 1994. *Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some Scots pine stands*. *Tree Physiology*, 14(7-8-9), 981–995. <https://doi.org/10.1093/treephys/14.7-8-9.981>.
- Stewart, I. D., Oke, T. R. 2012. *Local Climate Zones for Urban Temperature Studies*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- Středová, H., Chuchma, F., Rožnovský, J., Středa, T. 2021. *Local Climate Zones, Land Surface Temperature and Air Temperature Interactions: Case Study of Hradec Králové, the Czech Republic*. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100704>.
- Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego m.st. Warszawy*, uchwała nr LXXXII/2746/2006 z dnia 10 października 2006 r., zmieniana uchwałami: Nr LXII/1667/2018 (2018) oraz nr LIII/1611/2021 (2021), Warszawa. 2006. Rada m.st. Warszawy.
- Suleimany, M., Gonbad, M. R. S., Naghibizadeh, S., Niri, S. D. 2025. *Artificial intelligence as a tool for building more resilient cities in the climate change era: A systematic literature review*. [W:] *Artificial Intelligence and Machine Learning Applications for Sustainable Development*. CRC Press.
- 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>.
- Szymanowski, M., Drzeniecka-Osiadacz, A., Sawiński, T., Kryza, M. 2019. *Historia i współczesność badań nad klimatem Wrocławia – pomiary i badania modelowe*. *Acta Geographica Lodziensia*, 108, 109–126. <https://doi.org/10.26485/AGL/2019/108/8>.
- Śleszyński, P., Gibas, P., Sudra, P. 2020. *The Problem of Mismatch between the CORINE Land Cover Data Classification and the Development of Settlement in Poland*. *Remote Sensing*, 12(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/rs12142253>.
- Tian, Y., Zhou, W., Qian, Y., Zheng, Z., Yan, J. 2019. *The effect of urban 2D and 3D morphology on air temperature in residential neighborhoods*. *Landscape Ecology*, 34(5), 1161–1178. <https://doi.org/10.1007/s10980-019-00834-7>.
- Tomczyk, A. M., Piniewski, M., Eini, M. R. 2025. *Past and future changes in maximum air temperature and cold days in winter in Poland*. *Acta Geophysica*, 73(4), 3663–3675. <https://doi.org/10.1007/s11600-025-01538-0>.
- Tomczyk, A. M., Półrolniczak, M., Kolendowicz, L. 2018. *Cold Waves in Poznań (Poland) and Thermal Conditions in the City during Selected Cold Waves*. *Atmosphere*, 9(6), 208. <https://doi.org/10.3390/atmos9060208>.
- Tomczyk, A. M., Szyga-Pluta, K. 2016. *Growing seasons in Poland in the period 1971-2010*. *Przegląd Geograficzny*, 88(1), 75–86. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2016.1.4>.

- Tsichritzis, L., Nikolopoulou, M. 2019. *The effect of building height and façade area ratio on pedestrian wind comfort of London*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 191, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.05.021>.
- Walawender, J. P., Szymanowski, M., Hajto, M. J., Bokwa, A. 2014. *Land Surface Temperature Patterns in the Urban Agglomeration of Krakow (Poland) Derived from Landsat-7/ETM+ Data*. Pure and Applied Geophysics, 171(6), 913–940. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0685-7>.
- Wang, C., Liu, Z., Du, H., Zhan, W. 2023. *Regulation of urban morphology on thermal environment across global cities*. Sustainable Cities and Society, 97, 104749. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104749>.
- Wang, Q., Sun, W., Tang, S., Zhou, X. 2025. *SVI-GVI integration for thermal comfort in urban parks: A case study of Changchun in cold regions*. Theoretical and Applied Climatology, 156(6), 318. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05491-2>.
- Wei, X., Wang, X.-J. 2022. *Analyzing the Spatial Distribution of LST and Its Relationship With Underlying Surfaces in Different Months by Classification and Intersection*. Frontiers in Environmental Science, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.872282>.
- Winbourne, J. B., Jones, T. S., Garvey, S. M., Harrison, J. L., Wang, L., Li, D., Templer, P. H., Hutryra, L. R. 2020. *Tree Transpiration and Urban Temperatures: Current Understanding, Implications, and Future Research Directions*. BioScience, 70(7), 576–588. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa055>.
- Wu, X., Zhang, X., Liao, W., Chen, G., Luo, M., Liu, X. 2025. *Contrasting 2D/3D urban morphology drivers of surface and canopy temperatures under different spatial scales*. Building and Environment, 283, 113389. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113389>.
- Wu, Z., Zhou, Y., Ren, Y. 2024. *Green space-building integration for Urban Heat Island mitigation: Insights from Beijing's fifth ring road district*. Sustainable Cities and Society, 116, 105917. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105917>.
- Xu, Y., Ren, C., Ma, P., Ho, J., Wang, W., Lau, K. K.-L., Lin, H., Ng, E. 2017. *Urban morphology detection and computation for urban climate research*. Landscape and Urban Planning, 167, 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.06.018>.
- Xu, Y., Yang, J., Zheng, Y., Li, W. 2024. *Impacts of two-dimensional and three-dimensional urban morphology on urban thermal environments in high-density cities: A case study of Hong Kong*. Building and Environment, 252, 111249. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111249>.
- Yan, D., Xu, L., Wang, Q., Feng, J., Wu, X., Yan, D., Xu, L., Wang, Q., Feng, J., Wu, X. 2025. *Quantifying Landscape Effects on Urban Park Thermal Environments Using ENVI-Met and 3D Grid Profile Analysis*. Forests, 16(7). <https://doi.org/10.3390/f16071085>
- Yoshino, M. 1990. *Development of urban climatology and problems today*. Energy and Buildings, 15(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90109-V](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90109-V).
- Yu, Z., Chen, J., Chen, J., Zhan, W., Wang, C., Ma, W., Yao, X., Zhou, S., Zhu, K., Sun, R. 2024. *Enhanced observations from an optimized soil-canopy-photosynthesis and energy flux model revealed evapotranspiration-shading cooling dynamics of urban vegetation during extreme heat*. Remote Sensing of Environment, 305, 114098. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114098>.

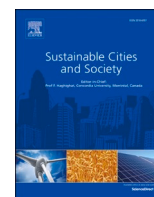
- Yuan, B., Zhou, L., Dang, X., Sun, D., Hu, F., Mu, H. 2021. Separate and combined effects of 3D building features and urban green space on land surface temperature. *Journal of Environmental Management*, 295, 113116.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113116>.
- Zhao, K., Qi, M., Yan, X., Li, L., Huang, X. 2023. *Dynamic Impact of Urban Built Environment on Land Surface Temperature Considering Spatio-Temporal Heterogeneity: A Perspective of Local Climate Zone*. *Land*, 12(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/land12122148>.
- Zieliński, M., Fortuniak, K., Pawlak, W., Siedlecki, M. 2018. *Long-term Turbulent Sensible-Heat-Flux Measurements with a Large-Aperture Scintillometer in the Centre of Łódź, Central Poland*. *Boundary-Layer Meteorology*, 167(3), 469–492.
<https://doi.org/10.1007/s10546-017-0331-5>.
- Zwolska, A., Półrończak, M., Kolendowicz, L. 2025. *Remote Sensing-Based Analysis of Urban Land Cover Changes and Surface Urban Heat Island Dynamics Using Landsat and Local Climate Zones Classification in Poznań, Poland*. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18, 16020–16037.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3583546>.
- Zych, S. 1961. *Zagadnienia klimatyczne miasta Łodzi*. *Przegląd Techniczny*, 49, 9.
- Żmudzka, E. 2019. *Badania klimatu Warszawy prowadzone w Zakładzie Klimatologii Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego (1951–2018)*. *Acta Geographica Lodziensia*, 108, 127–139. <https://doi.org/10.26485/AGL/2019/108/9>.

III. Publikacje wchodzące w skład rozprawy doktorskiej



Contents lists available at ScienceDirect

Sustainable Cities and Society

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scs

Spatial development indicators as a tool to determine thermal conditions in an urban environment

Kaja Czarnecka^{*}, Magdalena Kuchcik, Jarosław Baranowski

Climate Research Department, Polish Academy of Sciences, Institute of Geography and Spatial Organization, Twarda 51/55, Warsaw 00-818, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:

Spatial development indicators
Thermal characteristics
Hot periods
Land use planning

ABSTRACT

In the face of climate change and the growing frequency of thermally burdensome conditions, urban morphology and city planning are becoming increasingly important to human health. Architects and policymakers use various tools, including spatial development indicators describing the characteristics of built-up areas, to mitigate urban climate. This study purposed to (1) indicate which widely used spatial development indicators most adequately explained the thermal conditions of the environment, and (2) investigate how large an area most accurately represents the thermal features recorded at a given air temperature measurement site. Selected indexes were used to characterize each of the 21 measuring sites located in Warsaw. First, five spatial development indicators were calculated for three distances from each site. Then, based on data from the air temperature monitoring network, 17 selected thermal characteristics were calculated. The results of the analyses indicated that the Ratio of Biologically Vital Area has the highest impact on the thermal regime with particularly strong influence on the lowest daily temperature values. The paper proves that the thermal conditions of a given location in the diverse space of a city are more precisely represented by a large area than by its nearest surroundings.

1. Introduction

Cities are the most sensitive areas to air temperature rise and consequently to increases in the frequency and duration of extraordinarily high air temperatures, which result in greater morbidity and mortality (IPCC, 2023; Kysely, 2009; Lin, Kjellström, Wilcke & Chen, 2022). In 2018, 55% of the world's population was exposed to this problem, and in 2050 that number is projected to reach 68% (Population Division, Department of Economic & Social Affairs, United Nations, 2019). Cities' thermal characteristics depend on urban morphology: building density, surface roughness, degree of sealing, and type of building materials (Müller, 1997; Oke, 1982). Features of the urban climate include: less shortwave radiation reflected (trapping and multiple reflections), more absorbed and emitted heat, additional anthropogenic sources of heat, decreased evaporative cooling, a changed rate of heat exchange with the air above, and a change in the wind field inside the city (Al-Obaidi, Rayburg, Pórolniczak, & Neave, 2021; Grimmond & Oke, 1999; Harman, Barlow, & Belcher, 2004; Offerle, Grimmond, & Fortuniak, 2005). All of these factors contribute to the creation of Urban Heat Islands (UHI) (Bassett, Janes-Bassett, Phillipson, Young & Blair, 2021; Błażejczyk et al., 2014b; Oke, 1973), whose

intensity is growing as climate change advances (Jagarnath, Thambiran & Gebreslasie, 2020; Köppe, Kovats, Jendritzky & Menne, 2004; Oke, 1997; Oleson, Anderson, Jones, McGinnis & Sanderson, 2018). Conditions present in UHIs lead to thermal stress, especially in the most vulnerable groups: children, the elderly, and those suffering from chronic cardiovascular and respiratory disorders (Flynn, McGreevy & Mulkerrin, 2005; Kuchcik, 2017).

Because the problem of global temperature rise is growing, searching for solutions to mitigate climate change has become a priority. To reduce heat load, heat stress, and future climate-related risks in cities, adaptation and mitigation tools are being implemented. This task can be accomplished through building design and urban planning that are suitable for a given climatic zone and adapted to climate threats (Forwood, Hayman & Tadeipalli, 2000; Givoni, 1986; Salata et al., 2017). One of the current challenges facing city planners is creating local modifications in already heavily developed cities. To improve the thermal microclimate in high-density urban areas, earth-to-air heat exchangers, cool materials, solar control devices, green spaces, and blue infrastructure are being introduced (Gaitani et al., 2011). Thoroughly described examples of cities in Europe where modern solutions aimed at climate mitigation have been implemented include i.a.: Athens – the Marousi area (Santamouris et al., 2012), Copenhagen – the

^{*} Corresponding author.

E-mail address: czarnecka@twarda.pan.pl (K. Czarnecka).

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105014>

Received 5 June 2023; Received in revised form 20 September 2023; Accepted 18 October 2023

Available online 20 October 2023

2210-6707/© 2023 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Nomenclature

BCR	Building Coverage Ratio
BH _{max}	Maximum Building Height
BH _{mean}	Mean Building Height
FAR	Floor Area Ratio
RBVA	Ratio of Biologically Vital Area
SVF	Sky View Factor
UHI	Urban Heat Island
avg	average air temperature
max	average maximum air temperature
min	average minimum air temperature
max_a/max_d/max_u	value of the difference between max of two consecutive days: the module/ when the parameter goes down/ when the parameter goes up
min_a/min_d/min_u	value of the difference between min of two consecutive days: the module/ when the parameter goes down/ when the parameter goes up
k1/k5/k10	number of 10-minute air temperatures under the 1st/ 5th/10th percentile
k90/k95/k99	number of 10-minute air temperatures above the 90th/ 95th/ 99th percentile
down	time (in minutes) required for the air temperature to decrease from max to min
up	time (in minutes) required for the air temperature to increase from min to max

Climate-Resilient Neighbourhood in Østerbro (Klimakvarter, 2013), Oslo – Furuset (<https://www.futurebuilt.no>), and Rome – the Cloister of San Pietro in Vincoli (Salata et al., 2015). In Poland, the most common climate mitigation measures are planting trees (close to places where they were previously cut down due to construction) and solutions connected with rainwater retention (<https://sendzimir.org.pl/en/publications/retention-friendly-places-map/>).

In the hands of urban planners, spatial development indicators are tools for climate mitigation. Local land use policies, recommendation maps and rules set out in spatial development plans make it possible to create a sustainable environment for residents and limit climate-related risks (Birkmann et al., 2021; Ren, Ng & Katzschner, 2010). The complexity of the elements that shape the city climate is reflected in the following spatial development indicators, commonly used by city planners and presented in this paper: Floor Area Ratio, Building Coverage Ratio, Mean Building Height, Maximum Building Height and Ratio of Biologically Vital Area.

Attempts to improve communication between urban climatologists, planners and policymakers are still being made. One of the key problems is the lack of standardization and terminology. The relationship between environmental parameters and air temperature is widely described in articles, while the indicators used in creating land development plans are analysed much less frequently. Moreover, in most studies data on thermal conditions usually comes from models or from maps of land surface temperature which, despite a correlation with air temperature, is not fully convergent with it. Research based on air temperature data at 2 m above ground from a homogeneous, long-term and constantly supervised measurement network is very rare. Furthermore, it would be necessary to systematize the area taken into account in the calculations of urban indicators in the given physiographic conditions of the city in order to effectively change the urban space. It is particularly important due to the very limited literature on this subject. In the calculation of spatial development indicators, areas of various sizes are used (usually coinciding with the administrative boundaries of plots) without prior recognition of the thermal properties of this area.

The aim of the study was to determine which elements of the

surroundings described by the selected spatial development indicators have the greatest impact on the thermal conditions at the measurement points. Based on a fairly dense, in-situ air temperature measurement network (21 sites) covering different areas of Warsaw, the authors intended to investigate how large an area included in a given land use index should be to represent thermal features the most accurately. Therefore, tests were conducted for areas of several sizes. As the urban environment is the most burdensome for humans during hot periods, the calculations were made using data from extraordinarily hot months when the heat load was the highest.

2. Material and methods

2.1. Study area

The study area is Warsaw (20°51' – 21°16' E, 52° 6') – the capital of Poland and its largest city with a population of 1 792 718 (Statistics Poland, 2022a) and an area of 517.24 km² (Statistics Poland, 2022b). Situated in Central Europe, Warsaw lies in a temperate climate zone, which is experiencing significant climate change including strong air temperature rise.

According to the CORINE Land Cover database, which takes into account the physical, biological and functional attributes of surface, the dominant land use category in Warsaw is 'artificial surfaces' (68.3%) (Chief Inspectorate for Environmental Protection, 2018). Within this category, 'urban fabric' occupying 45.8% of Warsaw's area and 'Continuous urban fabric' (2.2%), can be distinguished. The other categories are: 'forest and seminatural' areas (16.0%), 'agricultural' areas (13.4%), and 'water bodies and wetlands' (2.3%).

The study is based on data from 21 sites in Warsaw recorded by HOBO U23 Pro-v2 data loggers located 2 m above the ground (Fig. 1). This air temperature monitoring network belongs to the Climate Research Department of IGSO PAS; it started operation in 2001 with a small number of loggers, expanding to 27 in 2008–2009. The network is unique on a global scale due to its size and long series of observations (Kuchcik, Błażejczyk, Milewski & Szmyd, 2014). As the study period extends from 2010 to 2019 and the city is constantly changing, the vicinity of the measurement sites was carefully analysed. As a result, two sites were excluded from the study due to changes in land use during the research period. Four of the remaining stations are situated outside the city and were thus not considered in this work. Furthermore, not all years were included in the analysis due to missing data or sensor calibration.

All the analysed sites are located in urbanised areas; however, they differ as to share of greenery, spatial development and horizon limitation (see the electronic supplementary material: Table 1). Eight sites are in residential areas, seven – in the vicinity of service buildings, four, in the areas classified as urban greenery or undeveloped areas, and two, next to urban technical infrastructure (The Special Policy for Warsaw, 2010). Only one site (no. 6) is located in a small courtyard surrounded by buildings on every side, and two sites are in large courtyards (no. 18, 21). None of the others are completely enclosed by buildings. In the local climate zones classification, seventeen of the sites represent built-up areas and four sites neutral areas (Demuzere et al., 2022; Kuchcik & Milewski, 2016).

2.2. Spatial development indicators

To identify which urban development features have the greatest impact on the thermal regime of a given site's immediate surroundings, five indicators referred to as spatial development indicators, were calculated in this study (see the electronic supplementary material: Table 2). In this study, "spatial development indicators" are defined as a numerically expressed form of characteristics of the built-up area arrangement based on morphological features. Their selection was guided by the universality of indicators used by urban planners, the

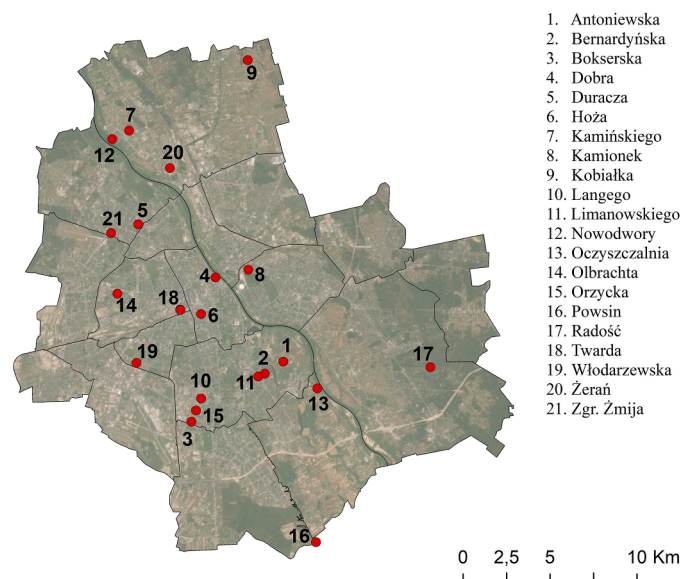


Fig. 1. Location of the air temperature measurement points. Source: own elaboration, basemap Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID and the GIS User Commune.

availability of the spatial data required for their calculation, and the requirement to take into account both vertical and horizontal features.

Three distance buffers from the measuring point were tested: 10 m, 50 m, and 100 m. For easy identification, the number of meters was added to each indicator abbreviation (e.g. *FAR10*). One value for each of the distances was assigned for each measurement site. If the share of the area covered by buildings or greenery within a radius of 100 m of the measuring point changed during the research period, none of the data (either spatial or meteorological) from the years after the change were included in this paper. The analysis of changes in land use was carried out on the basis of historical satellite images from Google Earth Pro.

The spatial development indicators used in this study are (also see: Nomenclature):

- **Building Coverage Ratio (BCR)** – indicator describing the horizontal parameter of the built-up area. To calculate it, the area within all building contours was divided by the total plot area (Xu et al., 2017). The outlines of all buildings within the three distances from the measuring point were determined in QGIS 3.4.9 based on OpenStreetMap and Bing Aerial (Open Layers Plugin 2.0.0).
- **Floor Area Ratio (FAR)** – indicator primarily describing the vertical parameter, but also, the horizontal parameter of the built-up area. It is calculated as the area within all building contours multiplied by the number of floors and divided by the total area of the plot (Information Report No. 111, 1958). The outlines of all buildings within the three distances from the measuring point were determined in QGIS 3.4.9 based on OpenStreetMap and Bing Aerial (Open Layers Plugin 2.0.0). The information about the number of floors comes from satellite map analysis based on Google Earth Pro and from field inventory.
- **Mean Building Height (BHmean)** – indicator describing primarily the horizontal parameter, but also, the vertical parameter of the built-up area. It is the ratio of the sum of the products of the area of buildings and their height to the Building Coverage area (Xu et al., 2017). This indicator was calculated with the use of QGIS 3.4.9 based on OpenStreetMap and Bing Aerial (Open Layers Plugin 2.0.0); however, information about building heights comes from Google Earth Pro (Qi et al., 2016).

- **Maximum Building Height (BHmax)** – indicator describing the vertical parameter of the built-up area. Its value is the height of the tallest building within the buffer area (Tsichritzis & Nikolopoulou, 2019). This parameter was calculated using QGIS 3.4.9 based on OpenStreetMap and Bing Aerial (Open Layers Plugin 2.0.0), and estimated building height from Google Earth Pro (Qi et al., 2016).
- **Ratio of Biologically Vital Areas (RBVA)** – indicator of green space in the immediate vicinity of the measurement site. The area covered by vegetation or open water was divided by the total plot area (Szulcewska et al., 2014). Areas of greenery on roofs or terraces with natural vegetation larger than 10 m² were included in 50%. A layer with the outline of the area without buildings was created in QGIS 3.4.9 with the use of OpenStreetMap and Bing Aerial (Open Layers Plugin 2.0.0).

All the spatial development indicators calculated for each buffer considered are provided in the electronic supplementary material (Table 2).

The Sky View Factor (SVF) is also an important indicator for describing the urban microclimate (Lin, Tsai, Hwang & Matzarakis, 2012); however, it varies strongly even over a single year. Moreover, calculating the indicator at three different distances would be inadvisable because to capture the most important obstacles blocking the view, a radius of 100 m is recommended (Dirksen, Ronda, Theeuwes & Pagani, 2019). Therefore, SVF values are included in the electronic supplementary material (Table 1). only to provide a background, and not as elements of the analysis. In this paper, the SVF of each measurement point was estimated using RayMan Pro 3.1 (Matzarakis, 2012, 2007, 2010). The input to the program is the model of all obstacles in the neighbourhood: buildings, and coniferous and deciduous trees. Height and area data were obtained from Bing Aerial images, Google Earth Pro, and Map of the Tree Crowns (<http://mapa.um.warszawa.pl/>).

2.3. Thermal characteristics

The basis for the calculations was air temperature sampled every 10 min by the 21 loggers located 2 m above the ground (placed above grass even in the most built-up areas) that form part of the air temperature monitoring network.

To properly assess the impact of the surroundings on the thermal regime of a given site during hot periods, only days when the whole area of Warsaw was in one air mass, with no frontal zones, were analysed. Calm, sunny periods with typical air temperature courses were chosen based on data from the Warsaw-Okęcie synoptic meteorological station (IMGW-PIB). Thermal characteristics were calculated only for the years with complete monthly series of data (see the electronic supplementary material: Table 1).

Four extremely hot months – July 2010, August 2015, May 2018, and June 2019 – were chosen for the analysis. They were the warmest after 2008, the year when the Warsaw air monitoring network was expanded. Their extreme warmth becomes apparent when the average air temperature for these months is compared with the 30-year average for the period 1991–2020 (Fig. 2). Moreover, severe heat waves, described in the literature, were observed during the selected periods (Błażejczyk, Twardosz, Walach, Czarnecka & Błażejczyk, 2022; Kuchcik, 2017; Sulikowska & Wypych, 2020; Twardosz, 2019; Twardosz & Kossowska-Cezak, 2021).

Seventeen thermal characteristics were calculated for each studied month. They included not only the basic features of thermal microclimate, but also unusual ones intended to express the increased heat capacity of the city and differences in the heating and cooling of different surface types. These characteristics were selected to answer the question: How do various built-up structures differ in terms of their impact on the increase/decrease in air temperature?

The thermal characteristics were (see: Nomenclature):

- the average minimum air temperature (min),
- the module of the difference between minimum air temperature values noted on a given day and the following day – averaged for the month (min_a),
- the average difference between minimum air temperature values noted on a given day and the following day – only when the air temperature goes down (min_d),
- the average difference between minimum air temperature values noted on a given day and the following day – only when the air temperature goes up (min_u),
- the average maximum air temperature (max),
- the module of the difference between maximum air temperature values noted on a given day and the following day – averaged for the month (max_a),
- the average difference between maximum air temperature values noted on a given day and the following day – only when the parameter goes down (max_d),
- the average difference between maximum air temperature values noted on a given day and the following day – only when the parameter goes up (max_u),
- the average air temperature (avg),
- the number of 10-minute air temperature measurements above the 99th percentile (k99) during a given month,
- the number of 10-minute air temperature measurements above the 95th percentile (k95) during a given month,
- the number of 10-minute air temperature measurements above the 90th percentile (k90) during a given month,
- the number of 10-minute air temperature measurements under the 10th percentile (k10) during a given month,
- the number of 10-minute air temperature measurements under the 5th percentile (k5) during a given month,
- the number of 10-minute air temperature measurements under the 1st percentile (k1) during a given month,

- the time (in minutes) required for the air temperature to increase from the minimum in the morning to the maximum (up),
- the time (in minutes) required for the air temperature to decrease to the lowest temperature at night, usually in the early hours of the next day (down).

2.4. Statistical analysis

The statistical significance of the relationships between an area's thermal characteristics and spatial development indicators determined for three distances from the measuring site, was calculated with the use of Pearson's linear correlation coefficient. The confidence level was at least 95.0%, but some of the relationships showed a confidence level of 99.0%. The tables in the electronic supplementary present only those air temperature characteristics that showed a statistically significant relationship with urban development indexes. In the next step the strength of the relationship was determined.

One of the most commonly used clustering methods, k-means with Euclidean distance was used to create the pattern of land use type resulting in a given thermal regime. First, three clusters of sites were extracted for each thermal characteristic (each year calculated separately) and each spatial development index, giving 22 types of three clusters. The clusters were defined by the lowest, medium, and highest values of the relevant characteristic. Next, the spatial development-based clusters and the thermal indicator-based clusters were compared in terms of the extent to which they related to each other. The final value was the percentage of properly matched (overlapping) stations in all three clusters of the two types among all stations considered. At this stage, the sign of the correlations previously calculated between indexes was considered.

For example – the relationship of two sites' *RBVA10* and min in 2015 (negative correlation coefficients) is 100% matched if:

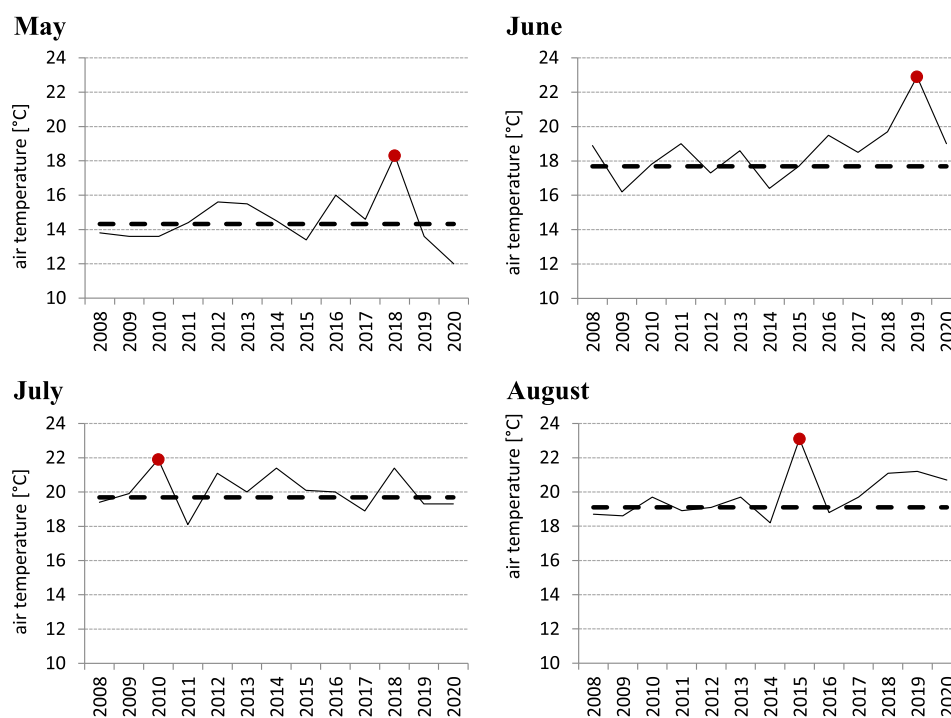


Fig. 2. Average air temperature in May, June, July, and August (2008–2020) in Warsaw as compared to the 30-year average monthly air temperature (1991–2020, dashed lines). Source: own elaboration based on IMGW-PIB, <https://danepubliczne.imgw.pl/>.

- all the stations in the cluster with high values of RBVA10 are the same as the stations in the cluster with low values of air temperature,
- all the stations in the cluster with low values of RBVA10 are the same as the stations in the cluster with high values of air temperature,
- all the stations in the cluster with average values of RBVA10 are the same as the stations in the cluster with average values of air temperature.

As it was suspected that linear regression would not be the most accurate model for describing the dependence of thermal conditions on urban indexes, the last analysis was intended to select the best fitted models for describing these relationships. Twenty seven curvilinear models (fitted with the least squares only method) were tested. For each relationship (1020 matches = 5 spatial development indicators x 17 thermal characteristics x 3 distances x 4 research periods), one model was selected – the one with the highest R-Squared value.

All the analyses were processed with the use of the Statgraphics Centurion software package. The results of the analysis are provided in the electronic supplementary material Tables 3, 4 and 5.

3. Results

The correlation between the thermal characteristics and the spatial development indexes calculated for every studied distance was statistically significant for 274 relationships (see the electronic supplementary material: Table 3). The characteristics that showed no dependence in any of the years were: $\max_d$, $\max_u$, $k95$, and $k90$. These indicators were omitted in the electronic supplementary material (Table 3). Most relationships were moderately correlated (182), then highly (56), and weakly (36). None of the correlations was very weak (correlation coefficient lower than 0.3) or very strong (correlation coefficient higher than 0.9).

Among thermal characteristics, $\min$ was most often correlated with urban indicators regardless of year or distance from the site. Of 68 correlations (17 urban indicators x 4 years), 46 were statistically significant at a confidence level of at least 95.0%, and 35 at 99.0%. $\min$ also had the highest number of strong correlations: 18. This parameter was characterised by the strongest relationship with $RBVA100$ in 2015 ($r = -0.87$), which indicates that large green areas played the main role in regulating minimum air temperature. The other thermal characteristics that were highly correlated with spatial development indicators were: $k10$ (42 correlations in total; 25 at 99.0%), $k5$ (35; 20 at 99.0%) and avg (35; 17 at 99.0%). The first two – $k10$ and $k5$ – reflect minimum air temperature value, and the avg includes $\min$: this explains the high correlation.

The weaker correlations found for $\min_d$, $\min_u$, $\min_a$, $\max_a$, up and $down$ indicate that day-to-day changes in minimum air temperature are less influenced by surroundings and more by atmospheric processes taking place on a larger scale. Land use mainly impacted air temperature values themselves, affecting changes in them to a lesser extent.

The weakest impact of spatial development on air temperature was observed in the case of its highest values, which occur in daytime. In total, only 3 correlations were statistically significant with $\max$ (1 at 99.0%), 2 with $k90$ (0 at 99.0%) and 2 with $k95$ (0 at 99.0%).

Among spatial development indicators, the strongest correlation with thermal properties was shown by $RBVA100$. Out of 68 possible correlations (17 thermal parameters x 4 research periods), 32 were significant, 21 at 99.0% confidence level. This indicates that in hot periods, thermal conditions are most strongly affected not by buildings, but by greenery. The other spatial development indicators characterized by many statistically significant correlations with thermal characteristics were: $BH_{\max}100$ (30; 17 at 99.0%), $RBVA50$ (28 in total; 17 at 99.0%) and $FAR100$ (26; 15 at 99.0%).

The spatial development indicators that had a much lesser impact on the thermal regime were: $FAR10$, $BCRA10$ and $RBVA10$. This and other results of this study show that the smaller the studied area, the fewer the

correlations between spatial development indicators and thermal characteristics. This proves that in the diverse space of a city, the thermal regime of a given location is influenced not by its closest surroundings, but by a larger area with a radius of at least 100 m.

The correlations of FAR , BCR and BH_{mean} were positive with $\min$, $\min_d$, $\max_a$, avg , and $down$, and negative with the remaining thermal characteristics. These relationships reflect the rise of air temperature in areas where the development intensity is growing and are strongly connected with the high heat capacity of the urban fabric. $BH_{\max}$ showed the same relationships, except for $\min_d$ – some of the correlation coefficients were positive and some negative depending on the year and the distance from the measurement point.

Positive correlation coefficients were noted for $RBVA$ with $\min_u$, $\min_a$, $k10$, $k5$, $k1$ and up (air takes longer to warm up in green areas). Some of the correlations between $RBVA$ and $\min_d$ were positive and some were negative depending the year and on the distance from the measurement point. These statistics confirm that the greater the share of greenery and open ground, the lower the air temperature.

The next step, cluster analysis, was conducted only for the pairs that indicated significant correlation (simple regression analysis). Three clusters of sites were created for each spatial development indicator and each thermal characteristic. Clusters grouped sites with the lowest, medium, or highest values of given indexes. Next, the spatial development-based clusters were compared with the thermal characteristics-based clusters in terms of whether the previously calculated correlations were negative or positive (e.g. the cluster of stations with the lowest $RBVA100$ was compared with the cluster of the stations with the highest $\min$ because of the negative correlation; the cluster of stations with the lowest $FAR100$ was compared to the cluster of stations with the lowest $\min$ because of positive correlation) (see the electronic supplementary material: Table 2). The reason for this analysis was to establish to what extent (in%) the areas described by given spatial characteristics correspond to areas with given thermal conditions. It supplements the study with information on how many stations fit the thesis that was put forward based on the correlations calculated.

Out of 248 statistically significant relationships, 111 were found to be matched above 50% (see the electronic supplementary material: Table 4). Most of the best-matched relationships were related to $RBVA$: in 66.2% of all the pairs of clusters related to it, more than half of the measuring stations matched. Measurement sites with the highest $RBVA$ overlapped with sites that had the lowest air temperatures. On the other hand, the indicators related to buildings were well-matched only in half as many pairs as compared to the indicator related to urban greenery. Most of the well-matched pairs of clusters were connected to minimum air temperature – 26 of 46 statistically significant pairs were matched for more than half of the stations.

Of the thermal characteristics analysed in this study, only $\max_a$, $k90$ and $k95$ failed to show a well-matched relationship. This means that the sites characterised by the highest air temperature values do not overlap with the same sites grouped by any of the spatial development indicators analysed in this paper.

The presence of many significant linear relationships was found even at the level of 99.0%; however some of them could be better explained by a different, curvilinear model (see the electronic supplementary material: Table 5). This would be the case if the increase in the value of indexes describing the urban fabric causes an unsteady increase or decrease in the values of air temperature characteristics – the trendline is properly curved to best reflect such a relationship.

Of 1020 matches, 18.0% were best described by model No. 1 (Reciprocal-Y squared-X), the next 12.5%, model No. 2 (Squared-Y Square root-X) and 9.8%, – model No. 3 (Double squared) (see the electronic supplementary material: Table 4). The linear model was the best in 4.8% of cases.

As concerns the indexes of built-up areas (FAR , BCR , BH_{mean} , $BH_{\max}$), the best fitted model was No. 1, which described 163 of 816 matches (20.0%) the most accurately, and then model No. 2 (124 of 816

– 15.2%). Fig. 3 (A, B) offers a comparison of linear and alternative curvilinear models for FAR_{100} and min in 2015. The value of the min trend for $FAR_{100}=0$ was much lower with the use of model No. 2 (Fig. 3, B) than with the linear model (Fig. 3, A), while for a high values of FAR_{100} the trendline of min was smoother and increased less.

In the case of RBVA, the index describing greenery, the most fitted model was No. 3 (30 of 204 matches – 14.7%), followed by model No. 10 (Double reciprocal; 29 of 204 – 14.2%). Using the example of $RBVA_{100}$ and min in 2015 (Fig. 3C, D): the value of the min trend in the area without greenery was slightly higher for model No. 15 (Square root-Y) than for the linear one. When $RBVA_{100}=100\%$, the value of the trend was also lightly higher. The trend lines of these two models differed slightly.

4. Discussion

Our study aimed to identify which elements of the urban fabric, as described by spatial development indicators, most accurately reflected the air temperature in a given place during hot periods, which are particularly burdensome for humans. While trying to establish a relationship between the air temperature measured at 2 m a.g.l. and the built-up area features, we asked ourselves how large an area an air measurement obtained in a single location can represent. To answer this, we analysed areas of 3 different sizes: circles centered on the measurement site with radiuses of 10 m, 50 m, and 100 m from the logger. We then calculated 5 different spatial development indicators to find out which of them had the greatest impact on thermal conditions during hot

periods.

This paper proves that the thermal regime of a given location in the diverse space of a city is influenced not by its nearest surroundings, but by a larger area with a radius of at least 100 m. The land use indexes calculated for areas with a radius of 100 m showed the most correlations and the strongest statistically significant correlations with the characteristics describing the thermal environment. So far, the number of publications on the size of the area that should be considered during this type of research is very limited. In the case of studies based on land surface temperature, much larger areas are often analysed, and the reason may be limitations related to the resolution of used images (Xu et al., 2017). On the other hand, studies based on ground measurements use smaller research plots, which can be better correlated in the case of cities with high development intensity, tall buildings and located in a hot and humid climate (Cheung & Jim, 2019).

Because it is during heat waves that land use type most harmfully affects the thermal conditions in cities and thus the thermal sensations of residents (Alcoforado, Andrade, Lopes & Vasconcelos, 2009; Błażejczyk, Kuchcik, Błażejczyk, Milewski & Szmyd, 2014a; Taleghani, Kleerekoper, Tenpierik & van den Dobbelen, 2015), we decided to conduct the calculations for the hottest months. The mosaic of different surface materials in the city which is responsible for the specific urban climate leads to a reduction in the nighttime cooling effect, as observed at sites with lower RBVA and with higher FAR, BCR, BH_{mean} and BH_{max} . This property of built-up areas negatively impacts the health of local residents (i.a. Kuchcik, 2017; Semenza et al., 1996), since heat stress that lasts many days burdens the human body.

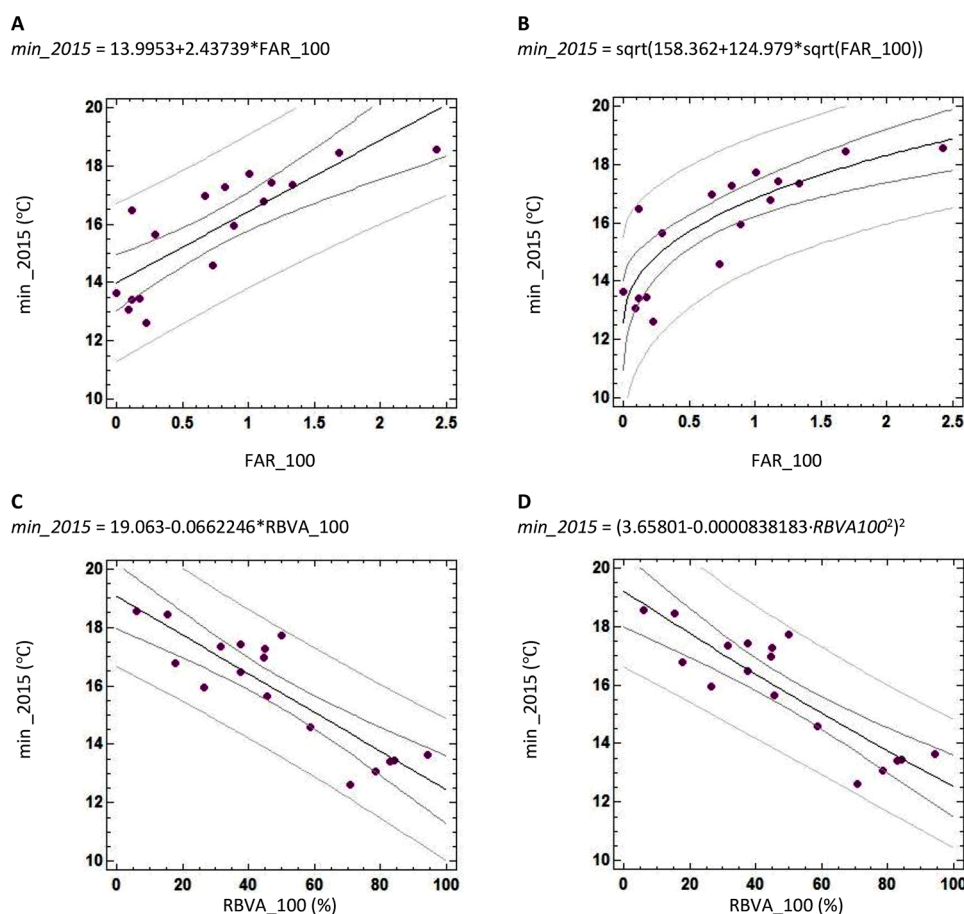


Fig. 3. The linear models (A, C) and the best-fitted alternative curvilinear models (B, D) for minimum air temperature and FAR_{100} (A, B) or $RBVA_{100}$ (C, D) in August 2015. Source: own elaboration.

In this paper, every spatial development indicator characterizing built-up and green areas showed a statistically significant influence on at least one of the thermal characteristics. Most of the strong correlations concerned the daily average or the lowest air temperatures (avg, min, $k10$, $k5$, $k1$). As only periods of radiant weather were covered by the study, these low temperatures occurred mainly at night, not long before sunrise. The results confirmed that urban structures influence minimum air temperature more than they influence maximum temperatures, following principle that is seen for the canopy layer urban heat island – present at night and vanishing during the day (Błażejczyk et al., 2014; Fortuniak, 2001; Igergård, 2021; Weng, 2001; Zardo, Geneletti, Pérez-Soba & Van Eupen, 2017).

Many types of indicators are used to describe the horizontal and vertical features of urban areas. They usually take into account share of the area occupied by buildings, their height, or the number of floors. One of the most basic and common indicators is BCR. Building coverage affects the local thermal microclimate, especially if a radius of at least 100 m is analysed. However, indicators with vertical elements like FAR and BH_{max} showed a stronger correlation with the thermal indexes than BCR did. In the analysed hot months, the lowest daily air temperature values were significantly higher when the area occupied by buildings was larger, and more importantly, when the buildings were higher. However, although BH_{mean} takes into account the vertical parameter, it rarely shows a statistically significant impact on air temperature characteristics. The reason may be the presence of low buildings, especially those with a large surface area, which strongly modify BH_{mean} value. If there are tall buildings within a short distance of a measurement point, the remaining buildings may have a smaller effect on the microclimate. The best-fitted model describing the relationships between built-up areas and thermal indexes is the Reciprocal-Y squared-X model (No.1). The Linear model was well-fitted for only 42 out of 816 pairs. This indicates that although many of the pairs do show a linear relationship, the association between them is better illustrated by other curvilinear trend lines because the increase/decrease in the value of air temperature characteristics caused by the increase in spatial development indicator values is unsteady.

The presence of a relationship between the structure of built-up areas as described by spatial development indicators and thermal conditions is confirmed by Xu et al. (2017). The authors indicated that satellite-derived urban morphology can be used in urban climate research. To systematize information about the thermal conditions characteristic of urbanized areas with various features, classifications were created taking into account their surface structure, cover, fabric, and human activity (Auer, 1978; Ellefsen, 1991; Oke, 2004). Furthermore, Stewart and Oke (2012) showed that thermal contrasts between local climate zones are driven mainly by land cover and building geometry, and that the latter plays the greatest role in temperature differentiation. Zhang, Li and Hu (2022) came to similar conclusions in the case of the impact of urban morphology on thermal comfort. Indexes describing only horizontal parameters at pedestrian height were less correlated with outdoor mean radiant temperature and physiological equivalent temperature than urban morphology indicators describing both vertical and horizontal parameters (Zhang, Zhang, Chen, Tan & Chan, 2022). Vertical features of buildings, being a reflection of the size of the shaded area, which affects the rate of surface heating by limiting or allowing radiation influx, significantly affect thermal comfort.

Urban greenery plays a very important role in strategies for adapting to climate change and mitigating UHI. Planners use several different eco-spatial indicators describing greenery, including: the Ratio of Biologically Vital Area, the Biotope Area Factor, the Seattle Green Factor, the Malmo Green Factor, and the Green Plot Ratio (Hagen & Stiles, 2010; Hirst, Morley & Bang, 2008; Ong, 2003; Szulczewska et al., 2014). Each of them is used in a different region and involves different scoring systems that take into account various spatial elements of greenery. The first one has been widely used in Poland since 1993. Its key advantage is simplicity and ease of application. Szulczewska et al. (2014) observed a

significant correlation between RBVA and environmental performance. The level of RBVA in housing estates that provides a better thermal environment for humans has been established to be at least 42% (Szulczewska et al., 2014). An almost linear correlation between environmental conditions and RBVA was observed. In this paper, out of 204 statistically significant thermal characteristic-RBVA pairs, the linear model was the best fitted for only 7 of them, and the Double squared model (No. 3) was dominant.

Furthermore, a strong mitigating effect of urban greenery during hot periods has been shown by Top, Milošević, Caluwaerts, Hamdi and Savić (2020). They demonstrated that the urban park was the most comfortable area with the lowest mean Physiological Equivalent Temperature in Ghent (Belgium) during two heat waves (2017, 2019). The reasons for this are an absence of direct shortwave radiation and the evapotranspiration phenomenon seen in plants. The thesis about the mitigating effect of greenery is also confirmed by sources that are more easily available than air temperature data: on the correlation between vegetation indexes and land surface temperatures (Aram, García, Solgi & Mansournia, 2019; Voogt & Oke, 2003; Wang, Wang, Meng, Zhou & Wang, 2023), and between the presence of trees and ground surface temperatures (Petri, Wilson & Koeser, 2019). However, the strength of the relationship may depend on the type of urban greenery, because some studies indicate that trees modify thermal conditions and outdoor thermal comfort more strongly than meadows (Zhang et al., 2022).

Currently, green belts, green wedges, and greenways are being created to protect urban green areas. However, this is not enough to design a space that would be resident-friendly also in extremely warm periods. This paper shows that to ensure thermal comfort, large biologically vital areas are necessary in human surroundings. Moreover, preserving green areas in cities not only benefits human health, biodiversity, and the quality of the environment but also brings measurable financial profits (Hill, Dorfman & Kramer, 2010).

Spatial development indicators have been used in urban planning since antiquity to describe the current state, planning, and forecasting of the development of urban areas (Bradecki, 2021). Currently, one of the most important urban planning documents in Poland is the Study of Conditions and Directions of Spatial Development of the Commune, which includes selected spatial development indicators. However, the exchange of information between climatologists and urban planners or local governments is still insufficient. In light of the growing awareness of climatic threats, it is necessary to elaborate more precise but still comparatively simple guidelines with the best land use indicators from the point of view of the climate, to be used among others in legal documents. This article contributes to a better understanding of the impact the urban environment has on creating thermal conditions, especially in less intensively built-up cities in temperate climates. The results may be useful both to urban climatologists, including those involved in microclimate modeling, and to policymakers involved in city planning. Further research on the topic is necessary, including analysis areas of other sizes, cities with different structures or climates, and possibly with the use of machine learning technology.

5. Conclusions

The most relevant results and conclusions of the present study, which link the most common spatial development indicators used in urban planning and in planning documents with air temperature values from 21 sites, are as follows:

- (1) Among the different land use characteristics, the Ratio of Biologically Vital Areas showed the strongest impact on the thermal characteristics of a given site, influencing average and minimum temperatures (min, $k10$, and $k5$) particularly strongly. This means that during a hot period the higher the RBVA, the more intensive the mitigation effect noted. Hence this indicator should be taken into account not only in urban analyses dealing with climate

change but also in urban planning that aim to mitigate the effects of climate change.

- (2) Of the built-up indicators, FAR and BHmax, showed the highest correlation with the thermal environment, indicating that the vertical parameters of buildings have a key influence on the thermal microclimate.
- (3) For most indicators, a radius of 100 m turned out to be the most appropriate for assessing the influence of a site's surroundings on thermal conditions. Spatial development indicators calculated for an area of up to 10 m from stations rarely correlated with thermal characteristics. Therefore, research should be continued for bigger plots and radiuses above 100 m.

In the case of the majority of the relationships, an increase in the values of spatial development indicators (e.g. the size of green area, vertical or horizontal parameters of buildings) causes an unsteady increase/decrease in the values of temperature characteristics. The linear model fits only 4.8% of pairs the best.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Spatial development data is available online; Air temperature data is semi-private, but the authors are willing to cooperate

Supplementary materials

Supplementary material associated with this article can be found, in the online version, at [doi:10.1016/j.scs.2023.105014](https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105014).

References

- Alcorado, M. J., Andrade, H., Lopes, A., & Vasconcelos, J. (2009). Application of climatic guidelines to urban planning. The example of Lisbon (Portugal). *Landscape and Urban Planning*, 90, 56–65. <https://doi.org/10.1016/2Fj.landurbplan.2008.10.006>
- Al-Obaidi, I., Rayburg, S., Pótrolniczak, M., & Neave, M. (2021). Assessing the impact of wind conditions on urban heat islands in large Australian Cities. *Journal of Ecological Engineering*, 22(11), 1–15. <https://doi.org/10.12911/2298993/142967>
- Aram, F., García, E. H., Solgi, E., & Mansournia, S. (2019). Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 5, e01339. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>
- Auer, A. H. (1978). Correlation of land use and cover with meteorological anomalies. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 17, 636–643. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)-017<0636:COLUA-C>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)-017<0636:COLUA-C>2.0.CO;2)
- Bassett, R., Janes-Bassett, V., Phillipson, J., Young, P. J., & Blair, G. S. (2021). Climate driven trends in London's urban heat island intensity reconstructed over 70 years using a generalized additive model. *Urban Climate*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100990>
- Birkmann, J., Sauter, H., Garschagen, M., Fleischhauer, M., Puntub, W., Klose, C., & Büter, B. (2021). New methods for local vulnerability scenarios to heat stress to inform urban planning—Case study City of Ludwigsburg/Germany. *Climatic Change*, 165(1–2). <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03005-3>
- Błażejczyk, K., Kuchcik, M., Błażejczyk, A., Milewski, P., & Szmyd, J. (2014a). Assessment of urban thermal stress by UTCI – experimental and modelling studies: An example from Poland. *Die Erde; Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin*, 145(1–2), 16–33.
- Błażejczyk, K., Kuchcik, M., Milewski, P., Dudek, W., Kręcis, B., Błażejczyk, A., Szmyd, J., Degórska, B., & Palczyński, C. (2014b). Miejska wyspa ciepła w Warszawie. uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne. polska akademia nauk, instytut geografii i przestrzennego zagospodarowania. wydawnictwo akademickie sedno, Warsaw.
- Błażejczyk, K., Twardosz, R., Walach, P., Czarnecka, K., & Błażejczyk, A. (2022). Heat strain and mortality effects of prolonged central European heat wave—An example of June 2019 in Poland. *International Journal of Biometeorology*, 66, 149–161. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02202-0>
- Bradecki, T. (2021). *Wskaźniki, parametry i modele w kształtowaniu intensywniej wielorodzinnej zabudowy mieszkaniowej*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- Cheung, P. K., & Jim, C. Y. (2019). Effects of urban and landscape elements on air temperature in a high-density subtropical city. *Building and Environment*, 164, Article 106362. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106362>
- Chief Inspectorate for Environmental Protection. (2018). CORINE land cover accessed: 01.03.2022. <https://clc.gios.gov.pl/index.php/clc-2018/udostepnianie>.
- Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I. D., van Vliet, J., & Bechtel, B. (2022). *Global map of local climate zones (1.0.0) [Data set]*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6364594>
- 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, Article 100498. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100498>
- Ellefsen, R. (1991). Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities. *Energy Buildings*, 15–16, 1025–1049. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90097-M](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90097-M)
- Flynn, A., McGreevy, C., & Mulkerrin, E. (2005). Why do older patients die in a heatwave? *International Journal of Medicine*, 98, 227–229. <https://doi.org/10.1093/qjmed/hci025>
- Fortuniak, K. (2001). Wpływ właściwości termicznych podłoża na intensywność miejskiej wyspy ciepła – analiza modelowa nocnego wychładzania powierzchni gruntu. *Prace i Studia Geograficzne*, 29, 297–302.
- Forwood, B., Hayman, S., & Tadeipalli, S. (2000). Thermal comfort in urban open spaces. In R. J. De Dear (Ed.), *Biometeorology and urban climatology at the turn of the millennium: Selected papers from the conference ICB-ICUC'99 (Sydney, 8–12 november 1999)*. Geneva: World Meteorological Organization (WMO/TD No. 1026, WCASP-50).
- Gaitani, N., Spanou, A., N. Saliari, M., Synnefa, A., Vassilakopoulou, K., Papadopolou, K., Pavlou, K., Santamouris, M., Papaioannou, M., & Lagoudaki, A. (2011). Improving the microclimate in urban areas: A case study in the centre of Athens. *Building Services Engineering Research and Technology*, 32(1), 53–71. <https://doi.org/10.1177/2F0143624410394518>
- Givoni, B. (1986). Design for climate in hot, dry cities. In T. R. Oke (Ed.), *Proceedings of the Urban Climatology and its Applications with Special Regard to Tropical Areas. Proceedings of the Technical Conference, Mexico D.F., 26–30 November 198* (pp. 487–513). Geneva: World Meteorological Organization. WMO No. 652.
- Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Heat storage in urban areas: Observations and evaluation of a simple model. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 922–940.
- Hagen, K., & Stiles, R. (2010). Contribution of landscape design to changing urban climate conditions. In N. Müller, P. Werner, & J. G. Kelcey (Eds.), *Urban biodiversity and design* (pp. 572–592). Oxford: Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/-9781444318654.ch31>
- Harman, I. N., Barlow, J. F., & Belcher, S. E. (2004). Scalar fluxes from urban street canyons, Part II: Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 113, 387–410. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-6205-7>
- Hill, E., Dorfman, J. H., & Kramer, E. (2010). Evaluating the impact of government land use policies on tree canopy coverage. *Land use policy*, 27(2), 407–414. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.05.007>
- Hirst, J., Morley, J., & Bang, K. (2008). Functional landscapes: Assessing elements of Seattle green factor. International report. The Berger Partnership PS.
- Igergård, F. (2021). Addressing the urban heat island effect in stockholm. over and urban planning. Stockholm: Degree Project in Environmental Engineering and Sustainable Infrastructure KTH Royal Institute of Technology School of Architecture and Built Environment.
- Information Report No. 111. (1958). Floor area ratio. american society of planning officials, 1313 east 60th street — Chicago 37 illinois.
- IPCC (2023). Summary for policymakers in: 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 [Core writing team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC, pp. 1–34, doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- Jagarnath, M., Thambiran, T., & Gebreslasie, M. (2020). Heat stress risk and vulnerability under climate change in Durban metropolitan, South Africa—Identifying urban planning priorities for adaptation. *Climatic Change*, 163, 807–829. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02908-x>
- Klimakvarter. (2013). *København's første klimakvarter - Vision, baggrund og projekter*. Copenhagen: Københavns Kommune.
- Köppe, C., Kovats, S., Jendritzky, G., & Menne, B. (2004). *Heat-waves: Risks and responses. Health and global environmental change series, no. 2*. Copenhagen, Denmark: WHO Europe.
- 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., & Milewski, P. (2016). Miejska wyspa ciepła w Warszawie – próba oceny z wykorzystaniem Local Climate Zones = Urban heat island in Warsaw – an attempt at assessment with the use of Local Climate Zones method. *Acta Geographica Lodziensis*, 104, 21–33.
- Kuchcik, M. (2017). Zmiany warunków termicznych w Polsce na przełomie XX i XXI wieku i ich wpływ na umieralność = Thermal conditions in Poland at the turn of the 20th and 21st centuries, and their impact on mortality. *Geographical Studies*, 263. Warsaw: IGSO PAS.
- Kysely, J. (2009). Recent severe heat waves in central Europe: How to view them in a long-term prospect? *International Journal of Climatology*, 30(1). <https://doi.org/10.1002/joc.1874>
- Lin, C., Kjellström, E., Wilcke, R. A. I., & Chen, D. (2022). Present and future European heat wave magnitudes: Climatologies, trends, and their associated uncertainties in GCM-RCM model chains. *EGU sphere*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-215>
- Lin, T. P., Tsai, K. T., Hwang, R. L., & Matzarakis, A. (2012). Quantification of the effect of thermal indices and sky view factor on park attendance. *Landscape and Urban Planning*, 107, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.05.011>

- Matzarakis, A. (2012). RayMan and SkyHelios Model - Two Tools for Urban Climatology. 8th symposium of the Environmental Meteorology Committee of the German Meteorological Society. Leipzig, 1–6.
- 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, 323–334. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>
- 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, 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>
- Müller, U. (1997). Beziehungen zwischen urbanen Flächennutzungsstrukturen und klimatischen Verhältnissen am Beispiel der Stadtregion Leipzig. *UFZ-Bericht*, 2.
- Offerle, B., Grimmond, C. S. B., & Fortuniak, K. (2005). Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology*, 25, 1405–1419. <https://doi.org/10.1002/joc.1198>
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 7, 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T.R. (1997). Urban climates and global environmental change. Thompson, R.D., Parry, A.H. eds. Applied climatology: Principles and practice 273–287. London. doi:10.1016/B978-0-12-386917-3.00003-8.
- Oke, T.R. (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. IOM rep. 81, WMO/TD-No. 1250, (47). Canada.
- Oleson, K. W., Anderson, G. B., Jones, B., McGinnis, S. A., & Sanderson, B. (2018). Avoided climate impacts of urban and rural heat and cold waves over the U.S. using large climate model ensembles for RCP8.5 and RCP4.5. *Climate Change*, 146(3–4), 377–392. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1504-1>
- Ong, B. L. (2003). Green plot ratio: An ecological measure for architecture and urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 63, 197–211. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00191-3](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00191-3)
- Petri, A. C., Wilson, B., & Koeser, A. (2019). Planning the urban forest: Adding microclimate simulation to the planner's toolkit. *Land use policy*, 88, Article 104117. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104117>
- Population Division, Department of Economic and Social Affairs, United Nations. (2019). World urbanization prospects: The 2018 revision; population division, department of economic and social affairs. New York: United Nations.
- Polan, S. (2022a).tatistcd, s.Powiat m. st. warszawa. category: Population. Years: 2021. Last update: 21.03.2022. Warsaw.
- Polan, S. (2022b).tatistcd, s.Powiat m. st. warszawa. category: Territorial division. Years: 2021. Last update: 23.02.2022. Warsaw.
- Qi, F., Zhai, J., & Dang, G. (2016). Building height estimation using Google Earth. *Energy and Buildings*, 118, 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.044>
- Ren, C., Ng, E. Y. Y., & Katschnner, L. (2010). Urban climatic map studies: A review. *International Journal of Climatology*, 31(15), 2213–2233. <https://doi.org/10.1002/joc.2237>
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, E., Bisegna, F., Nardecchia, F., Coppi, M., Gugliermetti, F., & de Lieto Vollaro, A. (2015). Evaluation of different urban microclimate mitigation strategies through a PMV analysis. *Sustainability*, 7, 9012–9030. <https://doi.org/10.3390/su7079012>
- Salata, F., Golasi, I., Petitti, D., de Lieto Vollaro, E., Coppi, M., & de Lieto Vollaro, A. (2017). Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: An analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment. *Sustainable Cities and Society*, 30, 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.006>
- Santamouris, M., Xirafi, F., Gaitani, N., Spanou, A., Saliari, M., & assilakopoulou, K. (2012). Improving the microclimate in a dense urban area using experimental and theoretical techniques – The case of Marousi, Athens. *International Journal of Ventilation*, 11(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/14733315.2012.11683966>
- Semenza, J., Rubin, C., Falter, K., Selanikio, J., Flanders, W. D., Howe, H., & Wilhelm, J. (1996). Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago. *The New England Journal of Medicine*, 335(2), 84–90. <https://doi.org/10.1056/nejm199607113350203>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Sulikowska, A., & Wypych, A. (2020). How unusual were June 2019 temperatures in the context of European climatology? *Atmosphere*, 11, 697. <https://doi.org/10.3390/atmos11070697>
- 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>
- Taleghani, M., Kleerekoper, L., Tenpierik, M., & van den Dobbelsteen, A. (2015). Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands. *Building and Environment*, 83, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.014>
- The Special Policy for Warsaw. (2010). The capital city of Warsaw. <https://architektura.um.warszawa.pl/-/studium-uwarunkowan-i-kierunkow-zagospodarowania-prze-strzennego-warszawy>.
- Top, S., Milošević, D., Caluwaerts, S., Hamdi, R., & Savić, S. (2020). Intra-urban differences of outdoor thermal comfort in Ghent on seasonal level and during record-breaking 2019 heat wave. *Building and Environment*, 185(107103). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107103>
- Tsichritzis, L., & Nikolopoulou, M. (2019). The effect of building height and façade area ratio on pedestrian wind comfort of London. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 191, 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.05.021>
- Twardosz, R. (2019). Anomalously warm months in 2018 in Poland in relation to airflow circulation patterns. *Weather*, 74(11), 374–382. <https://doi.org/10.1002/wea.3588>
- Twardosz, R., & Kossowska-Cezak, U. (2021). Large-area thermal anomalies in Europe (1951–2018). Temporal and spatial patterns. *Atmospheric Research*, 105434, 251. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02860>
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Wang, Q., Wang, H., Meng, Y., Zhou, Y., & Wang, H. (2023). Exploring the impact of urban features on the spatial variation of land surface temperature within the diurnal cycle. *Sustainable Cities and Society*, 91, Article 104432. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104432>
- Weng, Q. (2001). A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface tempera- temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 22(10), 2199–2204. <https://doi.org/10.1080/713860788>
- Xu, Y., Ren, C., Ma, P., Ho, J., Wang, W., Ka-Lun Lau, K., Lin, H., & Ng, E. (2017). Urban morphology detection and computation for urban climate research. *Landscape and Urban Planning*, 167, 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.06.018>
- Zardo, L., Geneletti, D., Pérez-Soba, M., & Van Eupen, M. (2017). Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning. *Ecosystem Services*, 26A, 225–235. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.06.016>
- Zhang, J., Li, Z., & Hu, D. (2022). Effects of urban morphology on thermal comfort at the micro-scale. *Sustainable Cities and Society*, 86, Article 104150. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104150>
- Zhang, M., Zhang, F., Chen, D., Tan, M. L., & Chan, N. (2022). Urban local surface temperature prediction using the urban gray-green space landscape and vegetation indices. *Building and Environment*, 226(109723). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109723>

Spatial development indicators as a tool to determine thermal conditions in an urban environment: electronic supplementary material

Kaja CZARNECKA*, Magdalena KUCHCIK, Jarosław BARANOWSKI

*Climate Research Department, Polish Academy of Sciences, Institute of Geography and Spatial Organization,
Twarda 51/55, Warsaw 00-818, Poland*

*Corresponding author.

E-mail address: czarnecka@twarda.pan.pl (K. CZARNECKA).

Table 1. The description of measuring sites

No.	Land cover	Land use	LCZ	SVF	Years
1	Discontinuous urban fabric	Single-family housing development	open low-rise	0.8	2010, 2015, 2018
2	Discontinuous urban fabric	Services: social/education	open high-rise	0.3	2015, 2018
3	Discontinuous urban fabric	Services: social/education	open midrise	0.3	2010, 2015, 2018
4	Continuous urban fabric	Technical infrastructure	open midrise	0.6	2018, 2019
5	Discontinuous urban fabric	Services: social/education	open midrise	0.2	2018
6	Continuous urban fabric;	Multi-family housing development	compact midrise	0.1	2010, 2015, 2018, 2019
7	Discontinuous urban fabric	Multi-family housing development with a high ratio of greenery	open midrise	0.3	2010, 2015, 2018, 2019
8	Continuous urban fabric	Multi-family housing development with a high ratio of greenery	open midrise	0.4	2010, 2015, 2018, 2019
9	Discontinuous urban fabric	Single-family housing development	sparsely build	0.3	2010, 2015, 2018, 2019
10	Discontinuous urban fabric	Services: office	open high-rise	0.5	2010, 2015, 2018, 2019
11	Discontinuous urban fabric	Undeveloped areas and greenery	open midrise	0.3	2010, 2015, 2018, 2019

12	Discontinuous urban fabric	Urban greenery	scattered trees	0.5	2018, 2019
13	Industrial or commercial units	Technical infrastructure	low plants	0.8	2015, 2018, 2019
14	Discontinuous urban fabric	Services: social	open high-rise	0.3	2010, 2015, 2018, 2019
15	Discontinuous urban fabric	Multi-family housing development with a high ratio of greenery	open midrise	0.2	2010, 2015, 2018,
16	Discontinuous urban fabric	Urban greenery	scattered trees	0.7	2015, 2018, 2019
17	Coniferous forest	Services: science	dense trees	0.2	2015, 2018, 2019
18	Discontinuous urban fabric	Services: science	compact midrise	0.2	2010, 2015, 2018, 2019
19	Discontinuous urban fabric	Multi-family housing development	open midrise	0.3	2018, 2019
20	Industrial or commercial units	Undeveloped areas and greenery	open midrise	0.4	2010, 2015, 2018, 2019
21	Discontinuous urban fabric	Multi-family housing development	open midrise	0.5	2010, 2015, 2018, 2019

Source: Land cover from Chief Inspectorate for Environmental Protection, Corine Land Cover (2018); Land use from The Special Policy for Warsaw (2010); Local Climate Zone (LCZ) from Kuchcik and Milewski (2016) and Demuzere et al. (2022); Sky View Factor (SVF) estimated using RayMan Pro 3.1 (Matzarakis, 2012; Matzarakis et al., 2007; Matzarakis et al., 2010).

Table 2. The values of analysed spatial development indicators: FAR, BCR(%), RBVA(%), BH_{mean}(m) and BH_{max}(m)

Station number	FAR			BCR			RBVA			BH _{mean}			BH _{max}		
	10	50	100	10	50	100	10	50	100	10	50	100	10	50	100
1	0.0	0.2	0.1	0.0	8.9	5.5	64.6	67.4	78.7	0.0	7.2	6.2	0.0	11.0	11.0
2	0.0	1.0	0.7	0.0	22.2	10.7	78.3	56.3	58.6	0.0	14.5	21.0	0.0	42.0	42.0
3	0.0	0.8	0.7	0.0	19.0	15.9	29.6	39.3	44.6	0.0	15.1	15.7	0.0	37.0	37.0
4	0.0	0.2	0.2	0.0	12.5	11.9	62.4	29.2	32.4	0.0	7.4	8.1	0.0	10.0	17.0
5	0.0	1.2	0.9	1.9	22.4	18.8	45.9	56.8	47.9	8.0	16.4	16.8	8.0	31.0	31.0
6	1.2	2.8	2.4	17.2	44.7	45.0	31.8	5.6	5.9	27.9	25.1	22.0	28.0	29.0	33.0
7	0.0	0.9	0.9	0.0	23.6	22.8	99.4	29.1	26.3	0.0	13.2	14.3	0.0	17.0	23.0
8	0.0	0.6	1.1	0.0	15.5	22.8	52.9	19.6	17.9	0.0	14.8	16.6	0.0	31.0	35.0
9	0.4	0.2	0.2	41.7	14.5	13.4	34.7	67.4	70.9	6.0	7.2	8.1	6.0	10.0	11.0
10	0.0	0.2	0.8	1.9	8.0	13.9	70.7	52.9	44.9	9.0	10.9	21.3	9.0	34.0	37.0
11	0.0	0.2	0.1	2.2	9.7	5.5	76.1	24.7	37.6	8.0	7.3	7.8	8.0	8.0	16.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	86.3	91.3	93.2	0.0	0.0	7.7	0.0	0.0	8.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	79.9	96.4	94.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.2	0.3	1.0	12.1	9.4	18.2	32.8	59.9	50.0	9.0	12.8	18.0	9.0	30.0	41.0
15	2.8	0.9	1.2	25.5	14.5	25.4	63.4	46.8	37.4	31.0	18.9	15.6	31.0	31.0	31.0
16	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	6.6	100.0	95.8	83.0	0.0	0.0	5.4	0.0	0.0	6.0
17	0.0	0.2	0.2	0.0	5.4	5.8	84.4	82.9	84.2	0.0	13.0	13.1	0.0	13.0	16.0
18	0.5	2.4	1.7	12.3	47.4	32.8	17.5	8.4	15.4	14.0	13.3	14.1	21.0	29.0	29.0
19	0.6	0.7	1.1	14.0	18.9	26.4	82.8	51.4	39.1	10.0	6.5	5.4	14.0	19.0	19.0
20	0.0	0.3	0.3	0.0	14.0	19.2	99.4	63.2	45.6	0.0	18.0	17.7	10.0	10.0	17.0
21	0.0	1.4	1.3	0.0	27.7	27.0	70.1	38.5	31.5	8.0	16.4	16.8	0.0	21.0	27.0

Source: own elaboration

Table 3. Correlation between thermal characteristics and spatial development indicators

indicator	year	min	min d	min u	min a	max	max a	avg	k1	k5	k10	k90	k95	up	down
FAR10	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	-	-	-	-	-0.48	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FAR50	2010	0.63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	0.66	-	-	-	-	-	0.55	-0.51	-0.58	-0.68	-	-	-	0.49
	2018	0.63	0.52	-	-	-	-	0.54	-0.44	-0.52	-0.54	-	-	-0.48	0.57
	2019	0.62	-	-	-	-	-	0.52	-	-	-0.58	-	-	-0.62	0.64
FAR100	2010	0.76	-	-	-	-	-	0.63	-	-	-0.59	-	-	-	-
	2015	0.81	-	-0.52	-0.51	-	-	0.67	-0.65	-0.75	-0.84	-	-	-	0.54
	2018	0.76	0.64	-	-0.57	-	-	0.66	-0.53	-0.64	-0.65	-	-	-	0.47
	2019	0.75	-	-0.53	-	-	-	0.62	-	-0.63	-0.71	-	-	-0.57	0.58
BCR10	2010	-	-	-	-	-	-	-	0.60	-	-	-	-	-	-
	2015	-	-	-	-	-	0.66	-	-	-	-	-	-	-0.50	-
	2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2019	-	-	-	-	-	-	-	0.52	-	-	-	-	-	-
BCR50	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	0.63	-	-	-	-	-	0.58	-0.51	-0.57	-0.65	-	-	-	-
	2018	0.61	0.44	-	-	-	-	0.60	-	-0.52	-0.54	-	-	-	0.51
	2019	0.63	-	-	-	-	-	0.60	-	-0.52	-0.60	-	-	-0.54	0.57
BCR100	2010	0.63	-	-	-	-	-	0.56	-	-	-	-	-	-	-
	2015	0.77	-	-	-0.49	-	-	0.63	-0.62	-0.73	-0.80	-	-	-	0.49
	2018	0.71	0.51	-	-0.52	-	-	0.71	-0.46	-0.59	-0.61	-	-	-	-
	2019	0.69	-	-	-	-	-	0.69	-	-0.58	-0.65	-	-	-0.53	0.55

RBVA10	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	-	-	-	-	-	-0.50	-	-	-	0.51	-	-	0.52	-
	2018	-0.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.49	-
	2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RBVA50	2010	-0.69	-	-	-	-	-	-	-	0.68	0.66	-	-	-	-
	2015	-0.79	-0.53	-	0.59	-	-	-0.76	0.75	0.79	0.80	-	-	0.57	-0.70
	2018	-0.76	-0.48	-	-	-	-	-0.78	0.61	0.74	0.74	-	-	-	-0.44
	2019	-0.80	0.58	0.58	-	-	-	-0.78	0.54	0.79	0.83	-	-	0.58	-0.63
RBVA100	2010	-0.80	-	-	-	-	-	-0.65	0.66	0.78	0.77	-	-	-	-
	2015	-0.87	-0.56	0.55	0.64	-	-	-0.85	0.85	0.88	0.88	-	-	0.52	-0.68
	2018	-0.83	-0.49	-	0.49	-	-	-0.88	0.68	0.79	0.79	-	-	-	-
	2019	-0.84	0.53	0.62	0.51	-	-	-0.87	0.61	0.82	0.85	-	-	0.59	-0.63
BH _{mean} 10	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	0.61	-	-0.60	-0.59	-0.52	0.49	-	-	-0.57	-0.61	-0.57	-0.57	-	-
	2018	0.59	0.48	-	-	-0.44	-	-	-	-0.47	-0.48	-	-	-	-
	2019	0.59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BH _{mean} 50	2010	0.61	-	-	-	-	-	0.56	-	-	-	-	-	-	-
	2015	0.67	-	-	-	-	-	0.59	-0.64	-0.68	-0.65	-	-	-	-
	2018	0.58	-	-	-0.48	-	-	0.51	-	-0.48	-0.51	-	-	-	0.54
	2019	0.55	-	-	-	-	-	0.50	-	-	-0.51	-	-	-0.54	0.51
BH _{mean} 100	2010	0.70	-	-	-	-	-	0.74	-0.58	-0.59	-0.64	-	-	-	-
	2015	0.67	-	-	-	-	-	0.69	-0.70	-0.69	-0.65	-	-	-	-
	2018	0.55	0.48	-	-0.53	-	-	0.47	-	-0.49	-0.52	-	-	-	0.47
	2019	0.57	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.53	-	-	-	-

BH _{max} 10	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	0.59	-	-0.62	-0.58	-	-	-	-	-0.55	-0.60	-0.49	-0.50	-	-
	2018	0.56	-	-	-	-	-	-	-	-0.44	-0.46	-	-	-	-
	2019	0.54	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.54	-	-	-0.50	-
BH _{max} 50	2010	0.68	-	-	-	-	-	-	-0.57	-	-0.64	-	-	-	-
	2015	0.64	-	-0.50	-0.52	-	-	0.67	-0.64	-0.66	-0.63	-	-	-	-
	2018	0.66	0.56	-	-0.58	-	-	0.50	-0.54	-0.64	-0.63	-	-	-0.45	0.55
	2019	0.73	-	-0.56	-	-	-	0.56	-	-0.67	-0.74	-	-	-	-
BH _{max} 100	2010	0.77	-	-	-	-	-	0.59	-0.68	-0.67	-0.75	-	-	-0.57	-
	2015	0.72	0.50	-0.49	-0.54	-	-	0.75	-0.74	-0.75	-0.71	-	-	-	-
	2018	0.71	0.58	-	-0.60	-	-	0.59	-0.60	-0.70	-0.70	-	-	-0.45	0.52
	2019	0.77	-0.55	-0.61	-	-	-	0.61	-0.53	-0.73	-0.76	-	-	-	-

Bold values indicate a statistically significant correlation at the level of 0.01. Unbold values indicate a statistically significant correlation at the level of 0.05. “-“ indicates no correlation. Thermal characteristics that didn’t show a statistically significant correlation in any year, indicator and distance were not included.

Source: own elaboration

Table 4. Share of overlapping groups of clusters (%)

indicator	year	min	min d	min u	min a	max	max a	avg	k1	k5	k10	k90	k95	up	down
FAR10	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	-	-	-	-	23.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FAR50	2010	38.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	29.4	-	-	-	-	-	23.5	29.4	29.4	23.5	-	-	-	28.6
	2018	28.6	33.3	-	-	-	-	28.6	19.0	28.6	33.3	-	-	14.3	9.5
	2019	25.0	-	-	-	-	-	5.9	-	-	31.3	-	-	31.3	25.0
FAR100	2010	15.4	-	-	-	-	-	30.8	-	-	53.8	-	-	-	-
	2015	41.2	-	35.3	35.3	-	-	47.1	41.2	41.2	47.1	-	-	-	19.0
	2018	42.9	42.9	-	47.6	-	-	47.6	66.7	47.6	42.9	-	-	-	19.0
	2019	12.5	-	12.5	-	-	-	41.2	-	25.0	18.8	-	-	37.5	18.8
BCR10	2010	-	-	-	-	-	-	-	23.1	-	-	-	-	-	-
	2015	-	-	-	-	-	29.4	-	-	-	-	-	-	47.1	-
	2018	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2019	-	-	-	-	-	-	-	37.5	-	-	-	-	-	-
BCR50	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	52.9	-	-	-	-	-	52.9	41.2	41.2	52.9	-	-	-	-
	2018	47.6	38.1	-	-	-	-	33.3	-	42.9	47.6	-	-	-	52.4
	2019	68.8	-	-	-	-	-	41.2	-	56.3	68.8	-	-	50.0	68.8
BCR100	2010	53.8	-	-	-	-	-	53.8	-	-	-	-	-	-	-
	2015	64.7	-	-	58.8	-	-	64.7	64.7	64.7	64.7	-	-	-	33.3
	2018	61.9	42.9	-	61.9	-	-	57.1	42.9	57.1	52.4	-	-	-	-
	2019	56.3	-	-	-	-	-	76.5	-	43.8	50.0	-	-	37.5	31.3

RBVA10	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	-	-	-	-	-	35.3	-	-	-	35.3	-	-	58.8	-
	2018	38.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47.6	-
	2019	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RBVA50	2010	46.2	-	-	-	-	-	-	-	53.8	53.8	-	-	-	-
	2015	64.7	52.9	-	58.8	-	-	58.8	64.7	64.7	58.8	-	-	52.9	52.4
	2018	61.9	57.1	-	-	-	-	57.1	52.4	57.1	52.4	-	-	-	38.1
	2019	56.3	37.5	56.3	-	-	-	76.5	50.0	56.3	50.0	-	-	43.8	37.5
RBVA100	2010	76.9	-	-	-	-	-	76.9	38.5	69.2	53.8	-	-	-	-
	2015	64.7	41.2	41.2	52.9	-	-	82.4	64.7	64.7	70.6	-	-	47.1	42.9
	2018	61.9	47.6	-	57.1	-	-	57.1	42.9	57.1	52.4	-	-	-	-
	2019	68.8	25.0	62.5	50.0	-	-	88.2	62.5	68.8	62.5	-	-	43.8	50.0
BH _{mean} 10	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	35.3	-	41.2	52.9	52.9	47.1	-	-	35.3	41.2	47.1	41.2	-	-
	2018	28.6	38.1	-	-	47.6	-	-	-	28.6	28.6	-	-	-	-
	2019	68.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BH _{mean} 50	2010	61.5	-	-	-	-	-	61.5	-	-	-	-	-	-	-
	2015	52.9	-	-	-	-	-	41.2	41.2	52.9	52.9	-	-	-	-
	2018	52.4	-	-	47.6	-	-	47.6	-	47.6	52.4	-	-	-	47.6
	2019	56.3	-	-	-	-	-	52.9	-	-	50.0	-	-	43.8	50.0
BH _{mean} 100	2010	76.9	-	-	-	-	-	61.5	46.2	76.9	46.2	-	-	-	-
	2015	47.1	-	-	-	-	-	58.8	35.3	35.3	47.1	-	-	-	-
	2018	52.4	33.3	-	38.1	-	-	28.6	-	38.1	42.9	-	-	-	61.9
	2019	56.3	-	-	-	-	-	-	-	-	56.3	-	-	-	-

BH _{max} 10	2010	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2015	47.1	-	47.1	58.8	-	-	-	-	41.2	52.9	41.2	47.1	-	-
	2018	42.9	-	-	-	-	-	-	-	38.1	38.1	-	-	-	-
	2019	62.5	-	-	-	-	-	-	-	-	56.3	-	-	37.5	-
BH _{max} 50	2010	53.8	-	-	-	-	-	-	23.1	-	23.1	-	-	-	-
	2015	35.3	-	29.4	47.1	-	-	41.2	35.3	35.3	35.3	-	-	-	-
	2018	33.3	33.3	-	33.3	-	-	28.6	19.0	28.6	33.3	-	-	38.1	66.7
	2019	62.5	-	62.5	-	-	-	41.2	-	43.8	56.3	-	-	-	-
BH _{max} 100	2010	38.5	-	-	-	-	-	46.2	53.8	53.8	53.8	-	-	46.2	-
	2015	58.8	58.8	35.3	35.3	-	-	58.8	52.9	52.9	58.8	-	-	-	-
	2018	52.4	52.4	-	47.6	-	-	42.9	33.3	47.6	42.9	-	-	38.1	57.1
	2019	50.0	31.3	50.0	-	-	-	35.3	37.5	68.8	56.3	-	-	-	-

Bold values indicate a match above half of the stations

Source: own elaboration

Table 5. The curvilinear models tested for 1020 matches with the highest R-Squared values (%)

No.	Model	Formula	Match (%)
1	Reciprocal-Y squared-X	$Y = 1/(a + b \cdot X^2)$	18.0
2	Squared-Y Square root-X	$Y = \sqrt{a + b \cdot \sqrt{X}}$	12.5
3	Double squared	$Y = \sqrt{a + b \cdot X^2}$	9.9
4	Square root-X	$Y = a + b \cdot \sqrt{X}$	7.8
5	Reciprocal-Y square root-X	$Y = 1/(a + b \cdot \sqrt{X})$	6.2
6	Reciprocal-Y	$Y = 1/(a + b \cdot X)$	6.0
7	Squared-X	$Y = a + b \cdot X^2$	5.8
8	Square root-Y squared-X	$Y = (a + b \cdot X^2)^2$	5.7
9	Squared-Y	$Y = \sqrt{a + b \cdot X}$	5.4
10	Double reciprocal	$Y = 1/(a + b/X)$	4.5
11	Squared-Y reciprocal-X	$Y = \sqrt{a + b/X}$	2.8
12	Logarithmic-Y square root-X	$Y = \exp(a + b \cdot \sqrt{X})$	2.3
13	Reciprocal-X	$Y = a + b/X$	2.3
14	Squared-Y logarithmic-X	$Y = \sqrt{a + b \cdot \ln(X)}$	1.0
15	Square root-Y	$Y = (a + b \cdot X)^2$	1.0
16	Double square root	$Y = (a + b \cdot \sqrt{X})^2$	0.8
17	Logarithmic-Y squared-X	$Y = \exp(a + b \cdot X^2)$	0.7
18	Square root-Y reciprocal-X	$Y = (a + b/X)^2$	0.6
19	Exponential	$Y = \exp(a + b \cdot X)$	0.6
20	Reciprocal-Y logarithmic-X	$Y = 1/(a + b \cdot \ln(X))$	0.4
21	Square root-Y logarithmic-X	$Y = (a + b \cdot \ln(X))^2$	0.3
22	Logarithmic-X	$Y = a + b \cdot \ln(X)$	0.3
23	Multiplicative	$Y = a \cdot X^b$	0.3
0	Linear	$Y = a + b \cdot X$	4.8
TOTAL			100.0

Source: own elaboration

References

- Chief Inspectorate for Environmental Protection. (2018). Corine Land Cover accessed: 01.03.2022. <https://clc.gios.gov.pl/index.php/clc-2018/udostepnianie>.
- Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I.D., van Vliet, J., Bechtel, B. (2022). Global map of Local Climate Zones (1.0.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6364594>.
- Kuchcik M., Milewski P. (2016). Miejska wyspa ciepła w Warszawie – próba oceny z wykorzystaniem Local Climate Zones = Urban heat island in Warsaw – an attempt at assessment with the use of Local Climate Zones method. *Acta Geographica Lodziensia* 104, 21-33.
- Matzarakis, A. (2012). RayMan and SkyHelios Model - Two Tools for Urban Climatology. 8th symposium of the Environmental Meteorology Committee of the German Meteorological Society. Leipzig, 1-6.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 51, 323–334. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 54, 131–139. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0261-0>.
- The Special Policy for Warsaw. (2010). The capital city of Warsaw. accessed: 01.03.2022. <https://architektura.um.warszawa.pl/-/studium-uwarunkowan-i-kierunkow-zagospodarowania-przestrzennego-warszawy>.



Geographia Polonica

2025, Volume 98, Issue 2, pp. 149-169

<https://doi.org/10.7163/GPol.0297>



INSTITUTE OF GEOGRAPHY AND SPATIAL ORGANIZATION
POLISH ACADEMY OF SCIENCES

www.igipz.pan.pl

www.geographiapolonica.pl

SURFACE TEMPERATURE EXTREMES IN URBAN AREAS: DISTRIBUTION, MORPHOLOGICAL DRIVERS AND AIR TEMPERATURE PATTERNS

Kaja Czarnecka 

Institute of Geography and Spatial Organization, Climate Research Department
Polish Academy of Sciences
Twarda 51/55, 00-818 Warsaw: Poland
e-mail: czarnecka@twarda.pan.pl

Abstract

The expansion of cities, alongside increasing climate-related risks, requires a better understanding of urban thermal patterns for sustainable planning. This study identifies thermal hot and cold spots in Warsaw using 25 land surface temperature (LST) images (2002-2018), air temperature data from 21 sites, spatial development indicators, CORINE Land Cover, and local climate zones. Spatial autocorrelation (Getis-Ord G_i^*) and correlation analyses reveal that LST extremes are related to land cover, spatial development, and city centre proximity. Cluster analysis highlights distinct seasonal and diurnal air temperature regimes in hot/cold spots, emphasizing the need for integrated approaches in urban climate research.

Keywords

cold spot • hot spot • land surface temperature • air temperature • land cover • local climate zones • spatial development

Introduction

Unique characteristics of urban climate are increasingly recognised as critical factors in city design and sustainability. As urbanised areas and their populations expand, comprehending the complex interactions between the built environment and local climate conditions is crucial for effective urban planning and management (Hebbert, 2014). The study of these compounds, along with the clear and accessible communication of their results to

the public, is essential for transforming cities to be resilient to current and projected climate change (Oke, 2006).

The distinctive urban climate characteristics result from the landscape parameters, urban morphology, materials differed in albedo, heat storage and permeability, as well as anthropogenic sources of heat and air pollution, all of which interact with the regional climatic context (Oke, 1982; Kleerekoper et al., 2012; He et al., 2023; Czarnecka et al., 2024). These urban features significantly impact

local and large-scale ecological systems related to environment, health, and socioeconomics (Ai et al., 2024). One consequence is the formation of distinct thermal environments in cities, altering the frequency of thermally specific days and extreme phenomena such as heat and cold waves (Smid et al., 2019). Thermal conditions, even within the city limits, are notably uneven at different scales of analysis. An urban heat island is created on a city-wide scale – a general temperature gradient, with centres commonly warmer than suburban, less densely built-up areas (Oke, 1982; Kuchcik et al., 2024). However, when examining the thermal environment at finer spatial scales within the city, a more complex thermal mosaic emerges. Localized regions of significantly higher or lower land surface temperature can be identified, often forming spatially distinct clusters. These are referred to as thermal hot spots (THS) and thermal cold spots (TCS) (Mavrakou et al., 2018; Gupta, 2024). While the urban heat island effect is the subject of numerous scientific articles, the second phenomenon is less explored.

Thermal hot and cold spots (THCS) are commonly identified from land surface temperature (LST) images due to relatively good spatial resolution, broad coverage and high availability (Feyisa et al., 2016; Jamei et al., 2019; Lehnert et al., 2023). In urban climate studies focusing on THCS, Landsat products are the most commonly utilized (Guerrero et al., 2022; Naserikia et al., 2023), although other satellite data such as Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Grigoraş & Urişescu, 2018; Mavrakou et al., 2018) and Meteosat data (Sismanidis et al., 2017) are also employed. Other sources of information used for the detection of THCS on a much smaller scale are very high-resolution airborne thermal infrared remotely sensed data and semantically segmented longitudinal thermal images (Coutts et al., 2016; Ramani et al., 2024). The resolution and quality of these data are very high, however, the cost of acquiring, processing, and storing them is high, which means that they are not often used in urban research.

A similar principle applies to acquiring other parameters while investigating the details of the urban environment, which supports climate research. Satellite imagery is primarily utilised to calculate indicators related to spatial development – such as vegetation, built-up areas, surface types, and urban geometric composition (Jamei et al., 2019; Hidalgo-García & Arco-Díaz, 2022). Data from Light Detection and Ranging (LIDAR), urban databases and own inventory research are also used. Researchers often utilise various types of land categorisation to facilitate in-depth studies of landscape characteristics and enable comparison of results. This approach includes the use of numerous products with varying temporal and spatial resolutions, such as a regional CORINE Land Cover (CLC) inventory (Copernicus Land Monitoring Service, accessed: 3.09.2024), or a global map of local climate zones (Demuzere et al., 2022). A common approach is also to process satellite images independently to divide the area into self-selected land use/land cover types (Hussain et al., 2023).

Although the literature on the local climate is vast, there are still gaps in knowledge that need to be filled. There is a lack of comprehensive studies examining local thermal anomalies – both hot and cold – across various land cover types and local climate zones, not only those most commonly associated with them but also their relationship with urban morphology and thermal regimes. Therefore, this study aimed to (1) determine the elements of the urban environment associated with the formation of thermally distinctive surface spots and (2) their air temperature patterns. To reach this goal, the author detected thermal THS and TCS in Warsaw and then attempted to answer the following questions: What is the distribution of land surface temperature extremes in the city? What land cover types are associated with the occurrence of thermal hot and cold spots in urban areas? Does spatial development or distance from the city centre affect the occurrence of the spots? Is there a relationship between the frequency of the spots and thermal conditions?

What are the thermal regimes of areas where the spots appear? The research was carried out using both LST images and air temperature (AT) data. A better understanding of the functioning of THCS, considering the properties of both temperature-related parameters, may improve resilient urban planning and enable more accurate development of climate change mitigation strategies.

Study area

Warsaw is a dynamically evolving city with a diverse urban landscape located in east-central Poland, between latitudes 52°06' N and 52°22' N, longitudes 20°51' E and 21°16' E, with an area of 517.24 km² (Office of Architecture and Spatial Planning of the Capital City of Warsaw City Hall, 2018; Statistics Poland, accessed: 14.08.2024). The elevation of Warsaw is from 74.8 to 152 m a.s.l., with an average of approximately 100 m a.s.l. The city is situated in the heartland of the Masovian Plain, on a moraine plateau, Pleistocene terraces and floodplains along the Vistula River. Its spatial development reflects a combination of dense urban cores, sprawling residential districts, road networks, greenery and blue infrastructure, all continuously expanding and becoming more concentrated. Between 2002 and the end of 2018, the population changed from 1,671,730 to 1,777,972 inhabitants. According to the Köppen-Geiger climate classification, Warsaw is located in either temperate oceanic (Cfb) or humid continental climate (Dfb), depending on the classification system used, due to its transitional nature (Peel et al., 2007; Rubel & Kottek, 2010). The climate is characterized by four distinct seasons, with warm summers and cold winters.

Material and methods

Identification of surface temperature extremes

The basis of the analysis consisted of 25 LST maps from 2002 to 2018, which are the outcome of the LIFE_ADAPTCITY_PL project

(Tab. 1) (Dąbrowska-Zielińska et al., 2015, 2019). These products were processed from Landsat images with a resolution resampled to 30 m, whose transit time was between 9:00 and 9:30 a.m. UTC (+/- 15 min) (USGS, accessed: 31.07.2024). The authors of the maps performed atmospheric correction in the ATCOR v. 8.3.1 software, in which the influence of dust and aerosols in the atmosphere on the recorded values of reflected radiation was eliminated, as well as differences resulting from terrain unevenness.

In the following paper, the first step of the analysis was to exclude all surface water areas (the Vistula River, streams and reservoirs) and focus only on land properties. For this purpose, alongside the LST images, the Map of the Hydrographic Division of Poland by State Water Holding – Polish Waters and the Land functionality map of Warsaw 2019 provided by Warsaw City Council were utilised. Secondly, all acquired LST images converted to polygons were processed using the Optimized Hot Spot Analysis based on Getis-Ord Gi* statistic (Incident data aggregation method: count incidents within fishnet grid) in ArcMap 10.2.2. This tool utilizes the parameters derived from the characteristics of the input data to determine the settings that will yield the best hot/cold spot results, analyses the distribution of the weighted features and identifies the appropriate scale for analysis. Utilized spatial autocorrelation identifies hot and cold spots by calculating the degree to which high or low values are clustered within a specific distance from each data point. This paper defines features reflecting the confidence level at 95% and 99% as THS or TCS. The remaining pixels with LST values were named as areas where the effect did not occur – “no effect” (separately for hot and cold spots). Pixels without LST values at a given image (for example, due to cloud cover) were not subjected to Optimized Hot Spot Analysis and were defined as “no data”.

The next stage was the creation of two maps – the frequency of THS and TCS. Twenty-five layers with attributes divided into

Table 1. Satellite imagery data and land surface temperature calculation algorithms

No	Satellite (sensor)	Dates	Algorithm to calculate land surface temperature
1	Landsat 5 (TM)	21.02.2002	$L = C_0 + C_1 \cdot DN$ $T_c = \left[\frac{K_2}{K_1 - \ln L} \right] - 273.15$ where: L - Spectral Radiance; C_0 and C_1 - radiometric calibration coefficients; DN - Digital Number value; K_1 and K_2 - the calibration constants (607.76, 1260.56).
2		13.09.2003	
3		18.09.2005	
4		21.09.2006	
5		03.05.2007	
6		19.05.2007	
7		28.08.2009	
8	Landsat 8 (OLI + TIRS)	19.05.2013	$L_\lambda = M_L DN + A_L$ $T_c = \left[\frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{K_\lambda}\right) + 1} \right] - 273.15$ where: L - Spectral Radiance; M_L - Radiance Multiplier; DN - Digital Number value; A_L - Radiance Add; K_1 and K_2 - radiometric calibration factors (777.89, 1321.08).
9		20.06.2013	
10		08.09.2013	
11		22.05.2014	
12		23.04.2015	
13		14.09.2015	
14		02.04.2016	
15		04.05.2016	
16		05.06.2016	
17		16.09.2016	
18		05.04.2017	
19		15.06.2017	
20		28.09.2017	
21		08.04.2018	
22		15.04.2018	
23		20.07.2018	
24		30.08.2018	
25		01.10.2018	

Source: Based on Sameen & Kubaisy (2014) and Dąbrowska-Zielińska et al. (2015, 2019).

“THS” or “TCS”, “no effect”, and “no data” were superimposed. A value was calculated for each feature: the number of images when the effect appeared divided by the number of images where the feature was present (to exclude the influence of “no data”) multiplied by 100. All areas where “no data” covered more than 50% of the images were excluded from the maps. As a result, 3.65% of Warsaw’s area was eliminated from the analyses (surface water – 3.58%; missing pixels – 0.07%).

Subsequently, the remaining data were divided into five frequency intervals, expressed as percentages: absent – 0.0%, sporadic – 0.1-25%, rare – 25.1-50.0%, frequent – 50.1-75% and very frequent 75.1-100%. The images used to create the THS and TCS maps came from different seasons, with none of the seasons accounting for more than 50% of the total number of images. Almost all images had less than 25% cloud cover (except for one image with less than 50%) and none of

the days were characterized by strong winds (IMGW-PIB, <https://danepubliczne.imgw.pl/>).

Comprehensive land cover-based analysis

To investigate which elements of the urban environment influence the formation of THCS, the first focus was on a comprehensive analysis – the frequency of occurrence of the effects in different land cover types. Two commonly applied classifications with complete datasets for the study area were selected.

The first part of the analysis was based on the CLC2000 and CLC2018 – detailed datasets on land cover for Europe with geometric accuracy of 50 m (CLC2000) or 10-15 m (CLC2018) and minimum mapping unit 25 ha, the use of which enabled focusing on the functional diversity of the area (Chief Inspectorate for Environmental Protection, accessed: 1.05.2024-a, 1.08.2024-b). CLC includes 44 thematic classes, divided into five main land cover types. Within the research area, 22 cover types were identified at level 3. '1. Artificial surfaces' accounted for a substantial 67.5%, with the subtype '112. Discontinuous urban fabric' is the most prominent. '3. Forest and semi-natural areas' made up 18.7% of the surface, with the subtype '312. Coniferous' is the most significant contributor. The remaining proportions of the research area consisted of '2. Agricultural areas' (11.2%), '5. Water bodies' (2.6%) and '4. Wetlands' (0.04%). For further analysis, surface water ('511. Water courses' and '512. Water bodies') was excluded to focus on the LST of land-related categories.

The second source was a global 100 m-resolution, high-accuracy LCZ map of data on urban features (Demuzere et al., 2022). The LCZ typology categorises urban (1-10) and natural (A-F) landscapes into 17 distinct types based on surface cover, structure, and thermal properties to analyse their impact on local climate and temperature patterns. The use of LCZ classification supplemented the analysis by providing information on various types of urban geometry and characteristics,

even within areas of the same functionality, focusing on the influence of the physical characteristics of different kinds of development and land cover on the local climate. In Warsaw, 15 types of zones were identified within the research area. The dominant class was 'LCZ 5 Open midrise', covering 25.9%, followed by 'LCZ 6 Open lowrise' (23.0%) and 'LCZ A Dense trees' (19.7%). Each remaining type covered less than 10% of the research area. Only 'LCZ 8 Large lowrise', 'LCZ B Scattered trees' and 'LCZ D Low plants' occupied more than 5% of the surface. The remaining classes accounted for less than 15 km² each. The analysis excluded areas classified as surface water (LCZ G) to concentrate on the variation in thermal properties of land surfaces, focusing on the remaining 14 LCZ types.

For each map, an analysis of the frequency of THS and TCS effects was carried out, divided into CORINE Land Cover (CLC) categories and local climate zone (LCZ) types (Demuzere et al., 2023; Chief Inspectorate for Environmental Protection, accessed: 1.05.2024-a). To focus on the characteristics of specific land cover classes rather than the changes between 2002 and 2018, an "unchanged area" was marked out, which is referred to as the research area in this paper. This was achieved by utilizing the corrected CLC 2002 and CLC 2018 databases. Both CLC products were overlaid and combined, and only the attributes with matching land cover class codes were extracted, forming a key component of the analysis presented throughout this article. The delineated area serves as a "changed area" mask for the maps (Fig. 1) and then for both classifications considered in this study. The designated "unchanged area" constitutes 79.6% of Warsaw's total area.

Site-specific urban development and thermal condition analysis

The second part of the analysis focused on the selected sites differing in thermal conditions, proximity to the city centre, spatial arrangement, and THS or TCS frequency. These locations correspond to the monitoring

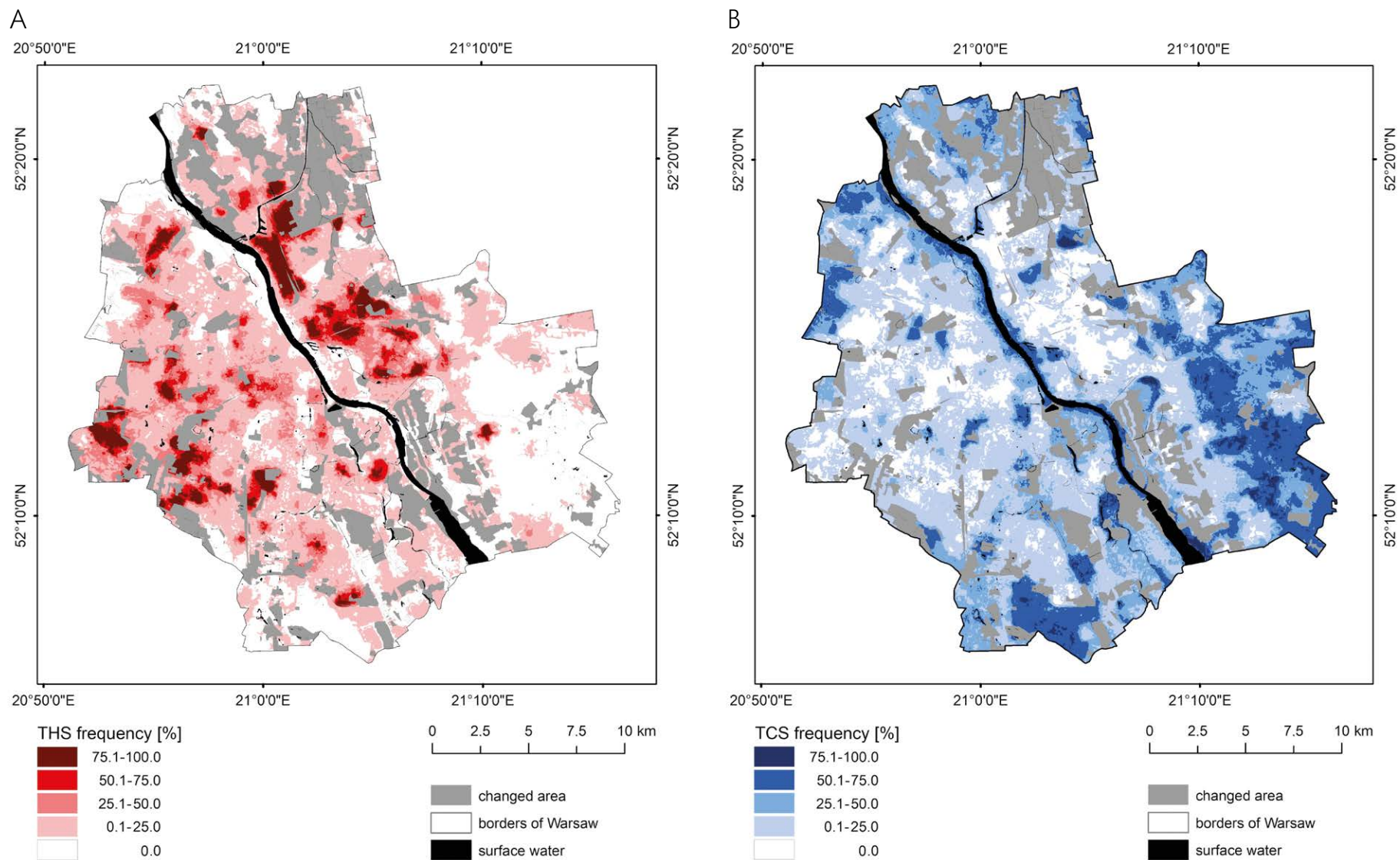


Figure 1. Frequency of thermal hot spot (A) and thermal cold spot (B) occurrence

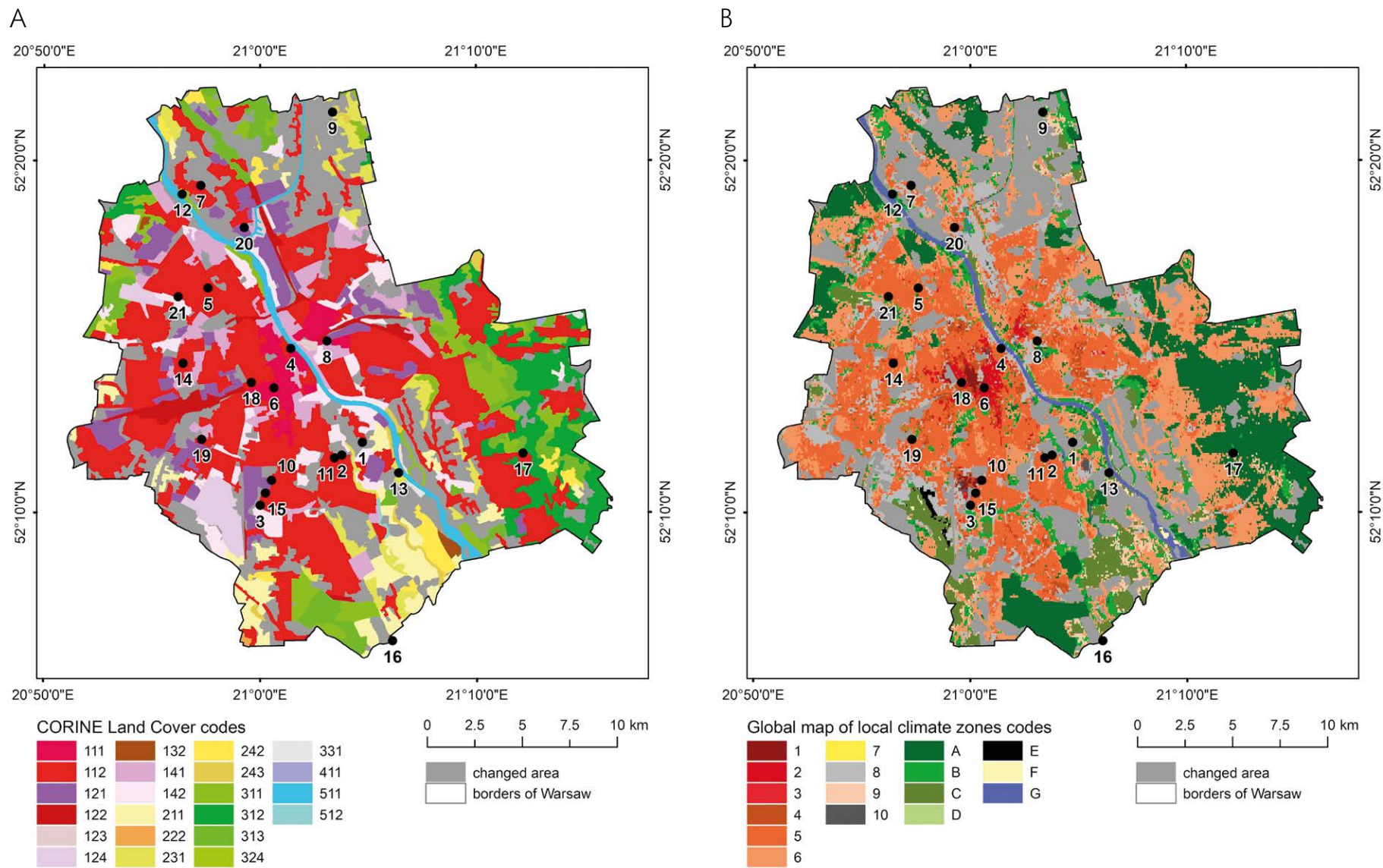


Figure 2. Location of measurement sites in the context of CORINE Land Cover

Source: (A) (Chief Inspectorate for Environmental Protection, accessed: 1.05.2024-a, 1.08.2024-b), and a global map of local climate zones (B) (Demuzere et al., 2023).

network of the Climate Research Department IGSO PAS. AT data from 21 loggers were utilised, covering the period from the network's expansion in 2009 to the study's end in 2018 (Fig. 2). At each site, a HOBO Pro U23-001 or U23-002 data logger (measuring range: -40 to 70°C; resolution: 0.04°C; accuracy $\pm 0.25^\circ\text{C}$ from -40 to 0°C, $\pm 0.2^\circ\text{C}$ from 0 to 70°C) with a solar radiation shield was placed 2 meters above grassy surfaces, with a 10-minute logging interval.

Firstly, data on THS and TCS frequencies were extracted to analyse selected sites (Fig. 3). For THS, the average frequency was 18.8%, ranging from 0% (sites 3, 4, 12, 16, 17, 21) to 70.8% (site 10), while for TCS, the average was 17.7%, ranging from 0% (sites 6, 14, 18) to 65.2% (site 4).

Then, based on AT data, values of the average air temperature (AT_{avg}), the absolute minimum/maximum air temperature ($AT_{abs_min}/AT_{abs_max}$) and the average minimum/maximum air temperature (AT_{min}/AT_{max}) were calculated for each site.

Spatial development indicators for the measurement sites were sourced from Czarnecka et al. (2024) and validated using historical Google Earth Pro images, CLC2002, and CLC2018, focusing on non-overlapping research periods. These indicators, commonly applied in spatial planning, include vertical building characteristics (Maximum Building Height – BH_{max} ; Mean Building Height – BH_{mean}), horizontal features (Building Coverage Ratio – BCR), combined dimensions (Floor Area Ratio – FAR) and a vegetation-related

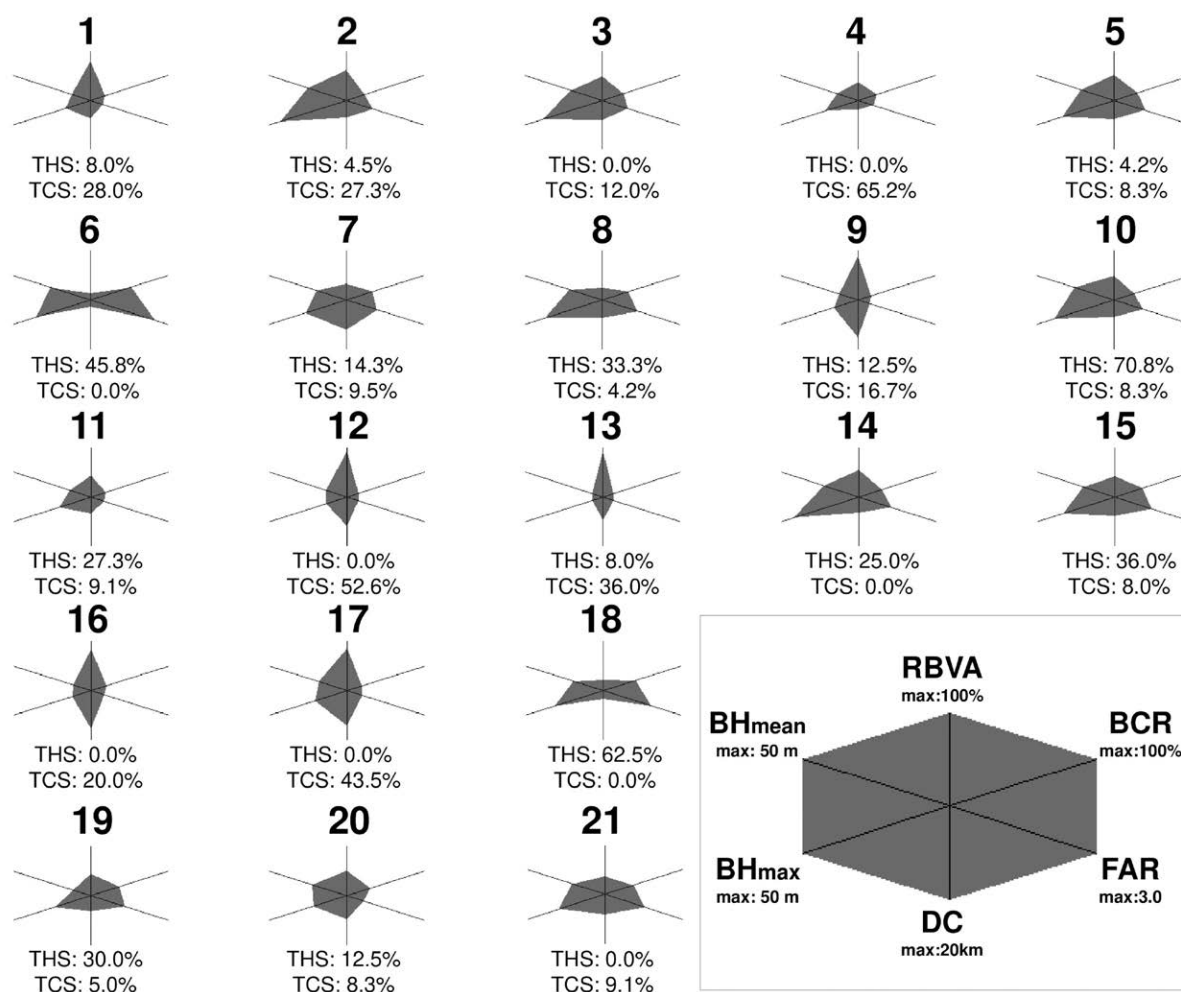


Figure 3. Characteristics of measurement sites – spatial development indicators, distance from the city centre and the frequency of THS and TCS occurrence

Source: Own elaboration based on Czarnecka et al. (2024).

metric (Ratio of Biologically Vital Area – RBVA) (Fig. 3). The sky view factor was excluded due to significant seasonal and interannual variability. Selected indicators were obtained for a 100m radius, as recommended for this type of research (Czarnecka et al., 2024). The distance from the city centre (DC), defined as Dmowski Roundabout, is expressed in kilometres. During the research period, the land cover (based on CORINE Land Cover) or spatial development within a radius of 100 m (spatial development indicators) did not change.

Statistical analysis was performed in the Statgraphic Centurion XVI v.16.2.04 software. To investigate whether there was a statistically significant correlation between the occurrence of THCS, spatial development indicators and the proximity from the city centre, Spearman's rank correlation (95% confidence level) was performed. A similar analysis was also conducted concerning the frequency of the phenomenon with selected thermal characteristics using annual AT data. The nonparametric measure was chosen due to the non-normal THS and TCS frequency data distributions across the analysed sites. To more accurately characterise areas with varying frequencies of THCS, hierarchical cluster analysis using Ward's minimum variance method (Euclidean distance) was performed based on THS and TCS (no strong outlier data). The number of clusters was limited by setting a threshold just below the largest increase in linkage distance, thus excluding grouping at 11.1 and the maximum distance of 17.1. The result was three distinct clusters, connected at the distance level of 4.4, 5.8 and

7.7 (Fig. 4). Each cluster was characterised by its centroids, AT characteristics, CLC category, LCZ type, spatial development indicators and DC mean values. Finally, for each cluster, AT values of all stations within it were averaged for each hour to present the daily regime for the whole year (I-XII), summer (VI-VIII) and winter (XII-II) separately.

Results

Spatial autocorrelation analysis showed that the locations where the THS occurred with a frequency above 50% exhibited a point-like pattern of varying sizes, concentrated on individual objects with exceptionally high land surface temperature compared to the surroundings (Fig. 1A). However, these areas covered a relatively small surface – 4.6% for the frequency range of 50.1-75% and 4.4% for the range of 75.1-100%. 100% frequency concerned for only 0.9% of the research area. A significantly larger surface – 43.1% – was characterised by sporadic occurrences of THS (0.1-25.0%), while 10.3% of the area showed a rare effect (25.1-50.0%). THS, which occurred at least once, covered 62.5% of the whole analysed area of the city, while the weighted mean of the frequency was 15.1%.

The distribution of the most frequent TCS effect took the form of extensive patches with distinct edges or elongated shapes along the Vistula River valley (Fig. 1B). The frequency range of 50.1-75% covered 17.1% of the research area, while 75.1-100.0% – 1.5%. The TCS 100% frequency did not occur. In the largest area – 44.0% – the effect occurred

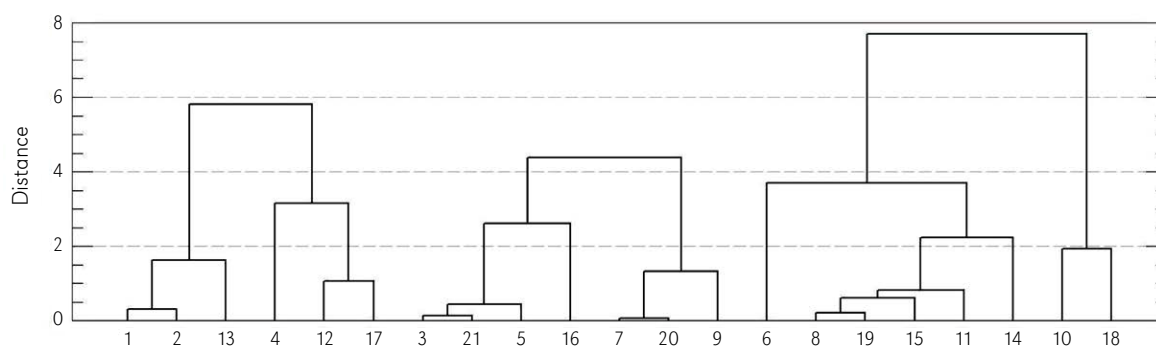


Figure 4. AT measurement sites in Warsaw clustered by THS and TCS frequencies

sporadically (0.1-25.0%), while it was rare (25.1-50.5%) in 21.7% of the surface. TCS, which occurred at least once, covered 84.4% of the analysed area with a 19.5% weighted mean of frequency.

Both phenomena were dispersed citywide, covering over half of the study area. THS and TCS overlapped 47.2% of the terrain, while exclusive THS and TCS areas covered 15.3% and 37.2%, respectively.

Impact of land cover and urban morphology on surface temperature extremes distribution

THS frequency analysis showed the phenomenon occurred in most categories, except '222. Fruit trees and berry plantations' (Fig. 5A). Among the remaining classes, the effect was either absent or sporadic (0.1-25.0%). The exception was '121. Industrial or commercial units' experienced occurrences of the effect with a frequency exceeding 75% on a dominant area of this subtype. Classes with very high THS occurrence were primarily artificial surfaces, excluding non-agricultural vegetated areas. The spatial variation in THS frequency was also analysed by examining the proportion of each category across different frequency ranges. Its distribution was closely related to the size of the area occupied by individual classes. '121. Industrial or commercial units'

had the highest share in categories with frequent THS occurrences. In contrast, the whole area of THS frequency below 50% or without the effect was predominantly covered by '112. Discontinuous urban fabric'.

The TCS was observed across all land cover classes with a distribution pattern more varied than THS (Fig. 5B). Frequent TCS covered over half of forested areas (311, 312, 313), '411. Inland marshes' and '331. Beaches, dunes, sands', large portions of '243. Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation' and '141. Green urban areas'. Most other classes showed much lower TCS occurrence. The largest areas without TCS presence were found within the urban fabric classes (111, 112), '121. Industrial or commercial units' and '122. Road and rail networks and associated land'. When analysing the distribution of TCS frequencies within individual land cover classes, the category above 50% was dominated by three forest-related classes. The whole research area composed of the rarest occurrence of TCS, similar to THS, was associated with '112. Discontinuous urban fabric'.

The distribution of THS across areas occupied by various local climate zones was highly heterogeneous (Fig. 6A). The absence of the phenomenon covered the most extensive areas within categories 'LCZ 9 Sparsely built', 'LCZ A Dense trees', and 'LCZ B Scattered

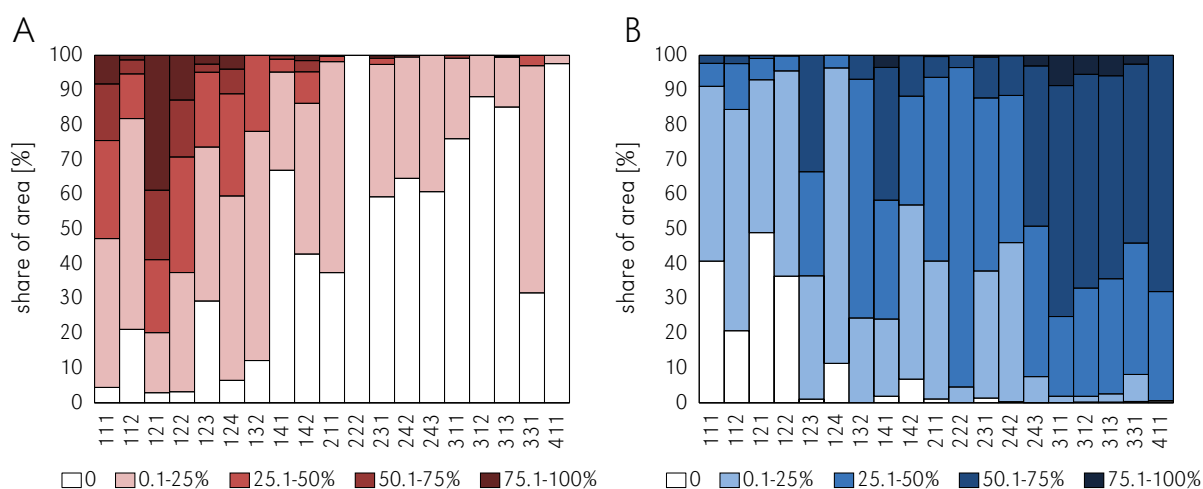


Figure 5. CORINE Land Cover categories in the research area, divided by the frequency ranges of THS (A) and TCS (B)

Legend source: According to https://clc.gios.gov.pl/doc/clc/CLC_Legend_EN.pdf

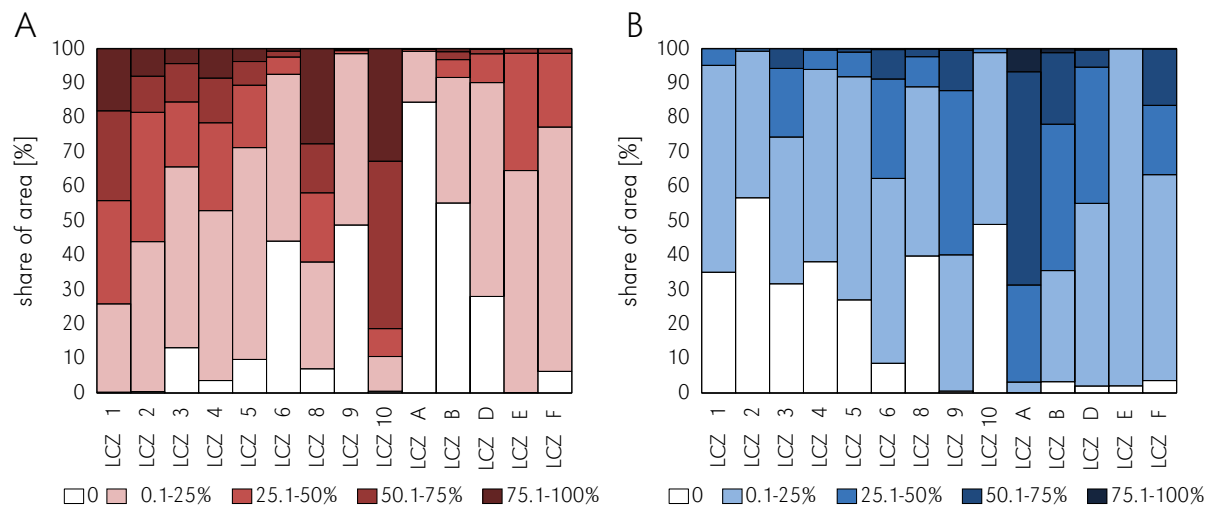


Figure 6. Local Climate Zones in the research area, divided by the frequency ranges of THS (A) and TCS (B)

Legend source: According to Demuzere et al. (2022)

trees'. At the same time, sporadic occurrences were found across other environmental types, as well as in categories 'LCZ 5 Open midrise' and 'LCZ 3 Compact lowrise'. In contrast, the most frequent effect was primarily associated with the 'LCZ 10 Heavy Industry' category. When analysing the distribution of the phenomenon from the perspective of participation in frequency ranges, 'LCZ 8 Large lowrise' dominated. 'LCZ A Dense trees' had the largest proportion of areas where the THS did not occur, while remaining ranges below 50% were mainly associated with 'LCZ 5 Open midrise'.

Examining the distribution of TCS, over half of the area in most types exhibited sporadic occurrences of the phenomenon (Fig. 6B). 'LCZ 2 Compact midrise' had the largest proportion of area where the effect was absent, while 'LCZ 9 Sparsely built' was notable for rare occurrences. Frequent occurrences dominated the surface only in the case of 'LCZ A Dense trees'. Focusing on the contribution of individual LCZs within the frequency ranges, a clear dominance of the surface occupied by 'LCZ A Dense trees' was observed in the most frequent ranges of TCS. Conversely, 'Open midrise' primarily occupied the area with the lowest frequency or absence of the effect.

Site-specific correlation analysis of the frequency of occurrence of THCS with spatial

development indicators revealed the existence of urban morphology factors shaping local surface temperature extremes (Tab. 2). Firstly, a very strong negative correlation was confirmed between TCS and THS frequencies. Then, the analysis revealed a strong positive correlation of THS with FAR, a strong negative correlation with RBVA and DC, and a moderate positive correlation with BCR. The relationship of BH_{mean} and BH_{max} with THS was not statistically significant. For the TCS effect, a statistically significant, very strong negative correlation was observed between the occurrence of the phenomenon and both FAR and BCR, a strong positive correlation with RBVA and DC, and a strong negative correlation with both BH_{mean} and BH_{max} .

The cluster analysis conducted in the next step based on the frequency of THCS revealed three groups differing in the frequency of THS and TCS, land cover, and spatial development. The first cluster (5.8 distance) had the highest average TCS frequency and the lowest THS frequency (Tab. 3). It was characterised by the lowest average values of FAR, BCR, BH_{mean} , and BH_{max} , along with the highest RBVA and moderate DC. This group included the most diverse land cover categories – both types of 'Urban fabric' (111, 112), '312. Coniferous forest', and '121. Industrial or commercial units'. It was also the only group that included

Table 2. Correlation between the occurrence of thermally distinctive surface spots, spatial development indicators and thermal characteristics

	THS	TCS	FAR	BCR	RBVA	BH _{mean}	BH _{max}	DC
THS		-0.77	0.51	0.46	-0.50	0.29	0.38	-0.55
TCS	-0.77		-0.81	-0.77	0.62	-0.50	-0.59	0.54
ATavg	0.33	-0.42	0.58	0.48	-0.60	0.62	0.57	-0.68
ATmin	0.43	-0.48	0.59	0.51	-0.68	0.55	0.52	-0.68
ATmax	0.29	-0.31	0.51	0.41	-0.54	0.65	0.57	-0.66
ATmin_abs	0.14	-0.10	0.21	0.16	-0.20	0.04	0.10	-0.46
ATmax_abs	0.01	-0.15	0.05	0.01	-0.02	0.27	0.17	0.16

Intense blue – a very strong negative; blue – a strong negative; light blue – a moderate negative; red – a strong positive; light red – a moderate positive; grey – no significant correlation.

Table 3. Spatial characteristics of clusters with different THS and TCS frequencies (%)

No.	Members	Centroid TCS	Centroid THS	FAR	BCR	RBVA	BH _{mean}	BH _{max}	DC	CLC	LCZ
1	6	42.1	3.4	0.2	5.9	73.5	9.4	15.7	7.6	111, 112, 121, 312	4, 5, 6, A, B, D
2	7	12.0	6.2	0.6	16.3	52.6	13.2	21.6	9.7	112, 121	5, 9, B
3	8	4.3	41.3	1.2	23.8	31.0	15.1	30.1	4.2	111, 112	2, 4, 5

‘LCZ D Low Plants’, ‘LCZ A Dense Trees’, and ‘LCZ 6 Open lowrise’ areas according to LCZ types. The second cluster (4.4 distance) exhibited moderate THS and TCS frequencies and average values for all spatial development indicators except for the greatest DC. This group encompassed ‘112. Discontinuous urban fabric’ and ‘121. Industrial or commercial units’ and was the only one that included ‘LCZ 9 Sparsely Built’ type. The highest frequency of THS, the lowest frequency of TCS, the smallest RBVA and DC, and the highest values of the remaining indicators characterised the third cluster (7.7 distance). This group’s land cover included both types of ‘Urban fabric’ (111, 112), and it was the only cluster where ‘LCZ 2 Compact Midrise’ areas were found.

Relationship between the thermal surface anomalies and air temperature conditions

Site-specific air temperature analysis revealed no significant correlations between THCS

frequencies and most annual thermal characteristics, except for a moderate negative correlation between TCS and AT_{min} . More significant correlations were found between thermal characteristics and spatial development indicators, especially DC, although these aspects were not the focus of this paper.

Annual and diurnal AT variability was analysed across measurement site clusters to identify air temperature patterns associated with the THCS (Tab. 4). Cluster 1, with the lowest THS and highest TCS frequency, exhibited the most moderate thermal conditions annually, except for the highest AT_{abs_max} . Sites in this group were warmer annually and during summer from sunrise (6:00) until late afternoon (17:00) and throughout the day in winter. However, the standard deviation was the largest, which could have influenced the specific values. Cluster 2, with moderate THS and TCS frequencies, had the lowest values across all annual characteristics except a moderate AT_{abs_max} . This was due to generally lower annual air temperature values,

Table 4. Thermal conditions in clusters with different THS and TCS frequencies

A. Annual thermal characteristics

No.	AT _{avg}		AT _{min}		AT _{max}		AT _{abs_min}		AT _{abs_max}	
	avg	σ	avg	σ	avg	σ	min	σ	max	σ
1	9.7	0.5	9.3	0.5	10.1	0.5	-27.3	3.7	43.6	2.6
2	9.5	0.4	9.2	0.4	9.9	0.4	-28.6	2.2	42.0	1.4
3	9.9	0.2	9.6	0.2	10.2	0.2	-23.1	1.0	39.4	0.9

B. Daily thermal regime (average for each hour from 1 to 24) during a year (I-XII), summer (VI-VII) and winter (XII-II)

Hour	1			2			3		
	I-XII	VI-VIII	XII-II	I-XII	VI-VIII	XII-II	I-XII	VI-VIII	XII-II
1	7.2	15.3	-1.3	7.2	15.6	-1.9	8.2	16.9	-1.4
2	6.9	14.9	-1.4	6.9	15.2	-2.0	7.9	16.5	-1.5
3	6.7	14.6	-1.4	6.7	14.9	-2.1	7.6	16.1	-1.6
4	6.8	14.9	-1.5	6.6	14.9	-2.2	7.5	16.1	-1.7
5	7.2	16.1	-1.5	6.9	15.7	-2.2	7.6	16.6	-1.8
6	8.1	17.8	-1.5	7.6	17.2	-2.2	8.1	17.7	-1.8
7	9.2	19.4	-1.4	8.7	19.1	-2.2	9.0	19.1	-1.7
8	10.4	20.9	-1.0	9.9	20.8	-1.8	10.0	20.6	-1.5
9	11.6	22.3	-0.4	11.1	22.1	-1.2	11.1	21.9	-1.0
10	12.6	23.3	0.3	12.1	23.2	-0.5	11.9	22.7	-0.4
11	13.3	24.1	0.9	12.8	24.0	0.1	12.6	23.4	0.1
12	13.8	24.8	1.3	13.4	24.5	0.5	13.1	24.0	0.5
13	14.1	25.2	1.4	13.5	24.6	0.7	13.4	24.3	0.7
14	14.0	25.3	1.2	13.5	24.7	0.5	13.4	24.3	0.6
15	13.6	24.9	0.8	13.1	24.4	0.2	13.1	23.9	0.4
16	12.9	24.1	0.4	12.4	23.7	-0.2	12.6	23.4	0.2
17	12.0	23.2	0.0	11.6	22.7	-0.5	12.0	22.7	-0.1
18	11.0	21.7	-0.3	10.8	21.4	-0.8	11.4	21.8	-0.3
19	10.0	19.8	-0.4	9.9	19.9	-1.0	10.7	20.8	-0.5
20	9.2	18.3	-0.6	9.2	18.6	-1.1	10.2	19.9	-0.6
21	8.6	17.4	-0.7	8.7	17.8	-1.3	9.7	19.1	-0.8
22	8.2	16.8	-0.9	8.2	17.1	-1.4	9.3	18.5	-1.0
23	7.8	16.2	-1.0	7.8	16.6	-1.6	8.9	17.9	-1.1
24	7.5	15.7	-1.1	7.5	16.1	-1.7	8.5	17.4	-1.2

Red – the highest values; Blue – the lowest values in a given hour.

particularly at night, including winter days and hours around sunrise and sunset in summer. Cluster 3, with the highest THS and lowest TCS frequencies, displayed the highest average annual air temperature values,

except for AT_{abs_max}, which was the weakest among the groups. This cluster experienced significantly higher nighttime AT values annually and in summer, while daytime AT was lower or moderate in winter.

Annually, the most significant cumulative AT difference was observed between Cluster 1 and 3 (15.7°C). The maximum difference between Cluster 1 and 2 was 0.6°C at 13:00, corresponding to solar noon and the rapid intensification of thermal contrasts in different parts of the city. The difference between Cluster 2 and 3 and between Cluster 1 and 3 reached 1.1°C after 20:00, when cooling intensified following sunset. Similar observations were made for the summer season when the cumulative difference between Cluster 1 and 3 reached 23.2°C. The maximum hourly differences were 0.6°C (Clusters 1-2), 1.4°C (Clusters 2-3), and 1.7°C (Clusters 1-3). The winter season exhibited a slightly different thermal regime. The most considerable cumulative difference was 15.8°C, occurring between Cluster 1 and 2. The maximum difference between Cluster 1 and 2 was 0.8°C, observed from sunrise to noon, while for Cluster 1 and 3, it occurred outside daylight hours, and for Cluster 2 and 3, it was closest to noon. These diurnal AT differences between clusters varying in THS and TCS frequencies may explain the lack of correlation observed in year-round values.

Discussion

This paper comprehensively assessed the distribution of thermally distinctive surface areas in the context of land cover, spatial development, and associated air temperature patterns. This type of multi-aspect approach combining many sources made it possible to fill the research gap due to the lack of such studies on local thermal extremes not only in Warsaw, Poland or this climate zone but is also complementary to the few studies conducted for THCS in urban areas around the world (Guerri et al., 2022; Hussain et al., 2023; Naserikia et al., 2023). The comparability of results and easy replication was ensured by the spatial autocorrelation analysis for satellite data and by open access land cover and spatial development materials.

Significant variability in the frequency of THCS across different land cover types was

observed in Warsaw during the research period, which aligns with the findings of various publications (Guerri et al., 2021; Středová et al., 2021; Liu et al., 2022; Gupta, 2024). Moreover, most land cover types or local climate zones exhibit the presence of both THS and TCS over more than half of their area, albeit with differing frequencies. The results indicate that THCS are not exclusively associated with the types of land cover they are most commonly linked to – TCS is not only related to green spaces but also occurs in densely built-up areas, within transportation infrastructure and industrial zones. Conversely, THS can be found in forested areas. The reasons are the unique physical properties of each location and their differences during a day or season.

The results may also be influenced by the resolution of satellite imagery, thermal anisotropy and the classification method of land cover types (Geletič et al., 2016; Krayenhoff & Voogt, 2016; Demuzere et al., 2022). Although widely used datasets with established protocols and high accuracy were selected, the generalisation applied in CORINE Land Cover 2018 and Global Map of Local Climate Zones may affect the precision of land classification, particularly in areas with complex spatial structures (Cheval et al., 2020; Demuzere et al., 2022; Copernicus Land Monitoring Service, accessed: 3.09.2024). However, these two datasets differ in their approach: CLC has a higher geometric resolution but a larger minimum mapping unit, whereas the Global map of LCZ has a lower geometric resolution but a smaller minimum mapping unit. As a result, CLC-based analysis provides a more detailed spatial representation. Still, it may generalise land cover types over larger areas, while LCZ analysis captures broader urban patterns but at a coarser spatial scale. Although more precise land cover databases exist (i.a. Urban Atlas), the CLC dataset was also selected due to its availability for reference year 2000, for consistent historical comparison within the study framework, to limit errors resulting from changes in the build-up environment. To address the challenges,

it is advisable not to rely on a single source or classification but to combine various land cover datasets at different scales of analysis to enhance accuracy and reliability.

The occurrence of THS is most often associated with large, compact built-up areas, usually serving an industrial and commercial function (Guerri et al., 2022; Hidalgo-García & Arco-Díaz, 2022). Moreover, an increase in developed areas, greater bare soil coverage, and a reduction in green spaces and water bodies lead to a rise in LST, intensification of the THS effect and, even more notably, a decline in TCS (Sharma et al., 2021; Hussain et al., 2023). The observed strong impact of buildings is most often associated with indicators considering horizontal dimensions, while those parametrising their height typically have weaker or more complex correlations (Huang & Wang, 2019; Zhao et al., 2023). In this study, the building height-based indicators correlated the lowest with the occurrence of TCS and were not statistically significantly associated with THS. On the other hand, FAR shows a much more substantial impact, as it reflects 3D urban morphology. The reason may be changes in air circulation, thermal radiation transfer, or the creation of shadows (Grimmond, 2007; Yuan et al., 2021). These effects vary depending on the season, time of day, and exposure, resulting in higher LST among low-rise, high-density built-up areas and lower LST in high-rise, low-density parts of the city. The spatial arrangement and 2D/3D morphology with their specific thermal properties lead to spots within artificial urban zones where THS are rare and TCS are frequent. This pattern is evident in the CLC classification and the more detailed LCZ typology, which captures the diversity of building geometry. Furthermore, urban areas differ in albedo, thermal properties of building materials and presence of small features with distinct surface temperatures, such as solar panels, condenser units or green roofs (Matias & Lopes, 2020; Guerri et al., 2021; Ramani et al., 2024). However, it should be emphasized that urban morphology also influences thermal anisotropy, which means that

with increasing building height-to-width ratio, surface temperature variation in the city may be overestimated (Krayenhoff & Voogt, 2016).

Current knowledge indicates that TCS is primarily associated with vegetation and water areas (Guerri et al., 2021; Hussain et al., 2023; Kuchcik & Czarnecka, 2023). This is confirmed by the correlation with RBVA conducted in this study and many other studies based on different indicators related to vegetation (Jamei et al., 2019; Guerri et al., 2021). However, sufficiently large vegetation coverage is essential for urban parks to effectively influence LST and create zones that are noticeably cooler than their surroundings (Aram et al., 2019). This can be compromised by extensive areas covered by sidewalks or buildings that are part of the park's infrastructure or simply by the small size of the green space itself. Moreover, it is not only the presence of green areas that is significant but also the type of vegetation, their configuration, height, density structure, shape and surroundings or other landscape characteristics parameterised by metrics, such as mean patch size or edge density (Greene & Kedron, 2018; Geletič et al., 2019; Yuan et al., 2021; Liu et al., 2022). This conclusion is also evident when considering the variation in the occurrence of effects across different natural LCZ types i.e. THS is much more common on 'LCZ D low plants' than in areas densely covered with trees. In specific weather conditions, time of day or season, green areas may have higher LST, for example, due to differences in shading, condition of the vegetation, presence of an irrigation system and the thermal properties of the substrate (Chang & Li, 2014; Walawender et al., 2014; Geletič et al., 2019). All these factors may be the cause of less frequent occurrence of TCS or the presence of THS in areas classified as urban greenery or even forest.

Numerous studies have shown a statistically significant positive correlation between LST and AT, though this relationship weakens with increasing urbanisation (Gawuć et al., 2020). It varies by the season and time of day, being the weakest during winter days and the

strongest during summer, especially at night, when discrepancies are more pronounced (Grigoraş & Urişescu, 2018; Cao et al., 2021; Naserikia et al., 2023). Moreover, the relationship between LST and AT depends on time and space, varying in the distance from the ocean or urban morphology. A significant difference in values within dense built-up areas and a slight difference in the natural LCZ classes, especially in dense trees, are observed. This study indicated weak or non-existent statistically significant correlations between the frequency of occurrence of THCS and AT characteristics. It should be emphasised that this relation did not occur, even though spatial development indicators and DC were correlated with the frequencies of thermally distinctive surface spots and the values of annual AT characteristics. Similar observations can be found in the literature, where it is noted that despite the statistically significant relationship between LST and AT, the spatial distribution of their highest and lowest values is not the same (Cao et al., 2021; Středová et al., 2021). Although the detected THCS were not concerned with only one season of the year, seasonal differences in daily thermal regimes between the phenomena's frequency clusters were observed. However, the lowest AT values did not always correspond to the least frequent THS and the most frequent TCS, nor did the highest AT values consistently align with the most frequent THS and the least frequent TCS, sometimes showing inverse relationships. This may be due to the significant differences in diurnal regimes between clusters, which are strongly influenced by solar noon, the warming of various surfaces after sunrise, and cooling after sunset.

LST data is widely used in urban climate research, enabling large-scale studies and global comparability. In contrast, while adhering to WMO standards, the most commonly available AT data from synoptic stations often lack suitability for local studies due to limited coverage and non-representative locations (Sheng et al., 2017). It is important to emphasise that substituting AT with LST due to these limitations is not appropriate,

especially when discussing urban climate adaptation plans, as confirmed by this study and prior research (Coutts et al., 2016; Sheng et al., 2017; Naserikia et al., 2023; Květoňová et al., 2024). LST does not fully reflect thermal conditions at the pedestrian level, particularly in dense urban areas with sparse greenery and heated rooftops. To address these limitations, research on local extremes in urban areas often combines approaches based on satellite images with weather station data from local monitoring networks (Cao et al., 2021) or crowdsourcing (Naserikia et al., 2023); however, their spatial resolution or quality may be deficient as well. While the extraction of AT from satellite imagery – particularly using complex models that account for variations depending on the land cover type – represents a promising approach, these methods remain subject to considerable limitations and require further development (Manoli et al., 2020; Martilli et al., 2020; Guo et al., 2024). An alternative option could be high-resolution gridded climate datasets, though their quality and accuracy depend on the input data (Cheval et al., 2020). However, their extensive use in studies on THCS has not been widely observed. Combining LST with in-situ AT offers significant potential to improve data quality. The results of such research can be used as input for models simulating and predicting thermal conditions in areas identified as THS or TCS in specific climate zones. Nonetheless, one must remain aware of the considerable limitations inherent in these methods, particularly in the context of human-oriented research, which should be supplemented with information that better describes outdoor thermal comfort (Jin et al., 2022; Geletič et al., 2023; Anders et al., 2025). Such insights enhance urban climate understanding and assist planners in creating thermally comfortable spaces for residents, even under burdensome thermal conditions.

Conclusions

This study examined the spatial distribution of thermal hot and cold spots in Warsaw from

2002 to 2018, highlighting their complex relationship with land cover, urban morphology and air temperature regimes. The results indicate that THCS are not solely linked to their expected land cover types or local climate zones. Instead, their occurrence is shaped by highly diverse urban settings. Although no significant correlation was found between the frequency of land surface thermal anomalies and annual air temperature averages, the study reveals that THCS exhibit distinct diurnal thermal regimes that vary seasonally.

The findings of this paper have important implications for urban planning and climate resilience strategies. A key conclusion is that relying solely on LST as an indicator of urban thermal conditions may lead to misinterpretations, as it does not always correspond with actual air temperature variations at the pedestrian level. Instead, a comprehensive approach integrating LST images, AT measurements and spatial development indicators offers a more reliable basis for simulation models and then planning more effective mitigation measures.

Further research should explore the areas where THCS persist throughout the year, especially less explored TCS that are not limited to green spaces. Additionally, a more detailed assessment of their microclimatic properties, including bioclimatic conditions, could provide valuable insights into the mechanisms driving local temperature variations and thermal comfort.

Acknowledgements

I would like to express my sincere thanks to my supervisors, Prof Magdalena Kuchcik and Dr Katarzyna Lindner-Cendrowska, for their invaluable support in the development of this research work. I also sincerely thank the authors of the datasets for providing the following data for this study:

- Land surface temperature maps from the final study defining the state of the ecosystem of the capital city of Warsaw in the context of climate change, prepared for the Foundation Institute for Sustainable Development as part of the LIFE_ADAPTCITY_PL project by the team of the Institute of Geodesy and Cartography under the supervision of Prof Katarzyna Dąbrowska-Zielińska, consisting of Dr Radosław Gurdak, Patryk Grzybowski, Damian Olszewski. The LIFE_ADAPTCITY_PL project was co-financed from the LIFE financial instrument of the European Commission and the National Fund for Environmental Protection and Water Management.
- Air temperature data from the air temperature/humidity monitoring network of the Climate Research Department Institute of Geography and Spatial Organization Polish Academy of Science consisting of a team led by Prof Magdalena Kuchcik.

Editors' note:

Unless otherwise stated, the sources of tables and figures are the author's, on the basis of their own research.

References

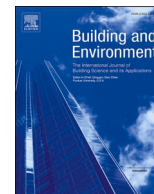
- Ai, X., Zheng, X., Zhang, Y., Liu, Y., Ou, X., Xia, C., & Liu, L. (2024). Climate and land use changes impact the trajectories of ecosystem service bundles in an urban agglomeration: Intricate interaction trends and driver identification under SSP-RCP scenarios. *Science of The Total Environment*, 944. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173828>
- Anders, J., Schubert, S., Maronga, B., & Salim, M. (2025). Simplifying heat stress assessment: Evaluating meteorological variables as single indicators of outdoor thermal comfort in urban environments. *Building and Environment*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.112658>

- Aram, F., Higuera García, E., Solgi, E., & Mansournia, S. (2019). Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 5(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>
- Cao, J., Zhou, W., Zheng, Z., Ren, T., & Wang, W. (2021). Within-city spatial and temporal heterogeneity of air temperature and its relationship with land surface temperature. *Landscape and Urban Planning*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103979>
- Chang, C.-R., & Li, M.-H. (2014). Effects of urban parks on the local urban thermal environment. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(4), 672-681. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.08.001>
- Cheval, S., Micu, D., Dumitrescu, A., Irimescu, A., Frighenciu, M., Iojă, C., Tudose, N. C., Davidescu, Ș., & Antonescu, B. (2020). Meteorological and Ancillary Data Resources for Climate Research in Urban Areas. *Climate*, 8(3), 37. <https://doi.org/10.3390/cli8030037>
- Chief Inspectorate for Environmental Protection. (accessed: 1.05.2024-a). Corine Land Cover 2018 [Dataset]. <https://clc.gios.gov.pl/index.php/clc-2018/udostepnianie>
- Chief Inspectorate for Environmental Protection. (accessed: 1.08.2024-b). Corrected database CORINE Land Cover 2000 [Dataset]. <https://clc.gios.gov.pl/index.php/clc-2006/udostepnianie>
- Copernicus Land Monitoring Service. (accessed: 3.09.2024). CORINE Land Cover. <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover>
- Coutts, A. M., Harris, R. J., Phan, T., Livesley, S. J., Williams, N. S. G., & Tapper, N. J. (2016). Thermal infrared remote sensing of urban heat: Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning. *Remote Sensing of Environment*, 186, 637-651. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.09.007>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105014>
- Dąbrowska-Zielińska, K., Gurdak, R., Grzybowski, P., & Olszewski, D. (2019). *Opracowanie końcowe określające stan ekosystemu m.st. Warszawy w kontekście zmian klimatu w ramach projektu LIFE_ADAPTCITY_PL*. Warsaw: Institute of Geodesy and Cartography, The Remote Sensing Center.
- Dąbrowska-Zielińska, K., Hościło, A., Tomaszewska, M., & Kiryła, W. (2015). *LIFE ADAPTCITY PL – Przygotowanie strategii adaptacji do zmian klimatu miasta metropolitarne przy wykorzystaniu mapy klimatycznej i partycypacji społecznych. Sprawozdanie z realizacji projektu*. Warsaw: Institute of Geodesy and Cartography, The Remote Sensing Center.
- Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I. D., van Vliet, J., & Bechtel, B. (2022). A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. *Earth System Science Data*, 14(8), 3835-3873. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022>
- Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I. D., Vliet, J. van, & Bechtel, B. (2023). Global map of Local Climate Zones (3.0.0) (Version 3.0.0) [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8419340>
- Feyisa, G. L., Meilby, H., Darrel Jenerette, G., & Pauliet, S. (2016). Locally optimized separability enhancement indices for urban land cover mapping: Exploring thermal environmental consequences of rapid urbanization in Addis Ababa, Ethiopia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 14-31. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.026>
- Gawuć, L., Jefimow, M., Szymankiewicz, K., Kuchcik, M., Sattari, A., & Strużewska, J. (2020). Statistical modeling of urban heat island intensity in Warsaw, Poland using simultaneous air and surface temperature observations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 2716-2728. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.2989071>
- Geletiĉ, J., Lehnert, M., & Dobrovolný, P. (2016). Land surface temperature differences within local climate zones, based on two Central European cities. *Remote Sensing*, 8(10), 788. <https://doi.org/10.3390/rs8100788>
- Geletiĉ, J., Lehnert, M., Resler, J., Krĉ, P., Bureš, M., Urban, A., & Krayenhoff, E. S. (2023). Heat exposure variations and mitigation in a densely populated neighborhood during a hot day: Towards

- a people-oriented approach to urban climate management. *Building and Environment*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110564>
- Geletič, J., Lehnert, M., Savić, S., & Milošević, D. (2019). Inter-/intra-zonal seasonal variability of the surface urban heat island based on local climate zones in three central European cities. *Building and Environment*, 156, 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.011>
- Greene, C. S., & Kedron, P. J. (2018). Beyond fractional coverage: A multilevel approach to analyzing the impact of urban tree canopy structure on surface urban heat islands. *Applied Geography*, 95, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.04.004>
- Grigoraș, G., & Urițescu, B. (2018). Spatial hotspot analysis of Bucharest's Urban Heat Island (UHI) using modis data. *Annals of Valahia University of Targoviste Geographical Series*, 18, 14-22. <https://doi.org/10.2478/avutgs-2018-0002>
- Grimmond, S. (2007). Urbanization and global environmental change: Local effects of urban warming. *The Geographical Journal*, 173(1), 83-88. https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2007.232_3.x
- Guerri, G., Crisci, A., Congedo, L., Munafò, M., & Morabito, M. (2022). A functional seasonal thermal hot-spot classification: Focus on industrial sites. *Science of The Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151383>
- Guerri, G., Crisci, A., Messeri, A., Congedo, L., Munafò, M., & Morabito, M. (2021). Thermal summer diurnal hot-spot analysis: The role of local urban features layers. *Remote Sensing*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/rs13030538>
- Guo, Y., Unger, J., Khabibolla, A., Tian, G., He, R., Li, H., & Gál, T. (2024). Modeling urban air temperature using satellite-derived surface temperature, meteorological data, and local climate zone pattern – A case study in Szeged, Hungary. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(5), 3841-3859. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04852-7>
- Gupta, R. K. (2024). Identifying urban hotspots and cold spots in Delhi using the biophysical landscape framework. *Ecology, Economy and Society-the INSEE Journal*, 7. <https://doi.org/10.37773/ees.v7i1.954>
- He, T., Zhou, R., Ma, Q., Li, C., Liu, D., Fang, X., Hu, Y., & Gao, J. (2023). Quantifying the effects of urban development intensity on the surface urban heat island across building climate zones. *Applied Geography*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.103052>
- Hebbert, M. (2014). Climatology for city planning in historical perspective. *Urban Climate*, 10, 204-215. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.07.001>
- Hidalgo-García, D., & Arco-Díaz, J. (2022). Modeling the Surface Urban Heat Island (SUHI) to study of its relationship with variations in the thermal field and with the indices of land use in the metropolitan area of Granada (Spain). *Sustainable Cities and Society*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104166>
- Huang, X., & Wang, Y. (2019). Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.010>
- Hussain, N., Ahmed, S. M. S., & Shumi, A. M. (2023). Remote sensing-based geostatistical hot spot analysis of Urban Heat Islands in Dhaka, Bangladesh. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 44(3), 438-458. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12507>
- Jamei, Y., Rajagopalan, P., & Sun, Q. (Chayn). (2019). Spatial structure of surface urban heat island and its relationship with vegetation and built-up areas in Melbourne, Australia. *Science of The Total Environment*, 659, 1335-1351. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.308>
- Jin, L., Schubert, S., Fenner, D., Salim, M. H., & Schneider, C. (2022). Estimation of mean radiant temperature in cities using an urban parameterization and building energy model within a mesoscale atmospheric model. *Meteorologische Zeitschrift*, 31(1), 31-52. <https://doi.org/10.1127/metz/2021/1091>
- Kleerekoper, L., van Esch, M., & Salcedo, T. B. (2012). How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resources, Conservation and Recycling*, 64, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.004>

- Krayenhoff, E. S., & Voogt, J. A. (2016). Daytime thermal anisotropy of urban neighbourhoods: Morphological causation. *Remote Sensing*, 8(2), 108. <https://doi.org/10.3390/rs8020108>
- Kuchcik, M., & Czarnecka, K. (2023). A general thermal characterisation of the Vistula Valley in Warsaw. *Przegląd Geograficzny*, 95(3). <https://doi.org/10.7163/PrzG.2023.3.6>
- Kuchcik, M., Czarnecka, K., & Błażejczyk, K. (2024). Urban heat island in Warsaw (Poland): Current development and projections for 2050. *Urban Climate*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101901>
- Květoňová, V., Pánek, J., Geletič, J., Šimáček, P., & Lehnert, M. (2024). Where is the heat threat in a city? Different perspectives on people-oriented and remote sensing methods: The case of Prague. *Heliyon*, 10(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36101>
- Lehnert, M., Geletič, J., & Jurek, M. (2023). Traditional and novel approaches to studying the human thermal environment in urban areas: A critical review of the current state of the art. *Geografie*, 128(3), 351-377. <https://doi.org/10.37040/geografie.2023.012>
- Liu, W., Zhao, H., Sun, S., Xu, X., Huang, T., & Zhu, J. (2022). Green space cooling effect and contribution to mitigate heat island effect of surrounding communities in Beijing Metropolitan Area. *Frontiers in Public Health*, 10. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.870403>
- Manoli, G., Fatichi, S., Schlöpfer, M., Yu, K., Crowther, T. W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G., & Zeid, E. B. (2020). Reply to Martilli et al. (2020): Summer average urban-rural surface temperature differences do not indicate the need for urban heat reduction. *OSF Preprints*. <https://doi.org/10.31219/osf.io/mwvpa>
- Martilli, A., Roth, M., Chow, W. T. L., Demuzere, M., Lipson, M., Krayenhoff, E. S., ... & Hart, M. A. (2020). Summer average urban-rural surface temperature differences do not indicate the need for urban heat reduction. *Research Collection School of Social Sciences*, Paper 3391. <https://doi.org/10.31219/osf.io/8gnbf>
- Matias, M., & Lopes, A. (2020). Surface radiation balance of urban materials and their impact on air temperature of an urban canyon in Lisbon, Portugal. *Applied Sciences*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/app10062193>
- Mavrakou, T., Polydoros, A., Cartalis, C., & Santamouris, M. (2018). Recognition of thermal hot and cold spots in urban areas in support of mitigation plans to counteract overheating: Application for Athens. *Climate*, 6(1). <https://doi.org/10.3390/cli6010016>
- Naserikia, M., Hart, M. A., Nazarian, N., Bechtel, B., Lipson, M., & Nice, K. A. (2023). Land surface and air temperature dynamics: The role of urban form and seasonality. *Science of The Total Environment*, 905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167306>
- Office of Architecture and Spatial Planning of the Capital City of Warsaw City Hall. (2018). *Atlas Ekofizjograficzny Miasta Stołecznego Warszawy*.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T. R. (2006). Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1), 179-190. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0153-0>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Ramani, V., Arjunan, P., Poolla, K., & Miller, C. (2024). Semantic segmentation of longitudinal thermal images for identification of hot and cool spots in urban areas. *Building and Environment*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111112>
- Rubel, F., & Kottek, M. (2010). Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(2), 135-141. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430>
- Sameen, M. I., & Kubaisy, M. A. A. (2014). Automatic surface temperature mapping in ArcGIS using Landsat-8 TIRS and ENVI tools, case study: Al Habbaniyah Lake. *Journal of Environment and Earth Science*, 4(12).

- Sharma, R., Pradhan, L., Kumari, M., & Bhattacharya, P. (2021). Assessing urban heat islands and thermal comfort in Noida City using geospatial technology. *Urban Climate*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100751>
- Sheng, L., Tang, X., You, H., Gu, Q., & Hu, H. (2017). Comparison of the urban heat island intensity quantified by using air temperature and Landsat land surface temperature in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 72, 738-746. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.09.009>
- Sismanidis, P., Keramitsoglou, I., & Kiranoudis, C. T. (2017). Identifying and characterizing the diurnal evolution of urban land surface temperature patterns. *2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 1-4. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2017.7924598>
- Smid, M., Russo, S., Costa, A. C., Granell, C., & Pebesma, E. (2019). Ranking European capitals by exposure to heat waves and cold waves. *Urban Climate*, 27, 388-402. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.010>
- Statistics Poland. (accessed: 14.08.2024). *M.st. Warszawa. Categories: Population, Territorial division. Years: 2001, 2018*. <https://bdl.stat.gov.pl/bdl/dane/teryt/jednostka#>
- Středová, H., Chuchma, F., Rožnovský, J., & Středa, T. (2021). Local climate zones, land surface temperature and air temperature interactions: Case study of Hradec Králové, the Czech Republic. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/ijgi10100704>
- USGS. (accessed: 31.07.2024). *Frequently Asked Questions*. <https://www.usgs.gov/faqs/>
- Walawender, J. P., Szymanowski, M., Hajto, M. J., & Bokwa, A. (2014). Land surface temperature patterns in the urban agglomeration of Krakow (Poland) derived from Landsat-7/ETM+ data. *Pure and Applied Geophysics*, 171(6), 913-940. <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0685-7>
- Yuan, B., Zhou, L., Dang, X., Sun, D., Hu, F., & Mu, H. (2021). Separate and combined effects of 3D building features and urban green space on land surface temperature. *Journal of Environmental Management*, 295, 113116. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113116>
- Zhao, K., Qi, M., Yan, X., Li, L., & Huang, X. (2023). Dynamic impact of urban built environment on land surface temperature considering spatio-temporal heterogeneity: A perspective of local climate zone. *Land*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/land12122148>



Assessing the role of environmental factors in shaping human thermal stress within urban parks during the growing season

Kaja Czarnecka^{a,*}, Magdalena Kuchcik^a, Kacper Derwisz^b, Anna Jarocińska^b, Anna Kowalska^c, Katarzyna Lindner-Cendrowska^a, Daniel Rabczenko^d

^a Climate Research Department, Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences, Twarda 51/55, 00-818 Warsaw, Poland

^b Department of Geoinformatics, Cartography and Remote Sensing, Faculty of Geography and Regional Studies, University of Warsaw, Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warsaw, Poland

^c Department of Geocology, Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences, Twarda 51/55, 00-818 Warsaw, Poland

^d National Institute of Public Health - National Institute of Hygiene, Chocimska 24, 00-791 Warsaw, Poland

ARTICLE INFO

Keywords:

Outdoor thermal comfort
UTCI
Spatial development indicators
Spectral indices
Vegetation types
Urban bioclimate

ABSTRACT

Urban parks play an essential role in mitigating thermal stress and enhancing human comfort, yet their bioclimatic performance varies across seasons and depends on complex interactions between vegetation, built form, and spatial configuration. This study investigated seasonal variability in Universal Thermal Climate Index (UTCI) conditions across six parks in Warsaw (Poland). The bioclimate was assessed in relation to multi-source environmental indicators derived from satellite imagery, hemispherical photography, field inventories, and open-access geospatial datasets. In-situ measurements conducted during spring, summer, and autumn (2022–2024) at 23 sun-exposed and shaded locations were compared with UTCI from ERA5-HEAT reanalysis to derive the difference, used as the response variable in a Generalised Additive Model. Fourteen environmental indicators describing vegetation, park morphology, and surrounding urban fabric were analysed at micro (site-specific, 10 m) and local scales (50 m, 100 m). Results demonstrate pronounced intra- and inter-park variability, with stronger contrasts between sun and shade in summer (up to 10 °C) than in transitional seasons. Dense vegetation systematically reduced UTCI up to 7 °C. Quantitative vegetation indicators (ELAI, TCD, NDVI, EVI) significantly decreased UTCI from 0.3 to 1.7 across seasons. Built-up indicators (NDBI, BCR, BH_{mean}, BH_{max}) increased UTCI, especially during summer, up to 2 °C. Sky openness proved a consistent determinant of thermal stress across the entire growing season. Significant effects varied across spatial scales. The findings highlight the seasonal and scale-dependent nature of thermal stress regulation provided by parks and emphasise the need for integrated design strategies that consider park arrangement to enhance urban climate resilience.

Nomenclature

BCR	Building Coverage Ratio
BH _{max}	Maximum Building Height
BH _{mean}	Mean Building Height
DC	Distance to the city centre
ELAI	Effective Leaf Area Index
EVI	Enhanced Vegetation Index
EXPO	Sun-shade exposure type
FAR	Floor Area Ratio
MRT	Mean radiant temperature
NDBI	Normalized Difference Built-up Index

NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
RBVA	Ratio of Biologically Vital Areas
RH	Relative humidity
SVF	Sky View Factor
ta	Air temperature
TCD	Tree Cover Density
tg	Globe temperature
UTCI	Universal Thermal Climate Index
UTCI _{diff}	Difference in UTCI values at a site and the reanalysis
va	Wind speed
VEG _{gen}	Generalised vegetation type
VEG _{spec}	Specified vegetation type

* Corresponding author.

E-mail address: czarnecka@igipz.pan.pl (K. Czarnecka).

1. Introduction

As a major element of urban green infrastructure, parks provide crucial ecological, social, and health-related functions, particularly in densely built environments [1,2]. Within the broader category of urban green spaces – understood as vegetated or semi-natural areas embedded in the urban fabric, including street trees, community gardens, green corridors and small woodland remnants [3] – parks represent the most structured and publicly accessible form. Beyond their recreational and aesthetic value, they represent dynamic microclimatic systems in which biotic and abiotic components interact with atmospheric processes in ways that differ fundamentally from the surrounding built environment [4]. These unique conditions make parks critical sites for oxygen production, air pollution reduction, and – within the context of this work – regulating local energy balance and mitigating heat stress [5–7]. However, the extent to which urban greenery delivers these benefits is not fixed: it varies across seasons and times of day, depends on spatial configuration, and is also shaped by the multiple urban environment factors operating at various scales within and outside the park [8]. As a result, not every green area generates the same cooling effect, and some of them may fail to provide noticeable thermal relief under certain circumstances in terms of air temperature, land surface temperature or thermal stress [9–11]. Understanding these dynamics is essential for optimising the design of urban parks and their close vicinity, which contributes to both climate resilience and human well-being.

Recent studies on the cooling effect of urban parks have predominantly focused on summer observations, where a pronounced cooling impact has been confirmed through in-situ measurements [5,12]. Analyses for other seasons are mainly limited to land surface temperature assessments [9,13] and considerably fewer investigations of thermal conditions outside the summer period, focused especially on bioclimatic conditions [11,14,15]. Despite growing evidence, seasonal perspective of thermal stress remains underexplored – transitional periods, when leaves are in the development stage or are already in the senescence phase, are equally important, particularly given that climate change increasingly triggers positive thermal anomalies outside the summer months (e.g., heatwaves in April–May 2018 in Poland [16], October 2021 in South Korea [17], March–April 2022 in India and Pakistan [18], September–October 2023 in Austria [19]). Meanwhile, during summer, the cooling properties of parks may be compromised by excessive heat stress and moisture deficits, which are becoming more frequent under recent climatic trends [10]. Regarding the influence of park morphology on microclimatic conditions, a substantial body of research has addressed the role of selected specific aspects such as park size and shape [20,21], vegetation type and structure [22], as well as features of the surrounding built-up environment [23,24]. Some of these park and surroundings characteristics remain constant throughout the year (e.g., green area extent, impervious surface cover), while others vary seasonally (e.g., horizon limitation, vegetation condition). Moreover, their influence on the thermal environment may change under different weather contexts [25]. Taken together, these findings highlight the need for an integrated understanding of how different urban environmental factors at various scales shape local climate across different seasons when heat stress may occur.

A human-oriented approach is particularly important in shaping urban spaces, including parks, as well as in developing adaptation plans [26–28]. Many strategies and recommendations are based either on land surface temperature, derived from widely available datasets with broad spatial coverage but not always representative of air temperature conditions at the pedestrian level, or on air temperature from relatively sparse national monitoring [29]. However, it is crucial to consider the thermal comfort of urban residents, which depends not only on air temperature but also on humidity, wind speed, and radiant heat exchange, as well as on human-related factors. Such evidence can be provided by studies of biometeorological conditions using indicators parameterised through human heat balance models. While indices such

as Standard Effective Temperature (SET), Physiological Equivalent Temperature (PET), Perceived Temperature (PT) and Physiological Subjective Temperature (PST) are commonly applied to relate meteorological inputs to thermal comfort assessment, the Universal Thermal Climate Index (UTCI) is beneficial as it offers a physiologically based scale of thermal stress that enhances comparability across diverse thermal environments [30,31]. Given the distinctive microclimatic conditions found in parks, there is a need to deepen our understanding of park bioclimates and to develop evidence-based guidelines for resilient green infrastructure design [12].

To address the research gaps, this study aimed to identify urban environmental indicators that most effectively capture spatial characteristics relevant to thermal stress and to quantify their influence across varying temporal and spatial scales. Therefore, the study addresses the following research questions:

- Q1. How do UTCI conditions vary within and among parks across different parts of the growing season, and how do they differ from reanalysis-based estimates?
- Q2. Which urban environmental indicators show significant effects on local UTCI deviations, and how do these effects vary across spatial scales?
- Q3. How do the effects of urban environmental indicators on local UTCI vary seasonally, and how does their magnitude differ between spring, summer, and autumn?

To answer these questions, a multi-indicator, multi-source approach was applied at both micro (site-level and 10 m radius buffer) and local scales (50 m and 100 m radius buffers), integrating in-situ meteorological measurements with ERA5-HEAT (Human thERmal comfOrT) reanalysis UTCI data – physically consistent fields generated by assimilating ground, satellite, and model observations [32,33] – serving as a consistent background reference for comparing campaigns conducted on different days and under varying weather conditions. The analytical framework incorporates eleven quantitative and three qualitative indicators characterising key aspects of parks and their surroundings, capturing vegetation properties, artificial surfaces, spatial configuration and horizon limitation. The analysis was conducted across six urban parks and their surroundings in Warsaw (Poland), a city located in a region with pronounced seasonal variability.

2. Materials and methods

2.1. Study area

Warsaw (52°06′–52°22′ N; 20°51′–21°16′ E; area of 517.24 km²) is one of Europe's greenest capitals, boasting 88 parks and 242 municipal green squares.¹ In 2025, the city was ranked fifth in a European assessment of urban greenery and environmental sustainability.² Within the overall land-use structure of Warsaw, green spaces account for a substantial share, including forests (15.5%), unmanaged green areas (10.4%), and designed green infrastructure (5.6%).¹ This composition helps Warsaw rank as the 12th capital city in terms of the percentage of total green infrastructure among the 37 capitals within the European Environment Agency network.³

¹ Office of Architecture and Spatial Planning of the Capital City of Warsaw City Hall. Atlas Ekofizjograficzny Miasta Stołecznego Warszawy. Warsaw: 2018

² City Hall of Warsaw. Poland's capital at the forefront of Europe's green cities <https://en.um.warszawa.pl/-/poland-s-capital-at-the-forefront-of-europe-s-green-cities> (accessed 5.08.2025).

³ European Environment Agency. Percentage of total green infrastructure, urban green space, and urban tree cover in the area of EEA-38 capital cities (excluding Liechtenstein) <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/percentage-of-total-green-infrastructure> (accessed 5.08.2025).

Warsaw is situated on the transition zone between the temperate oceanic (Cfb) and humid continental (Dfb) climate zones according to the Köppen-Geiger classification [34,35]. The climate features four distinct seasons, with warm summers and cold winters. Precipitation is distributed relatively evenly throughout the year, with no clearly defined dry season. Based on data from the synoptic station Warszawa-Okęcie (WMO index: 12375) for the period 2022–2024,⁴ the average annual air temperature was 10.8 °C. The absolute air temperature amplitude during this period was 50.6 °C, ranging from a minimum of −15.1 °C (January 9, 2024) to a maximum of 35.6 °C (July 1, 2022). The warmest month was August, with an average air temperature of 21.5 °C, while the coldest was January, averaging 1.4 °C. Mean annual relative humidity was 73.0%, varying from 56.4% in May to 87.3% in December. Wind speed, a key factor influencing outdoor thermal stress, averaged 3.2 m·s^{−1}, ranging from 2.7 m·s^{−1} in August to 4.0 m·s^{−1} in February.

This study involved six urban parks, along with their immediate surroundings, located in various parts of Warsaw (Table 1; Fig. 1). Most of these sites provide habitats that support urban biodiversity.⁵ The selected parks differ in size, shape, vegetation structure, presence of various minor park facilities (e.g., walkways, pergolas, pavilions or playgrounds), and the characteristics of the surrounding transportation infrastructure, resulting in diverse spatial design configurations.

Within each park, measurement sites were established in fully sunlit and shaded locations surrounded by vegetation. In addition, supplementary sites were selected close to impervious surfaces – such as asphalt parking lots, roads, sidewalks or buildings – either within the parks or in their immediate surroundings. In total, 23 sites were selected (Fig. 1).

2.2. Thermal stress measure

Biometeorological conditions in urban parks and their immediate surroundings were parameterised using the Universal Thermal Climate Index (UTCI), which enables the assessment of thermal stress levels [36]. The index distinguishes ten categories, including five associated with cold stress, four with heat stress, and one indicating no thermal stress, corresponding to the UTCI range from 9 to 26 °C (Table A.1 in Electronic Supplemental Material). This index is expressed mathematically as:

$$UTCI(ta, MRT, va, RH) = ta + Offset(ta, MRT, va, RH) \quad (1)$$

where *ta*, *MRT*, *va* and *RH* represent air temperature (°C), mean radiant temperature (°C), wind speed (m·s^{−1}) and relative humidity (%), respectively.

The data for UTCI calculation were collected during the growing season in the years 2022–2024. For the four largest parks, data were obtained for each season (Spring 2023/2024, Summer 2022/2023, and Autumn 2023), while for the two smaller parks, measurements were conducted during summer and one transitional season (Summer 2022 and either Spring 2024 or Autumn 2023). During this period, the local land use remained unchanged, so the values of the indicators were unaffected by interannual alterations. Field campaigns took place from 8:00 AM to 8:00 PM CEST in spring and summer, and from 8:00 AM to 6:00 PM CEST in autumn, due to earlier sunset times. 17 measurement days were selected based on radiation-dominated weather conditions, with no precipitation, low wind speed, and limited cloud cover, to ensure clear microclimatic contrasts within parks [37].

UTCI values were computed using the 6th-order polynomial regression approximation (offset function) provided in the UTCI operational procedure [36] derived from the Fiala thermophysiological model and

Table 1
Characteristics of the study parks.

Name of park (code)	Size ^a [ha]	DC ^b [km]	TCD ^c [%]	Description
Zoological Garden & Praski Park (ZOO)	56.06	2.54	57.0	Established in 1928, the Zoological Garden is one of the largest green complexes in central Warsaw, combined with the adjacent Praski Park (founded in the 19th century). The area contains dense tree stands, historical pavilions, and recreational spaces.
Skaryszewski Park (SKA)	77.68	2.94	49.0	Designed in 1905–1916. It is one of Warsaw's largest landscape-style parks. Its layout incorporates an extensive system of water features and diversified plant compositions, complemented by open recreational spaces. ⁶
Botanical Garden & Łazienki Park (LAZ)	76.50	1.59	65.4	Established in the 18th century as a royal residence, the most famous historic park in Warsaw, characterised by palaces, water features, and old-growth trees. The neighbouring Botanical Garden, created in 1818, enriches the area with scientific plant collections. ^{d,e}
Malicki Park (MAL)	3.54	3.60	49.0	A small municipal park created in the 1970s serves primarily as a neighbourhood green space. It contains open lawns, a small pond, playgrounds, and walking paths. ^f
Królikarnia & Arkadia Park (KRO)	19.85	4.18	66.6	The park surrounds the Królikarnia Palace, built in the late 18th century, and is integrated with the romantic-style Arkadia Park (transformed into an urban park in the 20th century) with an elongated pond. The area is known for its historical architecture and sculptures, as well as recreational facilities. ^{g,h}
Przy Bażantarni Park (BAZ)	9.52	10.88	72.5	Developed in the early 2000s as part of a new housing estate, it provides a modern recreational space with sports facilities, open greenery and playgrounds. It is an example of contemporary urban park design. ⁱ

Source: own elaboration based on Google Earth Pro, the Tree Crown Map^j and official websites.^{6–13}

^a size – the area of urban parks covered by the study;

^b DC – distance to the city centre, defined as the Dmowski Roundabout;

^c TCD – Tree Cover Density.

^d Parki. Zarząd Zieleni Mst Warszawy. <https://zzw.waw.pl/nasze-tereny/parki/> (accessed 10.9.2025).

^e Krótka historia Warszawskiego ZOO/ A short history of the Warsaw ZOO. Municipal Zoological Garden in Warsaw. <https://zoo.waw.pl/o-nas/95-lecie-warszawskiego-zoo/historia> (accessed 10.9.2025).

^f Park im. Malickiego. 2025. <https://eko.um.warszawa.pl/-/park-im-malickiego-g-d-nowickiego-> (accessed 10.9.2025).

^g O Królikarni. Królikarnia - Muzeum Rzeźby im. Xawerego Dunikowskiego <https://krolikarnia.mnw.art.pl/o-krolikarni/> (accessed 10.09.2025).

⁴ IMGW-PIB. Warsaw-Okęcie, 2022–2024. https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/dane_meteorologiczne/dobowe/synop/ (accessed 5.08.2025).

⁵ Office of Architecture and Spatial Planning of the Capital City of Warsaw City Hall. Atlas Ekofizjograficzny Miasta Stołecznego Warszawy. Warsaw: 2018

^h Parki. Zarząd Zieleni Mst Warszawy. <https://zzw.waw.pl/nasze-tereny/parki/> (accessed 10.9.2025).

ⁱ Park Przy Bażantarni. 2025. <https://ursynow.um.warszawa.pl/-/park-przy-bazantarni> (accessed 10.9.2025).

^j Kunert Z. Miliony warszawskich drzew na jednej mapie. Zarząd Zieleni m.st. Warszawy. <https://zzw.waw.pl/2021/02/26/miliony-warszawskich-drzew-na-jednej-mapie/> (accessed 18.11.2025).

implemented in R [38]. The input data included air temperature, mean radiant temperature and relative humidity at 1.1 m above ground, as well as wind speed measured at 1.4 m and scaled to 10 m a.g.l. using the logarithmic wind profile consistent as defined in the procedure [39]. Data were recorded at 1-minute intervals using HOBO sensors and custom-made 4 cm acrylic black globe thermometers, selected based on prior verification studies demonstrating their reliable performance under variable shading conditions typical of local park environments [40,41] (Table A.2 in ESM). The measurements were subsequently averaged to 10-minute values following established methodological

approaches [42,43]. MRT was determined from black globe temperature following ISO 7726, assuming the black globe emissivity of $\varepsilon = 0.95$. The convective heat transfer coefficient (h_c) was determined depending on the natural or forced convection – the higher of the two values was used in MRT calculations.

$$MRT = \sqrt[4]{(tg + 273.15)^4 + \frac{h_c}{\varepsilon \cdot \sigma} (tg - ta) - 273.15} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2)$$

where σ is the Stefan–Boltzmann constant and tg is the globe temperature ($^\circ\text{C}$).

Since measurements were conducted on different days across seasons, meteorological conditions varied among the individual parks. To minimise the influence of weather variability and focus on the impact of environmental factors, reanalysis data were used as a background reference. The nearest ERA5-HEAT node to the city centre ($52^\circ 15' \text{ N}$, $21^\circ 00' \text{ E}$) was selected as a regional background reference for Warsaw, with the corresponding grid cell covering more than 70% of the city

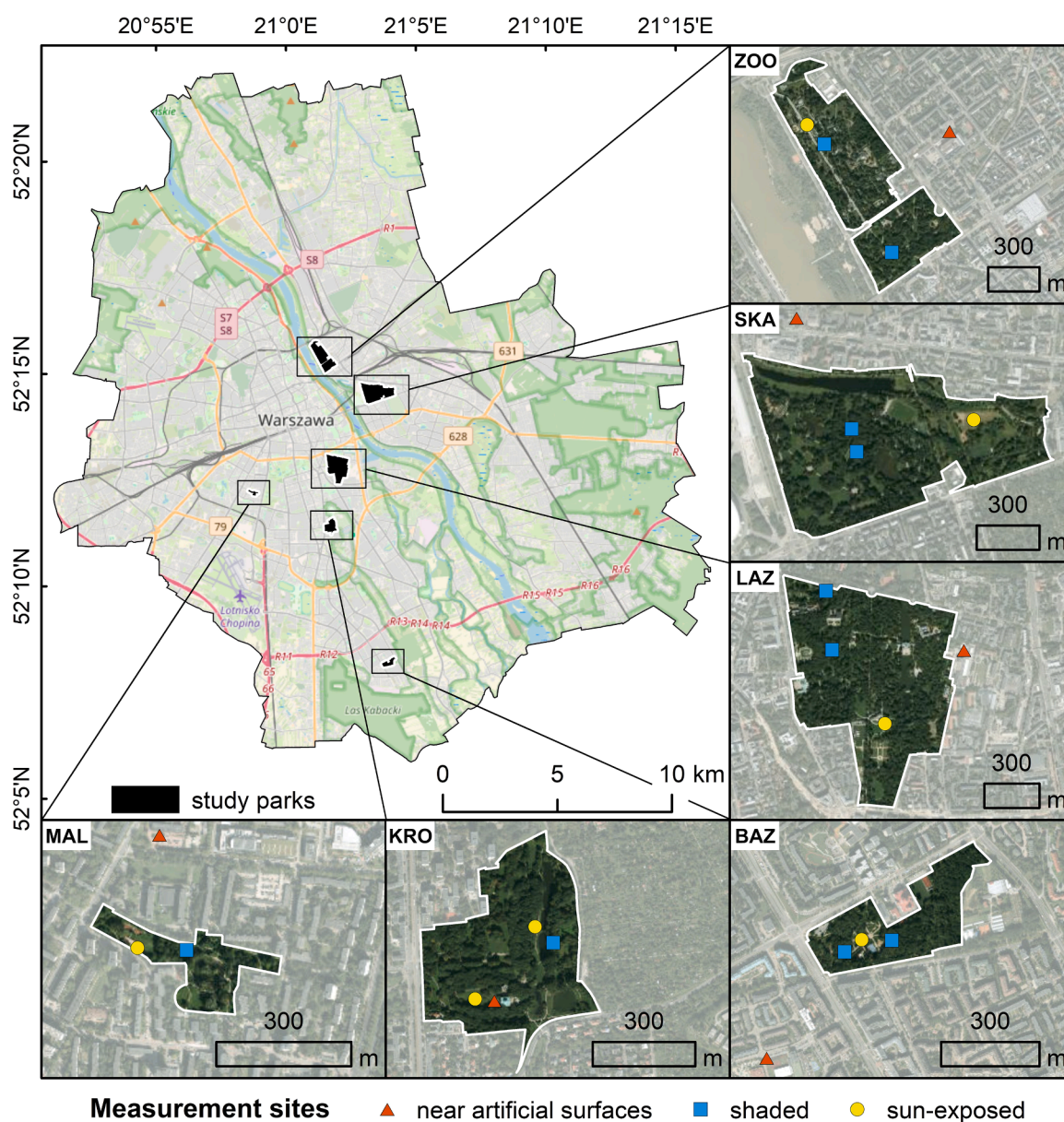


Fig. 1. Location of the study parks and measurement sites.

Source: own elaboration; basemap from OpenStreetMap (and) contributors, Esri, Maxar, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User.

area, including all analysed parks [32,33]. A key variable for further analysis was $UTCI_{diff}$ – the difference between the 10-minute averaged UTCI at each measurement site and the corresponding 10-minute UTCI (approximated from hourly data) from ERA5-HEAT. This approach was supported by Pearson correlation, which indicated a strong association ($r > 0.8$) between in-situ and reanalysis 10-minute values, significant at the 99% confidence level.

2.3. Environmental indicators

To assess the impact of the complex environment of urban parks and their immediate surroundings, individual elements were parameterised using eleven well-established and widely applied in spatial research indicators, complemented by sun-shade exposure typology and vegetation classification at two levels of detail. The selected spatial-contextual metrics were calculated within three buffer zones around each measurement point – radii of 10, 50, and 100 m (Table 2A), representing different analytical scales, from the immediate surroundings of the

Table 2
Overview of the selected spatial indicators.

A. Spatial-context indicators			
Abbreviation	Indicator name	Description	Calculations
BCR	Building Coverage Ratio	The proportion of the area covered by building footprints, expressed as a percentage of the total plot area [55].	$BCR = \frac{\sum_{i=1}^n B_i}{A_{total}} \cdot 100$ Where B_i is the footprint area of the i th building, A_{total} is the total area of the parcel and n is the total number of buildings within the analysed area.
EVI	Enhanced Vegetation Index	A spectral index used for analysing vegetation condition with improved sensitivity to dense vegetation and minimised atmospheric and canopy background effects [48,56].	$EVI = G \cdot \frac{NIR - R}{NIR + C_1 \cdot R - C_2 \cdot B + L}$ Where NIR is the reflectance in the Near Infrared band, R = reflectance in the Red band, B = reflectance in the Blue band, and the following coefficients are $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, and G (gain factor) = 2.5.
FAR	Floor Area Ratio	The ratio of a building's total floor area to the total plot area [57,58].	$FAR = \frac{\sum_{i=1}^n B_i \cdot F_i}{A_{total}}$ Where B_i is the footprint area of the i th building, F_i is the number of floors of the i th building, A_{total} is the total area of the parcel and n is the total number of buildings within the analysed area.
BH _{max}	Maximum Building Height	The height of the tallest building within the analysed area [59].	$BH_{max} = \max(h_i)$
BH _{mean}	Mean Building Height	Average height of buildings, where each building's contribution is proportional to its footprint within a given area [50].	$BH_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i \cdot B_i}{\sum_{i=1}^n B_i}$ Where h_i is the height of the i th building, B_i is the building footprint area of the i th building, and n is the total number of buildings within the analysed area.
NDBI	Normalized Difference Built-up Index	A spectral index showing the area covered by built-up surfaces in a given area [60,61].	$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$ Where NIR is the reflectance in the Near Infrared band, SWIR is the reflectance in the Short-Wave Infrared band.
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	A spectral index calculated as the normalised difference between near-infrared and red reflectance values, allowing the estimation of chlorophyll content and biomass [62–64].	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$ Where NIR is the reflectance in the Near Infrared band, R is the reflectance in the Red band.
RBVA	Ratio of Biologically Vital Areas	The proportion of area that is covered by permeable surfaces capable of supporting ecological functions (also 50% of the roofs or terraces' area larger than 10 m ² covered by natural vegetation), including open water, expressed as a percentage of the total plot area [65,66].	$RBVA = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{A_{total}} \cdot 100$ Where V_i is the biologically vital area of the i th patch, A_{total} is the total area of the parcel and n is the total number of biologically vital surface patches within the parcel.
TCD	Tree Cover Density	The percentage of ground area covered by tree canopies when viewed from above [22,67].	$TCD = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{A_{total}} \cdot 100$ Where C_i is the canopy area of the i th tree, A_{total} is the total area of the parcel and n is the total number of trees within the analysed area.
B. Site-specific indicators			
Abbreviation	Indicator name	Categories	
EXPO	Sunlight-shade exposure type	A binary variable indicating site exposure to direct solar radiation during the measurement period, with 1 representing shaded conditions and 0 representing full sun exposure.	
ELAI	Effective Leaf Area Index	The leaf area per unit ground surface area, accounting for canopy light interception but not leaf clumping, integrated over the zenith angles 0–60°; modelled using the Gap Light Analyzer software [51,68].	
SVF	Sky View Factor	The fraction of the visible sky hemisphere from a given point; modelled using a pixel-based method following Holmer et al. [52,57,69].	
VEG _{gen}	Generalized vegetation type	TC – a tree cluster; M – meadow; L – lawn; AS – site localised in the close vicinity of an artificial surface.	
VEG _{spec}	Specified vegetation type	TC_A – tree cluster, dense, deciduous, tall, with shrubs, low grass; TC_B – tree cluster, dense, deciduous, tall, with shrubs, low grass, understory; TC_C – tree cluster, dense, deciduous, tall, with shrubs, high grass; TC_D – tree cluster, dense, deciduous, tall, without shrubs, low grass; TC_E – tree cluster, dense, mixed, tall, without shrubs, low grass; TC_F – tree cluster, open, deciduous, tall, with shrubs, low grass; L – open lawn; LT – lawn with single trees; M – meadow; MS – meadow with a group of shrubs; AS/L – lawn in combination with artificial surface; AS/LT – lawn with single trees in combination with artificial surface.	

station to the broader local context [44–46]. Indicators involving categorisation or modelling based on hemispherical photographs were applied only to the measurement point itself (Table 2B).

The first group of contextual indicators was derived from satellite imagery. To acquire information on the vegetation condition and built-up surface properties, spectral metrics were calculated based on Sentinel 2 images. Ground-reflectance-corrected images were obtained in 10 m spatial resolution for the study site in Google Earth Engine for dates closest to the measurement campaigns (Table A.3 in ESM). Cloud masking was applied based on the QA pixel band, and surface water bodies were masked using data from the Map of the Hydrographic Division of Poland⁶ and the Land functionality map of Warsaw 2019 provided by Warsaw City Council. For the resulting scenes, three spectral indices were computed (Table 2A): Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [47], Enhanced Vegetation Index (EVI) [48] and Normalized Difference Built-up Index (NDBI) [49]. Then, in QGIS 2.22, mean index values were calculated within three buffer zones using the Zonal Statistics tool.

The second group of spatial-context parameters comprised selected urban morphology indicators that are widely used in urban planning practice and are included in local legal frameworks: Building Coverage Ratio (BCR), Maximum Building Height (BH_{max}), Mean Building Height (BH_{mean}), Floor Area Ratio (FAR), Ratio of Biologically Vital Areas (RBVA) and Tree Cover Density (TCD) [45,46,50]. These indicators can be applied to both build-up areas and parks, particularly when analysing areas of varying size, extending beyond the administrative boundaries of green spaces. Calculations were performed in ArcMap 10.2.2. for selected buffer zones using well-established formulas (Table 2A) and diverse datasets: building footprints and the number of storeys were digitised based on the Topographic Objects Database and Bing Aerial images; building heights were estimated from Google Earth Pro imagery; biologically vital area boundaries were derived from OpenStreetMap imagery and Bing Aerial; and tree canopy cover was extracted from the Tree Crown Map.⁷

The first group of site-specific metrics includes two quantitative indices – the Sky View Factor (SVF), which describes the proportion of visible sky from a given point and helps assess shading and radiation exposure [44], and the Effective Leaf Area Index (ELAI), which characterises canopy density and light interception by vegetation [51] – both of which were modelled in specialised software based on hemispherical images (Table 2B). The photographs were taken during each campaign directly above the air temperature solar radiation shield (1.3 m above ground) with the Canon EOS M50 and CF 4 mm F2.8/210° fisheye lens. After the post-processing, SVF was computed in Sky View Factor Calculator v1.1 [52,53] and ELAI in Gap Light Analyzer v2.0 [54].

The second group of site-specific characteristics were based on categorisation (Table 2B). Vegetation type information, both Generalised vegetation type (VEG_{gen}) and Specified vegetation type (VEG_{spec}), was determined after detailed field surveys conducted in the immediate vicinity of each measurement point, supported by cartographic materials such as municipal park inventory data and the Tree Crown Map¹⁶. These indices allow for a systematic description of vegetation structure and composition at the local scale, which is important for understanding bioclimatic conditions. Exposure type (EXPO) was determined based on field observations, the SVF value, and analysis of solar radiation, which were also monitored during the measurement campaigns for verification purposes, providing insight into the overall spatial geometry and potential solar exposure at each location.

⁶ The State Water Holding Polish Waters. Map of the Hydrographic Division of Poland (scale 1:10 000 000). <https://dane.gov.pl/pl/dataset/2167>, mapapodzialu-hydrograficznego-polski-w-skali-110 (accessed 21.06.2023).

⁷ Kunert Z. Miliony warszawskich drzew na jednej mapie. Zarząd Zieleni m. st. Warszawy. <https://zww.waw.pl/2021/02/26/miliony-warszawskich-drzew-na-jednej-mapie/> (accessed 18.11.2025).

2.4. Statistical analysis

To address research questions Q1–Q3, the analysis proceeded in three steps. First, to characterise the variability of thermal conditions within the parks, UTCI heatmaps were generated based on ERA5-HEAT data for the study period. Differences between in-situ observations and the corresponding reanalysis grid node values were then evaluated, and overall error metrics (MAE – mean absolute error, RMSE – root mean square error and Bias) were computed in R version 4.5.1 [70]. Measurement results for each park were subsequently summarised to provide an overview of thermal stress conditions (Q1; subSection 3.1).

To investigate the influence of local environmental characteristics on bioclimatic conditions (Q2) and how their relevance varies across seasons (Q3), a generalised additive model (GAM) with random effects for park, measurement location and observation day was applied (Section 3.2). Many spatial indicators were strongly correlated, which prevents including them simultaneously in a GAM without producing unstable estimates, necessitating a univariate modelling approach within this study framework. Restricting the analysis to only uncorrelated indicators would have limited the ability to fully address the study's primary objective – examining how various environmental factors relate to UTCI in urban parks. The response was modelled using the *mgcv* package in R (version 4.4.2) [70,71] as a function of a covariate and a nonlinear smooth function of time, estimated separately for each park ($p = 0.05$). This modelling framework enabled the simultaneous modelling of location-specific temporal dynamics and the accommodation of random spatial and temporal variation. The model was fitted using $UTCI_{diff}$ as the response variable, which represents the difference between the local UTCI and the corresponding UTCI from ERA5-HEAT. Because $UTCI_{diff}$ is a relative measure, GAM coefficients describe how changes in a given variable modify the local thermal stress deviation from the background conditions, enabling the analysis of systematic patterns and trends rather than absolute values or short-term variability. Positive coefficients indicate that the predictor increases $UTCI_{diff}$ (local UTCI becomes relatively higher), while negative coefficients indicate a decrease (local UTCI becomes relatively lower).

To facilitate the interpretation of effect sizes across predictors expressed in different units, quantitative variables were rescaled according to their practical ranges of variation. For indicators expressed as percentages (BCR, RBVA, TCD), effects were expressed per 10% change. For continuous indices with limited variability (NDVI, EVI, NDBI, SVF), effects were reported per 0.1-unit change. For variables where moderate increments are meaningful (ELAI, FAR, BH_{mean} , BH_{max}), effects were expressed per 1-unit change. Categorical variables were modelled relative to a reference class (lawn for VEG_{gen} ; open lawn for VEG_{spec} ; sun for EXPO), and the effects of all other categories were expressed with respect to this baseline.

3. Results

3.1. Thermal stress patterns

3.1.1. Background biometeorological conditions during the study period

Biometeorological conditions during the study years were broadly representative of typical seasonal patterns in Poland, which were presented in Figure A.1 in ESM. During the selected measurement campaign days in Warsaw, ERA5-HEAT UTCI values calculated for full 24-hour periods ranged from *moderate cold stress* (-7.9°C) to *strong heat stress* (33.0°C), indicating a broad spectrum of thermal conditions (Table A.4 in ESM). Focusing on the hours during which field measurements were conducted, UTCI spanned several thermal stress classes. In spring, all observations fell within the *no thermal stress* class ($9.8\text{--}25.6^{\circ}\text{C}$) (Fig. 2A). Summer observations covered conditions from *no thermal stress* to *strong heat stress* ($18.6\text{--}33.0^{\circ}\text{C}$) with the most frequent *moderate heat stress* (50.0%) (Fig. 2B). In autumn, UTCI from the reanalysis ranged from *moderate cold stress* to *no thermal stress* ($-0.2\text{--}24.8^{\circ}\text{C}$), with

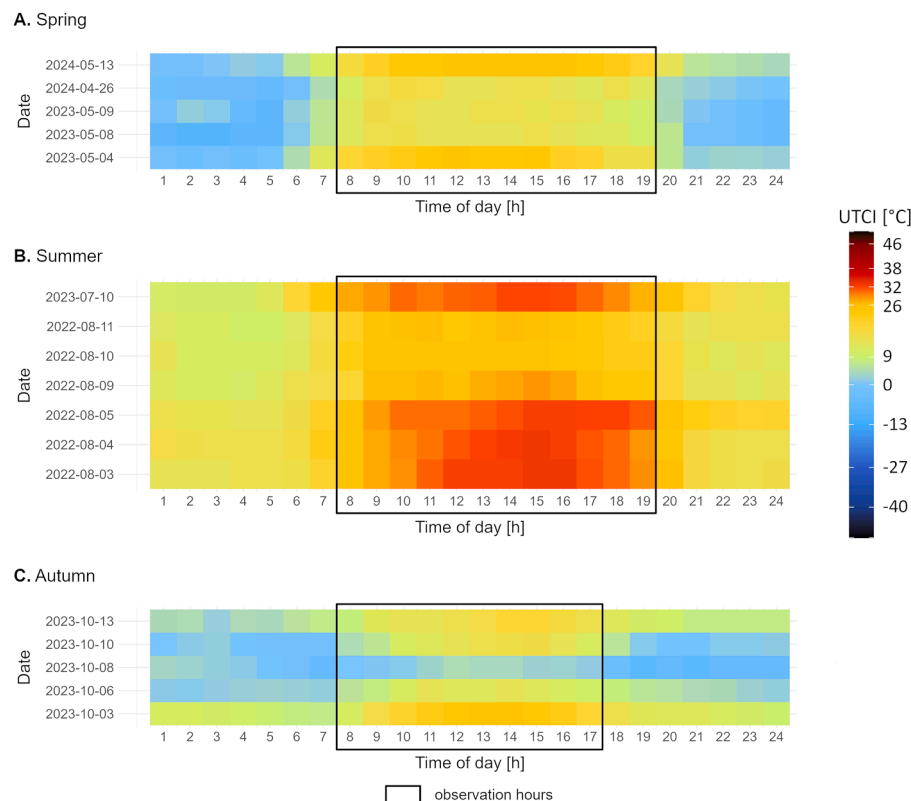


Fig. 2. Diurnal distribution of UTCI values from ERA5-HEAT for Warsaw, with colour scale representing UTCI thermal stress categories following Bröde et al., 2012 [36].

thermoneutral conditions occurring with 70.0% frequency (Fig. 2C).

3.1.2. Comparison of reanalysis and in-situ UTCI values

The UTCI values calculated from the in-situ measurement campaigns across all sites during the observation hours were higher than those derived from the ERA5-HEAT dataset for the node the closest to the centre of Warsaw (bias = -1.5 °C), reflecting differences between local conditions and the coarser-scale reanalysis (Fig. 3A). For all data combined, values of MAE (3.9 °C) and RMSE (4.9 °C) indicated a moderate spread of values around the line of agreement. Stratification by exposure revealed larger discrepancies in sun-exposed locations (Fig. 3B), whereas shaded sites showed closer agreement (Fig. 3C). Overall, ERA5-HEAT reproduced the variability of thermal conditions reasonably well, though absolute UTCI values were typically lower than in-situ measurements. In this dataset, the tendency for reanalysis to overestimate cold stress at the lowest end of the distribution likely reflects its higher wind-speed estimates, which strongly reduce UTCI values under cold conditions due to the physiological sensitivity of the index to convective heat loss [72,73] (Fig. A.2 in ESM). In contrast, in sun-exposed locations, the stronger daytime collinearity of air temperature, relative humidity, and MRT exerts a more dominant influence on UTCI. Shaded sites showed slightly higher explanatory power, suggesting a marginally better fit of the linear model than in sunlit conditions. This may reflect a tendency of ERA5-HEAT to underestimate high UTCI compared to the values derived from in-situ measurements in sun-exposed locations [74], although the difference in explained variance between exposure types was minor, amounting to only 1.3%.

3.1.3. Intra- and inter-park variability of bioclimatic conditions

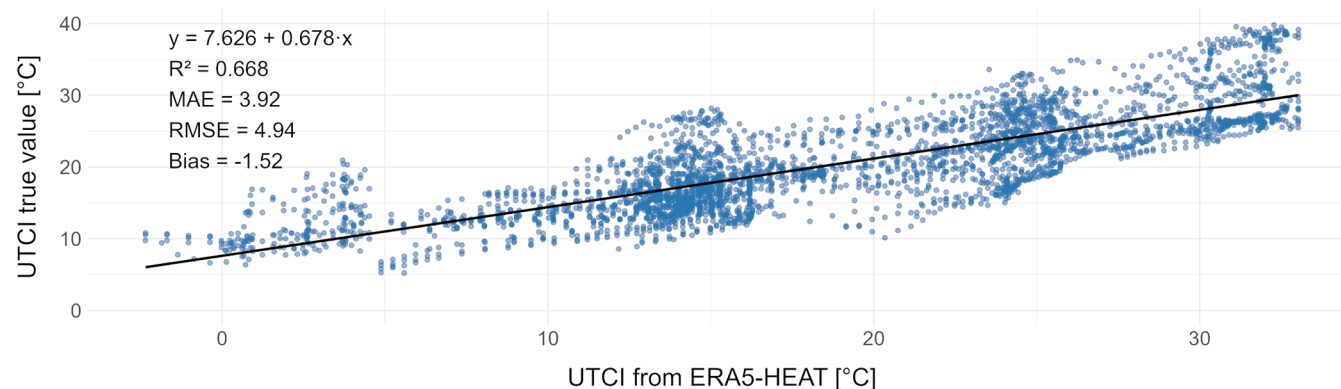
According to the in-situ measurements collected across all parks, UTCI values during the campaigns ranged from *slight cold stress* (5.2 °C) to *very strong heat stress* (39.8 °C). Heat-stress related categories occurred more frequently than suggested by the ERA5-HEAT reanalysis, and

substantial spatial variability was observed within individual parks between sun-exposed and shaded sites (Fig. 4).

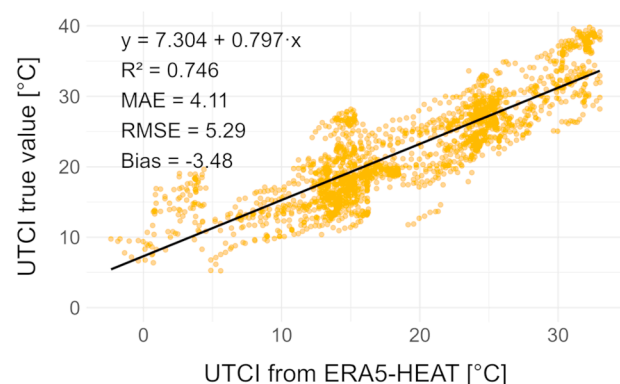
In spring (Fig. 4A), the lowest mean and minimum UTCI values were recorded in LAZ (15.5 °C; 8.6 °C), whereas KRO exhibited the highest mean and maximum UTCI values (20.0 °C; 28.2 °C), indicating that thermal stress levels ranged from *slight cold stress* to *moderate heat stress* across the sites. LAZ also showed the lowest maximum UTCI (22.5 °C), while BAZ recorded the highest minimum value (12.4 °C). Differences between sun-exposed and shaded locations within the same park ranged from 2.3 °C to 4.9 °C. This pattern generally applied to both minimum and maximum UTCI values, although isolated cases occurred in which shaded measurements were slightly higher than sun-exposed ones (e.g., in KRO, the minimum UTCI in shade was higher by 0.2 °C; in ZOO, the maximum UTCI was higher by 1.6 °C). These moderate and sometimes reversed contrasts were consistent with solar radiation variations and incomplete leaf-out in spring, which limit radiative differences between sites. In addition, unshaded locations were more exposed to radiative cooling and local airflow, occasionally resulting in lower UTCI compared to shaded sites.

During the summer campaign (Fig. 4B), the highest mean UTCI value was observed in ZOO (32.3 °C), while the lowest was in BAZ (23.7 °C), with the same trend observed in minimum values (23.4 °C and 18.6 °C, respectively) and maximum values (39.6 °C and 32.5 °C, respectively). These values indicate that summer bioclimatic conditions ranged from *no thermal stress* at the coolest sites to *very strong heat stress* at the warmest locations. Differences between sun-exposed and shaded sites were more pronounced than in spring: mean UTCI differences ranged from 3.8 °C in BAZ to as much as 9.7 °C in LAZ. Minimum and maximum UTCI values were higher in sun-exposed locations in all parks, although the magnitude of these differences varied, from 3.8 °C (ZOO) to only 0.1 °C (BAZ) for minimum values, and from 11.3 °C (LAZ) to 2.6 °C (ZOO) for maximum values. This pronounced divergence reflects the dominant role of solar radiation in summer, when fully developed canopy cover

A. All conditions



B. Sun-exposed



C. Shaded sites

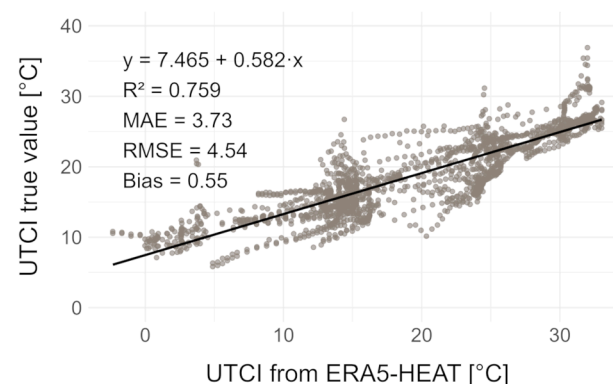


Fig. 3. Scatter comparison of in-situ versus ERA5-HEAT UTCI values: A) across all measurement sites, B) sun-exposed, and C) shaded locations.

strongly suppresses incoming radiation in shaded areas, thereby maximising the contrast between sun-exposed and shaded bioclimatic conditions.

Mean UTCI values during the autumn campaign were generally lower than in spring (Fig. 4C), reflecting reduced solar input and lower air temperature, although minimum and maximum UTCI values still indicated conditions ranging from *no thermal stress* to *moderate heat stress*. The highest mean value was recorded in MAL (24.0 °C) – the smallest park, while the remaining parks showed means closer to the lowest value observed in ZOO (11.8 °C) – situated close to the Vistula river. The highest maximum UTCI values were also noted in MAL and ZOO (31.2 °C; 20.9 °C), whereas the lowest minimum UTCI occurred in SKA (5.2 °C). As in spring, differences between sun-exposed and shaded measurement sites were smaller than in summer, ranging from 4.8 °C (SKA) to 1.2 °C (KRO). In several cases, both minimum (LAZ, SKA, KRO, MAL) and maximum (ZOO, MAL) UTCI values were slightly higher in shade than in sun-exposed locations. This reduced contrast is consistent with the seasonal decline in solar radiation and the canopy thinning, while increased exposure of sunlit sites to airflow and nocturnal heat loss, manifesting in the early morning and evening, can occasionally cause shaded locations to exhibit slightly higher UTCI.

3.2. Impact of environmental factors

3.2.1. Overview of GAM results across the growing season

Measurement sites located within parks and their immediate surroundings exhibited considerable heterogeneity in spatial arrangement, reflected in varying values of indicators that describe different components of the urban environment. In the GAM analysis, the local deviations of UTCI from the ERA5-HEAT reference ($UTCI_{diff}$) were related

to these characteristics – positive effects estimated by the model indicate that higher values of a given indicator were associated with increased UTCI relative to the reference, whereas negative effects indicate the opposite tendency. The extent and statistical significance of these relationships depended on the spatial scale at which the indicators were calculated, as well as on the seasonal variability of the prevailing biometeorological conditions.

The univariate GAM analysis (Fig. 5) revealed clear and statistically significant effects of multiple urban environmental variables on $UTCI_{diff}$ throughout the growing period. Ten quantitative indicators showed significant associations, with the modelled effects depending on spatial scales for metrics with multiple significant buffer zones (Fig. 5A–C). Only FAR showed no significance at any scale. Among the quantitative indicators, those related to the built environment exhibited strong positive associations with $UTCI_{diff}$ (ranging from approximately 0.6 °C for height-related metrics to 1.6 °C for measures of building density), whereas vegetation-related indicators were associated with decreases in $UTCI_{diff}$ (below 1 °C for RBVA, NDVI, and TCD, and above 1 °C for EVI and ELAI). Among the categorical variables, the most pronounced modelled effects were observed for vegetation type and sun/shade exposure (Fig. 5D). Changes in vegetation structure in reference to the open lawn caused $UTCI_{diff}$ reductions from 3.8 °C for dense clusters of deciduous tall trees, shrubs, and low grass (relative to open lawns; VEG_{spec, TC_A}) to 8.2 °C for clusters with a more open tree structure (VEG_{spec, TC_F}). Shade exposure further enhanced local cooling by 3.9 °C, contrasting sharply with the warming associated with quantitative openness indicators, such as SVF, where a 0.1-unit increase resulted in a 0.6 °C rise in UTCI.

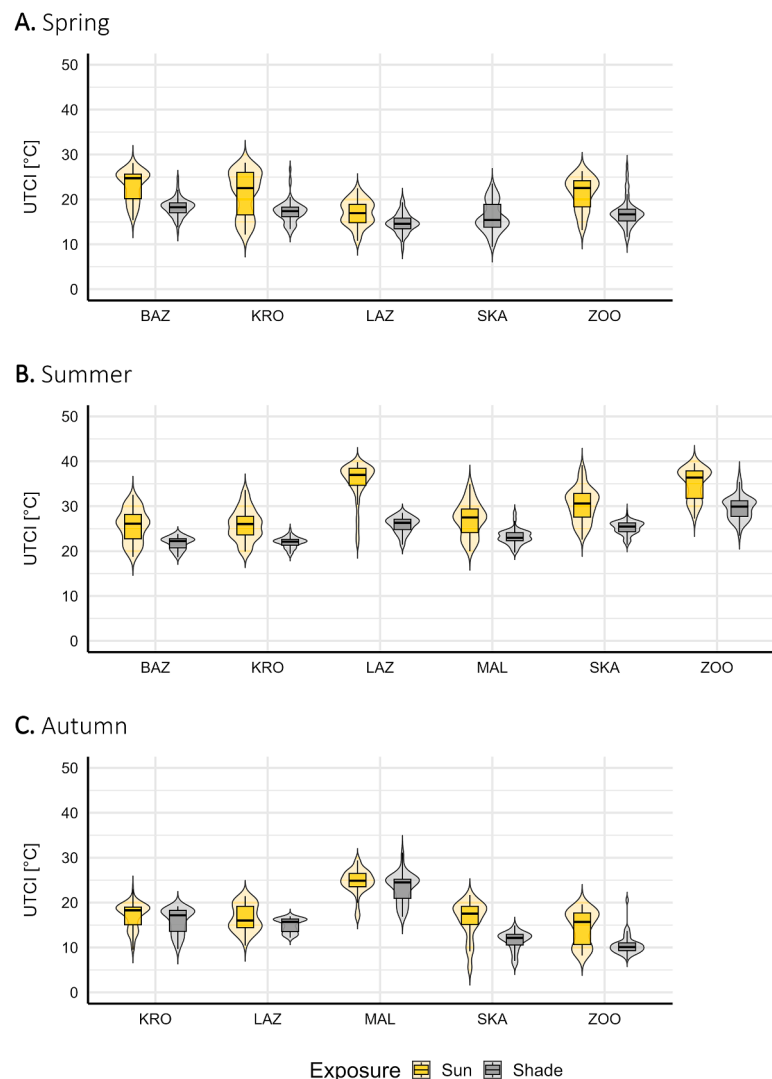


Fig. 4. Seasonal distribution of UTCI values at sun and shade measurement sites across parks.

3.2.2. Seasonal variation of environmental effects

Across the three seasons analysed separately, notable differences emerged in the statistical significance, spatial scale, and magnitude of relationships between $UTCI_{diff}$ and urban environmental indicators (Fig. A.3–5 in ESM). Spring exhibited the broadest range of significant quantitative variables, indicating that early-season thermal responses were sensitive to both vegetation and built-up characteristics. In contrast, summer retained significance only for a subset of five indicators, while autumn showed the most reduced set, limited to ELAI, SVF, NDBI and TCD. Although several indicators showed significance across multiple spatial buffers, the dominant buffer size varied by season: in spring, indicator values of the largest buffers (100 m and 50 m) yielded the highest number of significant effects. In summer, the majority of significant associations were observed at the 50 m radius buffer, while in autumn, the effects were distributed more evenly across buffer sizes, with no single scale clearly prevailing. Moreover, seasonal differences were also reflected in the variability of buffer-specific effect sizes: in summer, the effects showed the strongest divergence across scales, ranging from differences of approximately 0.1 °C to 1.3 °C, whereas in spring the maximum buffer-related variation reached only about 0.3 °C and in autumn remained close to 0.1 °C. These differences did not follow a consistent directional pattern, as increasing the buffer size did not systematically impact $UTCI_{diff}$ responses, varying by the indicator and season. Site-specific indicators, such as ELAI, SVF, and

EXPO (Fig. 6), remained consistently significant across all seasons, as did several recurrent categories within the categorical vegetation variables (VEG_{spec} and VEG_{gen}).

3.2.3. Effects of vegetation indicators

Throughout the growing period, vegetation-related metrics exhibited a clear tendency to reduce thermal stress; however, the statistical significance of different vegetation parameters varied depending on the season (Fig. A.3–5 in ESM). RBVA (up to 0.6 °C per 10%) and EVI (1 °C per 0.1 unit) showed a pronounced negative modelled effect only in spring, whereas NDVI demonstrated significant negative effects both in spring (0.8 °C per 0.1 unit) and summer (1.4 °C per 0.1 unit). Certain vegetation types were significant regardless of the analysed period, while some effects emerged only in particular seasons. The presence of tree clusters in contrast to lawns (VEG_{gen}) resulted in a decrease in $UTCI_{diff}$ ranging from 2.1 °C in autumn to 5.7 °C in summer. More specifically (VEG_{spec}), consistently significant classes in each season included tree clusters with dense vegetation, as well as deciduous and tall trees mixed with shrubs. The strongest effects were observed in spring and summer, particularly in areas where an understory was present, with reductions up to 7.2 °C. Indicators related to meadows, lawns with shrubs, and lawns combined with artificial surfaces were also significant, leading to an increase in $UTCI_{diff}$ compared to the reference open lawn in autumn, while in spring, lawns with shrubs exhibited a

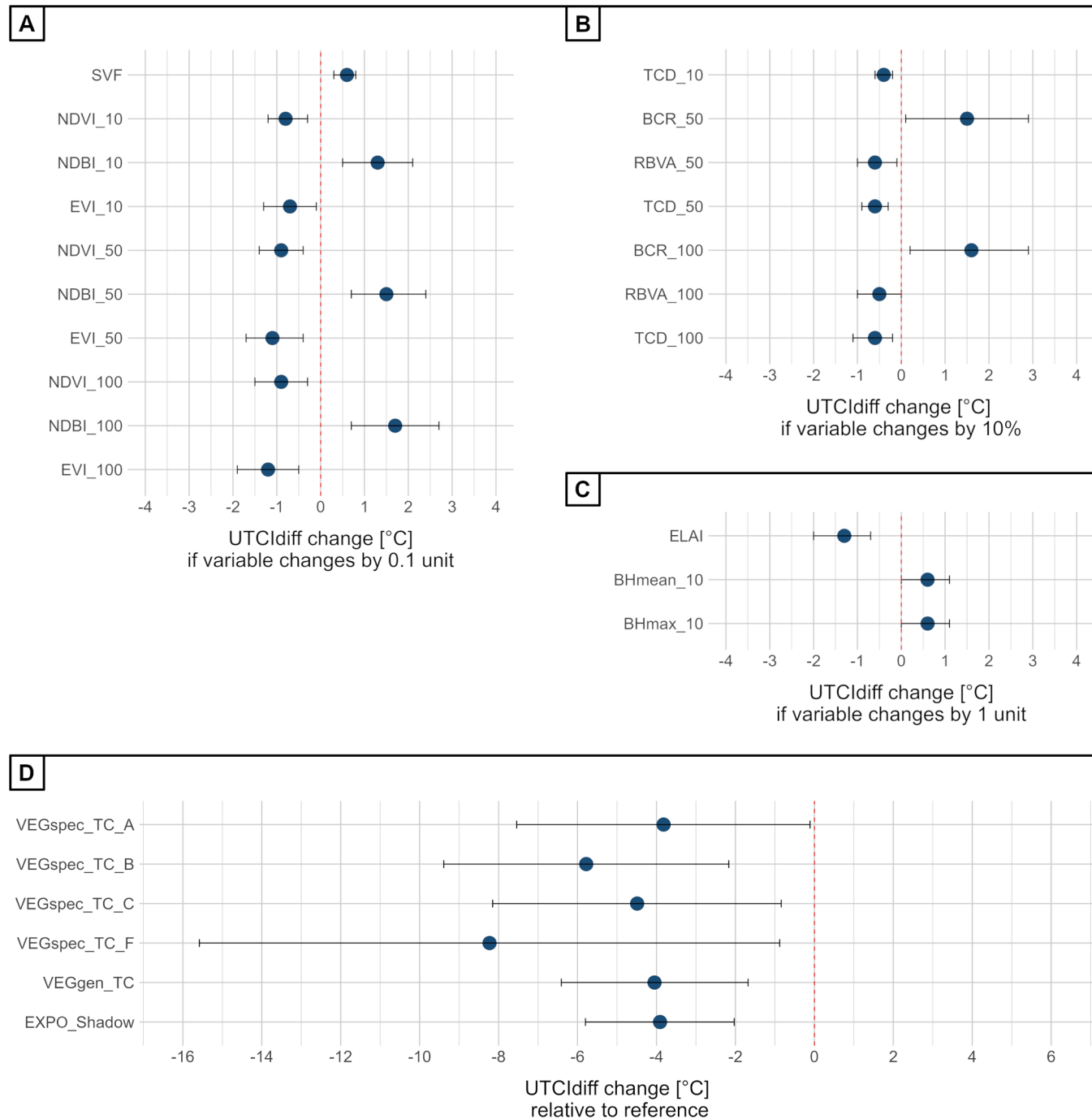


Fig. 5. Statistically significant ($p = 0.05$) effects of urban environmental factors on UTCI during the entire study period: (A) per 0.1 unit, (B) per 10% change, (C) per 1 unit, or (D) relative to the reference category.

Abbreviations of all indices are provided in [Table 2](#).

negative effect. Quantitative indicators that showed statistically significant modelled effects across all seasons of the growing period included TCD across all three buffer zones and site-specific ELAI ([Fig. 6](#) and [Fig. A.3–5](#) in ESM). Tree canopy density around measurement sites exerted a pronounced impact on the local bioclimate – higher TCD values were consistently associated with lower in-situ UTCI values (negative modelled effect by 10% from 0.3 °C in autumn for a 10 m radius buffer; 1.1 °C in summer for a 100 m radius buffer). Increases in ELAI corresponded to systematic reductions in field-measured UTCI relative to reanalysis values (negative modelled effect by 1 unit from 0.7 °C in autumn; 1.7 °C in spring), highlighting the effectiveness of dense tree canopies in shading and mitigating thermal stress.

3.2.4. Effects of built-up indicators

The only indicator directly related to built-up and impervious areas that showed a statistically significant modelled effect on increasing UTCI_{diff} across all seasons separately was satellite-derived NDBI, ranging from 0.7 °C in autumn to 2.6 °C in summer per 0.1 unit, both for the 50 m buffer ([Fig. 6](#) and [Fig. A.3–5](#) in ESM). This result reflects the strong heating of artificial materials and the limited cooling capacity. The effect was most pronounced in summer, highlighting the role of built-up areas in intensifying thermal stress ([Fig. 6](#)). Apart from NDBI, the only other indicator showing statistical significance was BCR for the 100 m buffer in spring, which increased UTCI_{diff} by 1.5 °C. This finding emphasises the importance of the broader local context during periods

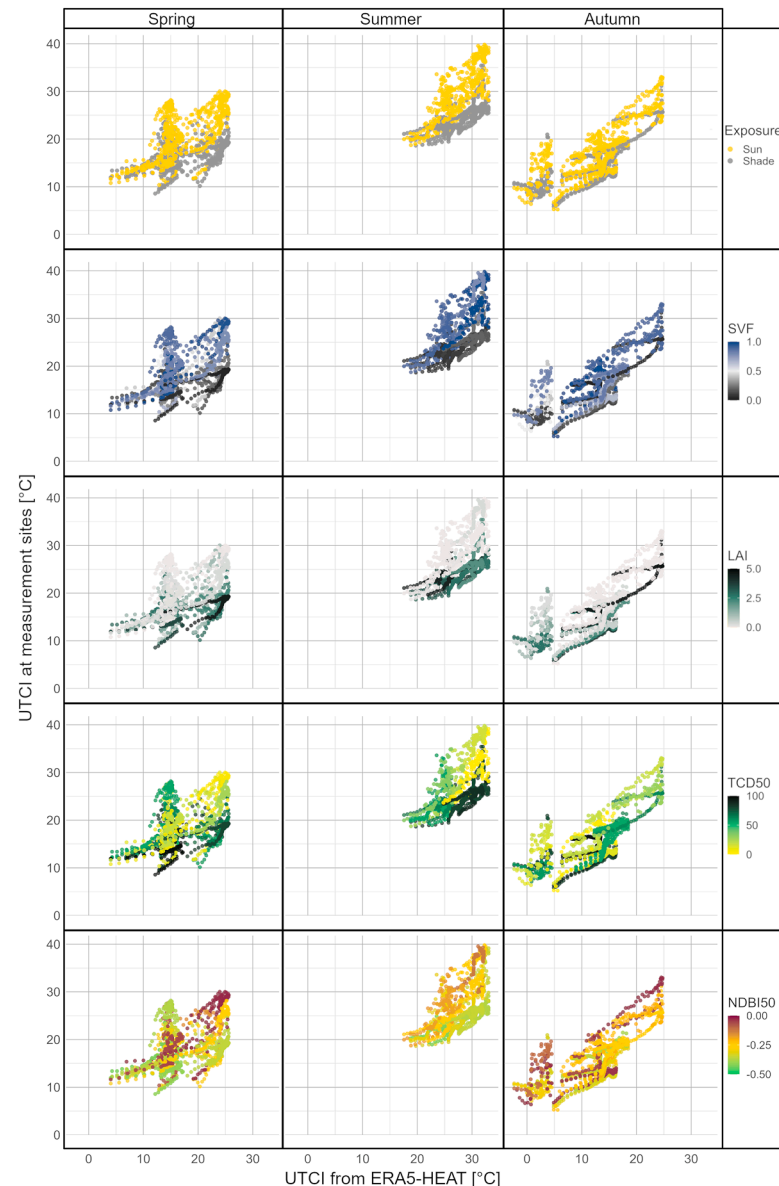


Fig. 6. Seasonal variability of UTCI from in-situ measurements and ERA5-HEAT reanalysis across selected indicators. Abbreviations of all indices are provided in [Table 2](#).

when thermal contrasts are smaller, and leaves are not yet fully developed.

3.2.5. Effects of openness and exposure indicators

Indicators that do not focus solely on built-up features or vegetation, but rather on the openness of a site and its overall exposure to solar radiation, include the categorical EXPO and the quantitative SVF – both modelled effects statistically significant across all seasons ([Fig. 6](#); [Fig. A.3–5](#) in ESM). Sites located in full sunlight consistently exhibited higher UTCI values compared to shaded sites, from 2.2 °C in autumn to the most pronounced differences in summer, 5.4 °C. Similarly, SVF, which describes the degree of sky view, influenced the magnitude of deviations between local measurements and reanalysis – higher SVF values were associated with elevated local UTCI (from 0.4 °C in autumn, 0.7 °C in spring and summer per 0.1 unit). Both indicators highlight the importance of spatial geometry and radiation availability as key determinants of the urban bioclimate.

4. Discussion

This study aimed to identify spatial indicators parametrising the urban environment that exert a significant effect on thermal stress in parks and their surroundings across different temporal and spatial scales. The GAM framework was applied to quantify how vegetation structure, built-up form, and site geometry shape local UTCI deviations, using in-situ biometeorological measurements from 23 sites across six Warsaw parks (in the growing seasons 2022–2024) combined with ERA5-HEAT as a reference. This multi-scale approach allowed for a systematic assessment of micro- to local-scale drivers of bioclimatic conditions across seasons. The detection of heat stress in parks during both spring and autumn demonstrates that physiologically burdensome conditions extend beyond the summer period, which is consistent with increasingly frequent scientific communications [75–77]. This is particularly relevant given that many studies, planning guidelines, and green-infrastructure designs prioritise mid-summer heat, when dense foliage provides the strongest cooling potential [78,79]. These findings highlight the need for planning and adaptation strategies that explicitly

account for transitional seasons and the strong influence of overall urban morphology on park bioclimates.

An important methodological aspect of this study is the use of ERA5-HEAT as a consistent background reference, which represents both a strength and a potential limitation [80]. This reanalysis dataset is widely used in climate studies across continents for inter-city and regional historical assessments, providing a robust basis for comparative evaluation [77,81,82]. Its potential for urban bioclimate studies as a proxy for the UTCI measured onsite was first highlighted by Krüger & Di Napoli in 2022 [74], who reported that ERA5-HEAT UTCI values may provide a reliable support for outdoor thermal stress research in the absence of in-situ observations and outperform WMO station data. However, their findings also indicate that the values may be underestimated under heat or cold stress, pointing out the need to consider these limitations when interpreting results. At the same time, the coarse spatial (0.25°) and temporal (1 h) resolution of ERA5-HEAT restricts the direct use of unprocessed reanalysis fields for detailed microclimate assessments [32, 83], particularly as discrepancies between reanalysis and measurements increase in complex environments characterised by varying surface roughness, such as urban areas [74]. Nevertheless, while assigning local reference points is a common approach, any such point within a heterogeneous urban environment is inherently influenced by complex microclimatic conditions. The use of the reanalysis in this research enabled comparability across measurement days by minimising inter-daily meteorological variability and isolating environmental drivers of local thermal stress. Applying ERA5-HEAT as a controlled background, rather than a direct representation of conditions in the city centre, demonstrates its potential value for bioclimatic studies, and future work should further explore its integration with high-resolution in-situ data and modelling approaches [83,84].

Vegetation composition is widely recognised as a key determinant of the urban thermal environment, with numerous studies demonstrating its capacity to reduce heat stress through evapotranspiration [85], altered wind patterns [9], as well as modified radiative exchange, including reduced incoming shortwave radiation, diminished longwave emission and overall radiant heat loads [86]. In this paper, vegetation indicators of the full dataset consistently emerged as significant predictors of local UTCI. RBVA, representing the proportion of biologically vital area, showed significance only in a few cases, at local-context scales. Although, according to the state of knowledge, RBVA and similar 2D metrics affect the air temperature [45,46], the lack of influence of this indicator on thermal stress level in urban space was stated by Lindner-Cendrowska et al. [44], which emphasises that its use in planning documents as a sole indicator related to vegetation is insufficient. NDVI and EVI showed only modest improvements as predictors of heat stress in urban parks. Nonetheless, given the high potential of data derived from satellite observations with high spatial and temporal resolution and the observed associations with thermal patterns in urban areas [87,88], further studies are required to explore the utility of these indices in bioclimatic assessments. In contrast, metrics directly linked to tree canopy density and size (TCD and the site-specific ELAI) were significant across the growing period, supporting earlier findings on the primary importance of canopy shading in mitigating thermal stress in various seasons, with the effect of TCD typically strengthening at larger buffer scales as it captures broader continuity of tree canopy cover [89, 90]. Recent work by Guo et al. [51] further suggests that high leaf density can optimise thermal comfort even with limited planting, whereas increased planting density can compensate for lower leaf area. The distinct role of trees in shaping the bioclimate was confirmed by the categorical vegetation typology: tree clusters consistently reduced UTCI compared with open lawns, with seasonal differences of up to 5 °C, in line with current knowledge [25,91–93]. The most notable cooling in summer, exceeding 7 °C, occurred in dense, tall deciduous clusters with shrub and understory layers, where conditions could shift by as much as two heat-stress categories. However, these findings are relevant to daytime conditions; at night, trees with dense canopies may retain heat,

whereas open lawns provide a cooling effect [94–96].

Urban parks are enclaves of greenery embedded within the urban fabric, and their thermal environment is influenced by the characteristics of the surrounding built environment [13,23,78]. In this study, built-up factors influenced local thermal stress primarily through the extent of artificial surfaces, as captured by NDBI. Unlike only building-related metrics, NDBI remained consistently significant in both the full research period analysis and all seasonal subsets, indicating that surface cover and material properties exert a strong control on local UTCI, with the effect being most pronounced during summer. These findings complement research on surface types, underscoring the need to limit the extent of impervious surfaces, particularly asphalt, and to keep this in mind when introducing large recreational or paved areas within urban parks [97,98]. Traditional indicators of urban form, such as building height and density, exhibited weaker and less frequent effects overall, while building intensity was not significant in any spatial or temporal scale. However, among these metrics, BCR in local-context scales emerged more often as a significant predictor than other morphology-related indicators, particularly in the growing-season model and in spring. Similar effects of built-up density have been reported by Yan et al. [99], indicating that an increase in BCR diminishes thermal comfort. Nevertheless, building structures surrounding the study sites were relatively sparse and spatially fragmented, even for the smallest parks, and were often separated from park edges by wide transportation corridors that increased their distance from compact development. Only a few measurement locations were entirely free of nearby buildings, while the remaining sites captured varying, but generally limited, degrees of built infrastructure within the analysed buffers. These characteristics likely attenuated the influence of building morphology in the applied models, reflecting the limited variability that is often typical of urban parks. Therefore, these results should be interpreted with caution and are not indicative of their potential importance in denser urban settings.

Beyond the vegetation metrics and build-up indicators in urban parks and their surroundings, the site's openness emerged as an equally important determinant of local thermal stress level, aligning with previous research [14,97,98,100]. Both indicators, SVF and EXPO, were among the most robust and seasonally consistent predictors of local UTCI deviations. Their pronounced modelled effects on UTCI across seasons further indicate that solar radiation strongly shapes bioclimatic conditions, also dependent on vegetation phenology. This reinforces extensive evidence that direct solar loading is the primary driver of thermal stress under clear-sky conditions and confirms that shading – whether from trees or other structures – remains the most effective means of reducing UTCI [44,101]. However, in temperate climates, the benefits of shading are inherently season-dependent, as complete and permanent sky obstruction may not be advantageous year-round. Deciduous tree canopies offer a particularly effective compromise, as their reduced foliage during winter allows increased solar penetration, which can locally elevate UTCI under sunny cold-season conditions, while providing substantial shading during summer heat [102]. Given the limited number of SVF-focused studies conducted specifically within urban parks, as well as occasional inconsistencies in reported results – likely stemming from the complex radiative effects of dense vegetation (reduction of reflected and emitted heat, as well as trapping longwave radiation) – further research is warranted on these relationships [100, 101,103]. Overall, these findings emphasise that managing sky obstruction and providing continuous shading should be central priorities in park design and in broader urban planning strategies aimed at mitigating heat stress.

While this study advances understanding of seasonal and spatial drivers of thermal stress in urban parks, several limitations should be acknowledged, as they also indicate directions for future research. The analysis did not aim to develop a single comprehensive model of environmental influences on UTCI, as the inclusion of multiple, partly overlapping indicators (e.g. SVF and ELAI) can introduce

interdependencies and complex combined effects. Instead, the focus was placed on identifying parameters with statistically significant individual relationships with UTCI, providing insights that remain valuable for urban planners and for informing future, integrative modelling approaches. Although the number of field campaigns and sampling sites was necessarily constrained by the in-situ nature of the measurements, care was taken to ensure representative locations and to target seasonally typical days with radiative weather. Given the focus on park environments, the variability of built-up indicators was inherently constrained, which likely contributed to their significance at the full-period scale but not within individual seasons. Furthermore, this study focuses on daytime conditions during the growing season, when vegetation exerts a strong influence on local microclimate in temperate climates. Winter and night-time measurements fall outside its scope, leaving the response of the urban parks' thermal environment under low or absent solar radiation to be explored in future research. Moreover, subsequent analysis will extend the present findings on urban parks' bioclimate by incorporating human thermal perception, acknowledging that subjective thermal sensations do not necessarily correspond to objectively measured conditions [44,104].

5. Conclusions

This study demonstrates that thermal stress in urban parks arises from complex, seasonally dependent interactions between vegetation, park spatial structure, and the surrounding urban fabric. The main conclusions are as follows:

- Reanalysis-based UTCI provided a robust comparative baseline, revealing consistent local deviations driven by park morphology and the surrounding built environment. In-situ measurements captured higher thermal stress than ERA5-HEAT, particularly under sun-exposed conditions.
- Tree clusters with dense, tall, multi-layered vegetation emerged as the cooling driver associated with local UTCI reductions of up to 7.2 °C; greenery indicators' consistent effects highlighted the importance of vegetation condition, structure, canopy cover and leaf density for mitigating thermal stress.
- NDBI exhibited statistically significant effects in all seasons, with the strongest influence under summer heat up to 2.6 °C, emphasising the substantial impact of anthropogenic surfaces on the urban bioclimate even within park areas.
- Sun exposure and sky openness (EXPO, SVF) were persistent determinants of local UTCI differences, underscoring the role of overall spatial geometry and radiation availability as key elements shaping the urban bioclimate.
- The influence of environmental factors on local UTCI was season- and scale-dependent, with indicators calculated for broader spatial buffers (radii of 50–100 m) showing the strongest effects in spring, indicators at the 50 m radius dominating in summer, and effects in autumn being more evenly distributed across buffer sizes.

Taken together, these findings advance the understanding of how urban parks' characteristics modify local bioclimate throughout the growing season under temperate climates. They proved that integrating vegetation layering, effective shade provisioning, and careful consideration of both intra-park structure and surrounding built-up areas can contribute to reducing local thermal stress.

Declaration of generative AI and AI-assisted technologies in the manuscript preparation process

During the preparation of this work the authors used ChatGPT in order to improve readability and language. After using this tool, the authors reviewed and edited the content as needed and take full responsibility for the content of the published article.

CRedit authorship contribution statement

Kaja Czarnecka: Writing – original draft, Visualization, Validation, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Magdalena Kuchcik:** Writing – review & editing, Supervision, Resources, Project administration, Funding acquisition, Conceptualization. **Kacper Derwisz:** Investigation, Data curation. **Anna Jarocińska:** Writing – review & editing, Conceptualization. **Anna Kowalska:** Writing – review & editing, Investigation, Conceptualization. **Katarzyna Lindner-Cendrowska:** Writing – review & editing, Supervision, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Daniel Rabczenko:** Methodology, Formal analysis.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

This study was supported by the Polish National Science Centre, grant: 2021/41/B/ST10/01997 (The role of urban parks in modifying city climate and bioclimate, today and in the future – CLIMPARK) led by Assoc. Prof. Magdalena Kuchcik (PI). The authors thank Dr Sandra Słowińska and Dr Jarosław Baranowski for their help during the measurement campaigns.

Supplementary materials

Supplementary material associated with this article can be found, in the online version, at [doi:10.1016/j.buildenv.2026.114506](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2026.114506).

Data availability

Data will be made available on request.

References

- [1] R. Aslanoglu, J.K. Kazak, S. Szebrański, M. Świąder, G. Arciniegas, G. Chrobak, et al., Ten questions concerning the role of urban greenery in shaping the future of urban areas, *Build. Environ.* 267 (2025) 112154, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112154>.
- [2] W. Zhang, B. Yang, R. Wang, X. Guo, An analysis of the effects of different urban park space environment construction on national health, *Front. Environ. Sci.* 12 (2024), <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1433319>.
- [3] L. Taylor, D.F. Hochuli, Defining greenspace: multiple uses across multiple disciplines, *Landsc. Urban. Plan.* 158 (2017) 25–38, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.09.024>.
- [4] Y. Toparlak, B. Blocken, B. Maiheu, G.J.F. van Heijst, The effect of an urban park on the microclimate in its vicinity: a case study for Antwerp, Belgium, *Int. J. Clim.* 38 (2018) e303–e322, <https://doi.org/10.1002/joc.5371>.
- [5] S. Ogce, H. Ogce, S. Yu, R.D. Brown, The interaction between urban heat island and urban parks: an in-situ measurement-based review, *Land. Use Policy.* 157 (2022) 107628, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2025.107628>.
- [6] S. Wu, X. Yao, Y. Qu, Y. Chen, Ecological benefits and plant landscape creation in urban parks: a study of Nanhu Park, Hefei, China, *Sustainability.* 15 (2023) 16553, <https://doi.org/10.3390/su152416553>.
- [7] W. Chen, J. Pan, S.J. Quan, H. Wei, W. Wang, Scalable impact of urban green infrastructure on urban climate: a critical review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 226 (2026) 116259, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116259>.
- [8] X. Xiao, L. Zhang, Y. Xiong, J. Jiang, A. Xu, Influence of spatial characteristics of green spaces on microclimate in Suzhou Industrial Park of China, *Sci. Rep.* 12 (2022) 9121, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13108-1>.
- [9] J. Fu, Y. Wang, D. Zhou, S.-J. Cao, Impact of urban park design on microclimate in Cold regions using newly developed prediction method, *Sustain. Cities. Soc.* 80 (2022) 103781, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103781>.
- [10] R. Kraemer, N. Kabisch, Parks under stress: air temperature regulation of urban green spaces under conditions of drought and summer heat, *Front. Environ. Sci.* 10 (2022), <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.849965>.
- [11] H. Luyao, L. Ling, L. Xinkai, D. Junfeng, Outdoor thermal comfort benchmarks and optimization design for children in open parks of hot summer and cold winter

- region, *Sci. Rep.* 15 (2025) 16702, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95979-8>.
- [12] P. Zheng, R. Yao, J. O'Donnell, E. Mohareb, P. Kumar, C. Pain, et al., A comprehensive review of thermal comfort evaluation methods and influencing factors for urban parks, *Build. Environ.* 267 (2025) 112159, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112159>.
- [13] Z. Liang, Z. Li, Z. Fan, Seasonal impacts of built environment and its interactions on urban park cooling effects in Nanjing, China, *Build. Environ.* 242 (2023) 110580, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110580>.
- [14] Q. Fan, X. Li, H. Li, Crowd gathering and thermal comfort research in different park shading spaces, *Sustainability* 14 (2022) 2687, <https://doi.org/10.3390/su14052687>.
- [15] Y. Chen, Y. Wang, D. Zhou, Knowledge map of Urban morphology and Thermal comfort: a bibliometric analysis based on CiteSpace, *Buildings* 11 (2021) 427, <https://doi.org/10.3390/buildings11100427>.
- [16] R. Twardosz, Anomalnie ciepłe miesiące 2018 roku w Polsce a wzorce cyrkulacji powietrza, *Weather* 74 (2019) 374, <https://doi.org/10.1002/wea.3588>.
- [17] Kim, Y.-H., Min, D.-H., Cha, Byun, Y.-H., Lott, F.C.; Attribution of the unprecedented 2021 October heatwave in South Korea (2022), [doi:10.1175/BAMS-D-22-0124.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-22-0124.1).
- [18] M. Zachariah, T. Arulalan, K. AchutaRao, F. Saeed, R. Jha, M.K. Dhasmana, et al., Attribution of 2022 early-spring heatwave in India and Pakistan to climate change: lessons in assessing vulnerability and preparedness in reducing impacts, *Env. Res. Clim.* 2 (2023) 045005, <https://doi.org/10.1088/2752-5295/acf4b6>.
- [19] J. Laimighofer, H. Formayer, Climate change contribution to the 2023 autumn temperature records in Vienna, *Sci. Rep.* 14 (2024) 4213, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54822-2>.
- [20] J. Blachowski, M. Hajnrych, Assessing the cooling effect of four urban parks of different sizes in a temperate continental climate zone: wrocław (Poland), *Forests* 12 (2021) 1136, <https://doi.org/10.3390/f12081136>.
- [21] L. Wang, W. Wang, F. Tang, H. Xu, Optimizing urban park cooling effects requires balancing morphological design and landscape structure, *Sci. Rep.* 15 (2025) 15435, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98249-9>.
- [22] P.K. Cheung, C.Y. Jim, C.T. Siu, Effects of urban park design features on summer air temperature and humidity in compact-city milieu, *Appl. Geogr.* 129 (2021) 102439, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2021.102439>.
- [23] S.Y. Chan, C.K. Chau, On the study of the effects of microclimate and park and surrounding building configuration on thermal comfort in urban parks, *Sustain. Cities. Soc.* 64 (2021) 102512, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102512>.
- [24] Y. Yang, Y. Lv, D. Zhou, The impact of urban parks on the thermal environment of built-up areas and an optimization method, *PLoS. One* 20 (2025) e0318633, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318633>.
- [25] M. Lehnert, V. Tokar, M. Jurek, J. Geletić, Summer thermal comfort in Czech cities: measured effects of blue and green features in city centres, *Int. J. Biometeorol.* 65 (2021) 1277–1289, <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02010-y>.
- [26] V. Květoňová, J. Pánek, J. Geletić, P. Šimáček, M. Lehnert, Where is the heat threat in a city? different perspectives on people-oriented and remote sensing methods: the case of Prague, *Heliyon* 10 (2024) e36101, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36101>.
- [27] J. Geletić, M. Lehnert, J. Resler, P. Krč, M. Bureš, A. Urban, et al., Heat exposure variations and mitigation in a densely populated neighborhood during a hot day: towards a people-oriented approach to urban climate management, *Build. Environ.* 242 (2023) 110564, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110564>.
- [28] S. Cocco, J. Kämpf, J.-L. Scartezini, D. Pearlmutter, Outdoor human comfort and thermal stress: a comprehensive review on models and standards, *Urban. Clim.* 18 (2016) 33–57, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.004>.
- [29] Z. Yu, G. Yang, S. Zuo, G. Jørgensen, M. Koga, H. Vejre, Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: a threshold-size perspective, *Urban Urban Green* 49 (2020) 126630, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126630>.
- [30] K. Błażejczyk, G. Jendritzky, P. Bröde, D. Fiala, G. Havenith, Y. Epstein, et al., An introduction to the Universal Thermal Climate Index (UTCI), *Geogr. Pol.* 86 (2013) 5–10, <https://doi.org/10.7163/GPol.2013.1>.
- [31] K. Błażejczyk, Y. Epstein, G. Jendritzky, H. Staiger, B. Tinz, Comparison of UTCI to selected thermal indices, *Int. J. Biometeorol.* 56 (2012) 515–535, <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>.
- [32] C. Di Napoli, C. Barnard, C. Prudhomme, H.L. Cloke, F. Pappenberger, ERA5-HEAT: a global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis, *Geosci. Data J.* 8 (2021) 2–10, <https://doi.org/10.1002/gdj3.102>.
- [33] Di Napoli, C., Barnard, C., Prudhomme, C., Cloke, H.L., Pappenberger, F., Thermal comfort indices derived from ERA5 reanalysis (2020), [doi:10.24381/cds.553b7518](https://doi.org/10.24381/cds.553b7518).
- [34] M.C. Peel, B.L. Finlayson, T.A. McMahon, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth. Syst. Sci.* 11 (2007) 1633–1644, <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- [35] F. Rubel, M. Kottek, Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification, *Meteorol. Z.* 19 (2010) 135–141, <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430>.
- [36] P. Bröde, D. Fiala, K. Błażejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, et al., Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI), *Int. J. Biometeorol.* 56 (2012) 481–494, <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.
- [37] K. Wrona, Differentiation of air temperature inside an urban park on the example of the Polish Aviators' Park (Park Lotników Polskich) in Cracow, *Acta. Geogr. Lodz.* 113 (2023) 29–46, <https://doi.org/10.26485/AGL/2023/113/2>.
- [38] R Core Team, R: a language and environment for statistical computing [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing, 2024. <https://www.R-project.org/>.
- [39] T.R. Oke, *Boundary Layer Climates*, 2nd edition, Routledge, 2002.
- [40] J.K. Vanos, K. Rykaczewski, A. Middel, D.J. Vecellio, R.D. Brown, T.J. Gillespie, Improved methods for estimating mean radiant temperature in hot and sunny outdoor settings, *Int. J. Biometeorol.* 65 (2021) 967–983, <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02131-y>.
- [41] K. Lindner-Cendrowska, J. Baranowski, Niepewność pomiarów średniej temperatury promieniowania za pomocą termometrów kulistych = Uncertainty of mean radiant-temperature measurements using globe thermometers, *Prz. Geogr.* (2023), <https://doi.org/10.7163/PrzG.2023.3.4>.
- [42] K. Liu, W. You, X. Chen, W. Liu, K. Liu, W. You, et al., Study on the influence of globe thermometer method on the accuracy of calculating outdoor mean radiant temperature and thermal comfort, *Atmos. (Basel)* 13 (2022), <https://doi.org/10.3390/atmos13050809>.
- [43] A. Banfi, A. Tatti, M. Ferrando, D. Fustinoni, F. Zanghirella, F. Causone, An experimental technique based on globe thermometers for the measurement of mean radiant temperature in urban settings, *Build. Environ.* 222 (2022) 109373, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109373>.
- [44] K. Lindner-Cendrowska, K. Czarnecka, D. Rabczenko, From regulations to reality: testing urban planning metrics against human thermal comfort in a modern residential district, *Sustain. Cities. Soc.* (2025) 107011, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.107011>.
- [45] K. Czarnecka, M. Kuchcik, J. Baranowski, Spatial development indicators as a tool to determine thermal conditions in an urban environment, *Sustain. Cities. Soc.* 100 (2024) 105014, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105014>.
- [46] M. Petralli, L. Massetti, G. Brandani, S. Orlandini, Urban planning indicators: useful tools to measure the effect of urbanization and vegetation on summer air temperatures, *Int. J. Clim.* 34 (2014) 1236–1244, <https://doi.org/10.1002/joc.3760>.
- [47] J.W. Rouse, Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation, *Tex. AM Univ. Coll. Stn. TX. U. S.* (1974). NASA-CR-139243.
- [48] A. Huete, K. Didan, T. Miura, E.P. Rodriguez, X. Gao, L.G. Ferreira, Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices, *Remote Sens. Environ.* 83 (2002) 195–213, [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2).
- [49] Y. Zha, J. Gao, S. Ni, Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery, *Int. J. Remote Sens.* 24 (2003) 583–594, <https://doi.org/10.1080/014311603004987>.
- [50] Y. Xu, C. Ren, P. Ma, J. Ho, W. Wang, K.K.-L. Lau, et al., Urban morphology detection and computation for urban climate research, *Landsc. Urban. Plan.* 167 (2017) 212–224, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.06.018>.
- [51] T. Guo, Y. Zhao, J. Yang, Z. Zhong, K. Ji, Z. Zhong, et al., Effects of tree arrangement and leaf area index on the thermal comfort of outdoor children's activity space in hot-humid areas, *Buildings* 13 (2023) 214, <https://doi.org/10.3390/buildings13010214>.
- [52] B. Holmer, U. Postgård, M. Eriksson, Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI, *Theor. Appl. Clim.* 68 (2001) 33–40, <https://doi.org/10.1007/s007040170051>.
- [53] F. Lindberg, B. Holmer, Sky View Factor Calc. – User Man, Version 1.1. (2012). https://cms.it.gu.se/infogluue/DeliverWorking/digitalAssets/1377/1377754_skyviewfactorcalculator-user-manual.pdf.
- [54] G.W. Frazer, C.D. Canham, K.P. Lertzman, Gap Light Analyzer (GLA), Version 2.0: Imaging software to Extract Canopy Structure and Gap Light Transmission Indices from True-Colour Fisheye Photographs, Users Manual and Program Documentation, Simon Fraser Univ. Burnaby Br. Columbia Inst. Ecosyst. Stud., Millbrook N.Y., 1999. Copyr. © 1999.
- [55] Z. Wu, Y. Zhou, Y. Ren, Green space-building integration for Urban Heat Island mitigation: insights from Beijing's fifth ring road district, *Sustain. Cities. Soc.* 116 (2024) 105917, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105917>.
- [56] R. Chen, C. Wang, X. Que, F.H. Liao, X. Ma, Z. Wang, et al., Exploring urban heat distribution and thermal comfort exposure using spatiotemporal weighted regression (STWR), *Buildings* 14 (2024) 1883, <https://doi.org/10.3390/buildings14061883>.
- [57] Y. Xu, J. Yang, Y. Zheng, W. Li, Impacts of two-dimensional and three-dimensional urban morphology on urban thermal environments in high-density cities: a case study of Hong Kong, *Build. Environ.* 252 (2024) 111249, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111249>.
- [58] S. Xu, S. Wang, G. Li, H. Zhou, C. Meng, Y. Qin, et al., Performance-based design of residential blocks for the co-benefits of building energy efficiency and outdoor thermal comfort improvement, *Build. Environ.* 264 (2024) 111926, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111926>.
- [59] L. Tschritzis, M. Nikolopoulou, The effect of building height and façade area ratio on pedestrian wind comfort of London, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 191 (2019) 63–75, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.05.021>.
- [60] I. Zeren Cetin, T. Varol, H.B. Ozel, A geographic information systems and remote sensing-based approach to assess urban micro-climate change and its impact on human health in Bartın, *Turk. Env. Monit. Assess.* 195 (2023) 540, <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11105-z>.
- [61] M. Muhaimin, D. Adyatma, S. Fitriani, D. Arisanty, Mapping built-up area density using normalized difference built-up index (ndbi) and urban index (ui) wetland in the city banjarmasin, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022. Vol. 1089 4th IGEOS Int. Geogr. Semin. 2020 29092020 - 30092020 Online, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1089/1/012036>.

- [62] A. Santos, F. Santil, C. Silva, A. Santos, F. Santil, C. Silva, The use of NDVI and NDBI to provide subsidies to public manager's decision making on maintaining the thermal comfort in urban areas. *Veg. Index Dyn., IntechOpen*, 2022, <https://doi.org/10.5772/intechopen.97350>.
- [63] H.M. Imran, A. Hossain, A.K.M.S. Islam, A. Rahman, M.A.E. Bhuiyan, S. Paul, et al., Impact of land cover changes on land surface temperature and Human thermal comfort in Dhaka City of Bangladesh, *Earth Syst. Env.* 5 (2021) 667–693, <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00243-4>.
- [64] S.C. Freden, E.P. Mercanti, M.A. Becker, in: *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium: The Proceedings of a Symposium Held by Goddard Space Flight Center at Washington, D.C. on December 10-14, 1973 : Prepared at Goddard Space Flight Center. Scientific and Technical Information Office, National Aeronautics and Space Administration*, 1974.
- [65] B. Szulcowska, R. Giedych, J. Borowski, M. Kuchcik, P. Sikorski, A. Mazurkiewicz, et al., How much green is needed for a vital neighbourhood? In search for empirical evidence, *Land. use policy*. 38 (2014) 330–345, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.11.006>.
- [66] K. Kimic, A. Fekete, The ratio of biologically vital areas as a measure of the sustainability of urban parks using the example of Budapest, *Hung. Resour.* 11 (2022) 47, <https://doi.org/10.3390/resources11050047>.
- [67] W. Zhou, G. Huang, S.T.A. Pickett, J. Wang, M.L. Cadenasso, T. McPhearson, et al., Urban tree canopy has greater cooling effects in socially vulnerable communities in the US, *One Earth*. 4 (2021) 1764–1775, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.11.010>.
- [68] P. Stenberg, S. Linder, H. Smolander, J. Flower-Ellis, Performance of the LAI-2000 plant canopy analyzer in estimating leaf area index of some Scots pine stands, *Tree Physiol.* 14 (1994) 981–995, <https://doi.org/10.1093/treephys/14.7-8-9.981>.
- [69] L. Liu, J. Wu, Z. Liang, J. Gao, J. Hang, J. Liu, et al., Spatio-temporal analysis of local thermal environment in waterfront blocks along the both sides of pearl river in Guangzhou, China. *Case Stud Therm Eng* 53 (2024) 103875, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103875>.
- [70] R Core Team, R: a language and environment for statistical computing [Computer software], in: *R Foundation for Statistical Computing*, 2025. <https://www.R-project.org/>.
- [71] S.N. Wood, *Generalized Additive Models: An Introduction With R*, 2nd ed., Chapman and Hall/CRC, New York, 2017 <https://doi.org/10.1201/9781315370279>. Second Edition.
- [72] S. Provençal, O. Bergeron, R. Leduc, N. Barrette, Thermal comfort in Quebec City, Canada: sensitivity analysis of the UTCI and other popular thermal comfort indices in a mid-latitude continental city, *Int. J. Biometeorol.* 60 (2016) 591–603, <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1054-2>.
- [73] P. Bröde, K. Blazejczyk, D. Fiala, G. Havenith, I. Holmér, G. Jendritzky, et al., The Universal Thermal Climate Index UTCI compared to ergonomics standards for assessing the thermal environment, *Ind. Health* 51 (2013) 16–24, <https://doi.org/10.2486/indhealth.2012-0098>.
- [74] E.L. Krüger, C. Di Napoli, Feasibility of climate reanalysis data as a proxy for onsite weather measurements in outdoor thermal comfort surveys, *Theor. Appl. Clim.* 149 (2022) 1645–1658, <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04129-x>.
- [75] M.M. Pecelj, M.Z. Lukić, D.J. Filipović, B.M. Protić, U.M. Bogdanović, Analysis of the Universal Thermal Climate Index during heat waves in Serbia, *Nat. Hazards Earth. Syst. Sci.* 20 (2020) 2021–2036, <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2021-2020>.
- [76] A.M. Tomczyk, A. Matzarakis, Characteristic of bioclimatic conditions in Poland based on physiologically equivalent temperature, *Int. J. Biometeorol.* 67 (2023) 1991–2009, <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02557-6>.
- [77] L. Mărmureanu, B. Antonescu, D. Ene, S. Andrei, R. Turcu, Changes in the thermal stress across Europe between 1940 and 2023, *Int. J. Biometeorol.* (2025), <https://doi.org/10.1007/s00484-025-03043-x>.
- [78] X. Zhang, M.F. Shahidan, S. Maruthaveeran, Urban park cooling strategies for thermal comfort improvement in humid subtropical climates: a review of empirical evidence, *Sustain. Cities. Soc.* 131 (2025) 106706, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106706>.
- [79] N. Halder, M. Kumar, A. Deepak, S.K. Mandal, A. Azmeer, B.A. Mir, et al., The role of urban greenery in enhancing thermal comfort: systematic review insights, *Sustainability*. 17 (2025), <https://doi.org/10.3390/su17062545>.
- [80] W.S. Parker, Reanalyses and observations: what's the difference? *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 97 (2016) 1565–1572, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00226.1>.
- [81] V.F.V.V. Miranda, D.M. dos Santos, L.F. Peres, C. Salvador, R. Nieto, G.V. Müller, et al., Heat stress in South America over the last four decades: a bioclimatic analysis, *Theor Appl Clim.* 155 (2024) 911–928, <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04668-x>.
- [82] E. Krüger, J.P.A. Gobo, G.T. Tejas, R.M. da Silva de Souza, J.B.F. Neto, G. Pereira, et al., The impact of urbanization on heat stress in Brazil: a multi-city study, *Urban. Clim.* 53 (2024) 101827, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101827>.
- [83] Z. Yang, J. Peng, S. Jiang, X. Yu, T. Hu, Optimizing building spatial morphology to alleviate human thermal stress, *Sustain. Cities. Soc.* 106 (2024) 105386, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105386>.
- [84] X. Zheng, N. Meili, S. Li, H. Wang, L. Xu, Z. Han, et al., Reanalysis-data-based approach to generate urban local weather data to support building energy design in a tropical climate, *Sustain. Cities. Soc.* 131 (2025) 106629, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106629>.
- [85] W. Ma, Z. Yu, J. Chen, W. Yang, Y. Zhang, Y. Hu, et al., What drives the cooling dynamics of urban vegetation via evapotranspiration and shading under extreme heat? *Sustain. Cities. Soc.* 130 (2025) 106659, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106659>.
- [86] F. Lindberg, C.S.B. Grimmond, The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation, *Theor. Appl. Clim.* 105 (2011) 311–323, <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0382-8>.
- [87] A.Y. Davis, J. Jung, B.C. Pijanowski, E.S. Minor, Combined vegetation volume and “greenness” affect urban air temperature, *Appl. Geogr.* 71 (2016) 106–114, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.04.010>.
- [88] L.S. Ferreira, D.H.S. Duarte, Exploring the relationship between urban form, land surface temperature and vegetation indices in a subtropical megacity, *Urban. Clim.* 27 (2019) 105–123, <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.11.002>.
- [89] M.A. Rahman, L.M.F. Stratopoulos, A. Moser-Reischl, T. Zölch, K.-H. Häberle, T. Rötzer, et al., Traits of trees for cooling urban heat islands: a meta-analysis, *Build. Environ.* 170 (2020) 106606, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106606>.
- [90] T. Jiang, E.S. Krayenhoff, A. Martilli, N. Nazarian, B. Stone, J.A. Voogt, Prioritizing urban heat adaptation infrastructure based on multiple outcomes: comfort, health, and energy, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 122 (2025) e2411144122, <https://doi.org/10.1073/pnas.2411144122>.
- [91] H. Lee, H. Mayer, L. Chen, Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany, *Landsc. Urban. Plan.* 148 (2016) 37–50, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.004>.
- [92] X. Nie, J. Lin, J. Ma, B. Cao, Y. Li, Y. Lu, et al., The cooling effect of plant configuration on urban parks green space in temperate continental climate zones, *Appl. Spat. Anal. Policy*. 17 (2024) 1463–1483, <https://doi.org/10.1007/s12061-024-09590-x>.
- [93] F. Lindberg, N. Wallenberg, S. Thorsson, M. Haeger-Eugensson, J. Lönn, B. Holmberg, et al., Micro-scale, city-wide analysis of outdoor thermal comfort during heatwaves in high latitude cities: influence of building geometry and vegetation, *Int. J. Biometeorol.* 69 (2025) 3421–3434, <https://doi.org/10.1007/s00484-025-03030-2>.
- [94] A. Middel, E.S. Krayenhoff, Micrometeorological determinants of pedestrian thermal exposure during record-breaking heat in Tempe, Arizona: introducing the MarTty observational platform, *Sci Total Env.* 687 (2019) 137–151, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.085>.
- [95] M. Jurek, J. Geletić, A. Koukalová, V. Květoňová, A. Létal, M. Lehnert, Measured nighttime effect of green, blue, and grey features on thermal exposure: a pilot study in Czech cities, *Energy Build.* 343 (2025) 115952, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115952>.
- [96] A. Wujeska-Klaue, S. Pfautsch, A. Wujeska-Klaue, S. Pfautsch, The best urban trees for daytime cooling leave nights slightly warmer, *Forests*. 11 (2020), <https://doi.org/10.3390/f11090945>.
- [97] A.H.A. Mahmoud, Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions, *Build. Environ.* 46 (2011) 2641–2656, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.06.025>.
- [98] M. Petralli, L. Massetti, D. Pearlmuter, G. Brandani, A. Messeri, S. Orlandini, UTCI field measurements in an urban park in Florence (Italy), *Misc. Geogr.* 24 (2020) 111–117, <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2020-0017>.
- [99] D. Yan, L. Xu, Q. Wang, J. Feng, X. Wu, D. Yan, et al., Quantifying landscape effects on urban park thermal environments using ENVI-met and 3D grid profile analysis, *Forests*. 16 (2025), <https://doi.org/10.3390/f16071085>.
- [100] Q. Wang, W. Sun, S. Tang, X. Zhou, SVI-GVI integration for thermal comfort in urban parks: a case study of Changchun in cold regions, *Theor. Appl. Clim.* 156 (2025) 318, <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05491-2>.
- [101] A. Middel, S. AlKhaled, F.A. Schneider, B. Hagen, P. Coseo, 50 Grades of shade, *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 102 (2021) E1805–E1820, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0193.1>.
- [102] H. Li, Y. Zhao, C. Wang, D. Ürges-Vorsatz, J. Carmeliet, R. Bardhan, Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait, *Commun. Earth Environ.* 5 (2024) 754, <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01908-4>.
- [103] A. Karimi, H. Sanaieian, H. Farhadi, S. Norouzian-Maleki, Evaluation of the thermal indices and thermal comfort improvement by different vegetation species and materials in a medium-sized urban park, *Energy Rep.* 6 (2020) 1670–1684, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.06.015>.
- [104] P. Pandya, M. Llaguno-Munitxa, M.G. Edwards, E. Lacroix, G. Manoli, A. Middel, Environmental, neuropsychological, and physiological factors in urban outdoor thermal comfort assessments: a systematic review, *Int. J. Biometeorol.* 69 (2025) 1819–1841, <https://doi.org/10.1007/s00484-025-02942-3>.

Electronic Supplemental Material

to the article:

Assessing the role of environmental factors in shaping human thermal stress within urban parks during the growing season

Kaja CZARNECKA^a, czarnecka@twarda.pan.pl, Magdalena KUCHCIK^a, Katarzyna LINDNER-CENDROWSKA^a,
Kacper DERWISZ^b, Anna JAROCIŃSKA^b, Anna KOWALSKA^c, Daniel RABCZENKO^d

^a Climate Research Department, Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences,
Twarda 51/55, 00-818 Warsaw, Poland

^b Department of Geoinformatics, Cartography and Remote Sensing, Faculty of Geography and Regional Studies, University of Warsaw,
Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warsaw, Poland

^c Department of Geocology, Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences,
Twarda 51/55, 00-818 Warsaw, Poland

^d National Institute of Public Health - National Institute of Hygiene, Chocimska 24, 00-791 Warsaw, Poland

Table of Contents

Table A.1. Universal Thermal Climate Index (UTCI) thermal stress categories.	2
Table A.2. Technical specification of the instrumentation used for the measurements.	2
Table A.3. Overview of measurement campaign dates and Sentinel-2 observation dates.	3
Fig. A.1. Diurnal distribution of UTCI values from ERA5-HEAT for Warsaw during the entire study period (1 July 2022 – 30 September 2024).	3
Table A.4. Minimum, maximum, and quartile values of ERA5-HEAT UTCI for Warsaw during the measurement campaigns.....	4
Fig. A.2. Distributions of mean radiant temperature (A), air temperature (B), relative humidity (C), and wind speed at 10 m (D) with reanalysis background reference.....	5
Fig. A.3. Statistically significant ($p = 0.05$) effects of urban environmental factors on UTCI in spring: (A) per 0.1 unit, (B) per 10% change, (C) per 1 unit, or (D) relative to the reference category.....	6
Fig. A.4. Statistically significant ($p = 0.05$) effects of urban environmental factors on UTCI in summer: (A) per 0.1 unit, (B) per 10% change, (C) per 1 unit, or (D) relative to the reference category.	7
Fig. A.5. Statistically significant ($p = 0.05$) effects of urban environmental factors on UTCI in autumn: (A) per 0.1 unit, (B) per 10% change, (C) per 1 unit, or (D) relative to the reference category.	8
References	9

Table A.1. Universal Thermal Climate Index (UTCI) thermal stress categories.

UTCI range (°C)	Stress category
above +46	extreme heat stress
+38 to +46	very strong heat stress
+32 to +38	strong heat stress
+26 to +32	moderate heat stress
+9 to +26	no thermal stress
0 to +9	slight cold stress
−13 to 0	moderate cold stress
−27 to −13	strong cold stress
−40 to −27	very strong cold stress
below −40	extreme cold stress

Source: based on Table 3 from Bröde et al. [1].

Table A.2. Technical specification of the instrumentation used for the measurements.

Parameter	Sensor	Range	Accuracy
Air temperature (ta)	Onset S-THC-M002	−40–75 °C	± 0.21 °C
Relative humidity (RH)		0–100%	± 2.5%
Wind/Air speed (va)	Cup anemometer Onset S-WSB-M003	0–76 m/s	±1.1m/s or ±4%
	Omnidirectional hotwire probe AP3203 with NTC 10kohm sensor Senseca Delta OHM HD32.3TC ¹	0.05–5 m/s	± 0.2 m/s (0–1 m/s) ± 0.3 m/s (1–5 m/s)
Globe temperature (tg)	Acrylic sphere Ø4 cm with T-type steel thermocouple inside Omega THSS-18G- RSC-6, (colour black) ²	0–315 °C	N/A

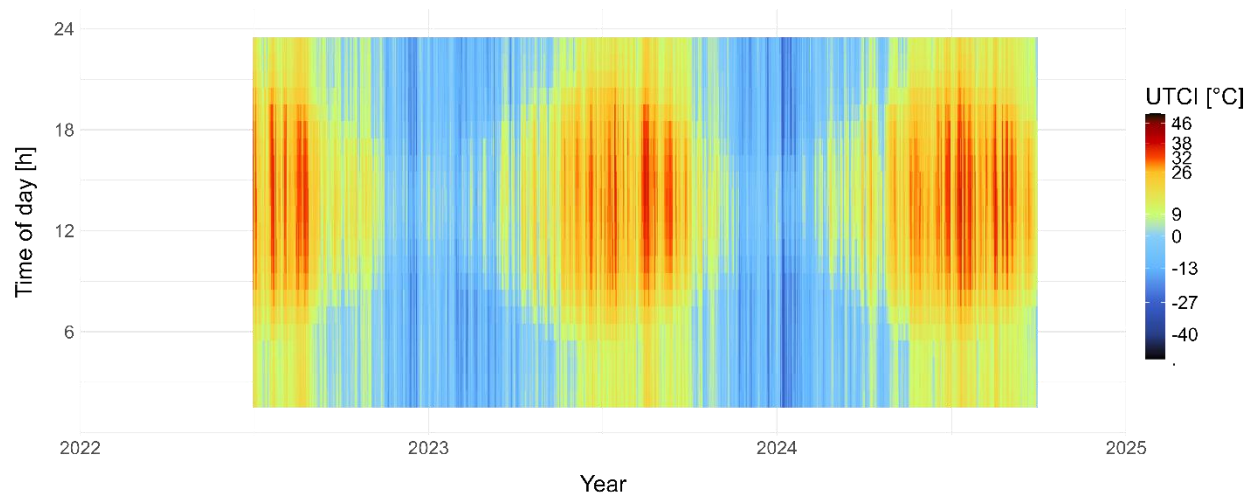
¹ To ensure reliable wind-speed measurements in areas with limited airflow, an additional high-sensitivity anemometer was used at sheltered sites.

² The methodology is based on earlier verification comparing a standard 15 cm globe with 4 cm black and grey acrylic globes, which identified the black globe as providing the most reliable inputs for mean radiant temperature calculations in the local park environments [2].

Table A.3. Overview of measurement campaign dates and Sentinel-2 observation dates.

Season	Park	Measurement campaign dates	Sentinel-2 acquisition dates
Summer 2022	SKA	3.08.2022	05.08.2022
	LAZ	4.08.2022	
	ZOO	5.08.2022	
	BAZ	9.08.2022	
	KRO	10.08.2022	
	MAL	11.08.2022	
Spring 2023	ZOO	4.05.2023	9.05.2023
	SKA	8.05.2023	
	KRO	9.05.2023	
Summer 2023	SKA	10.07.2023	08.07.2023
Autumn 2023	MAL	3.10.2023	29.09.2023
	LAZ	6.10.2023	
	ZOO	8.10.2023	
	SKA	10.10.2023	
	KRO	13.10.2023	
Spring 2024	LAZ	26.04.2024	13.05.2024
	BAZ	13.05.2024	

SKA – Skaryszewski Park; LAZ – Botanical Garden & Łazienki Park; ZOO – Zoological Garden & Praski Park; BAZ – Przy Bażantarni Park; KRO – Królikarnia & Arkadia Park; MAL – Malicki Park.

**Fig. A.1.** Diurnal distribution of UTCI values from ERA5-HEAT for Warsaw during the entire study period (1 July 2022 – 30 September 2024).

Source: based on ERA5-HEAT dataset [3]; The colour legend represents UTCI thermal stress categories according to Bröde et al. [1].

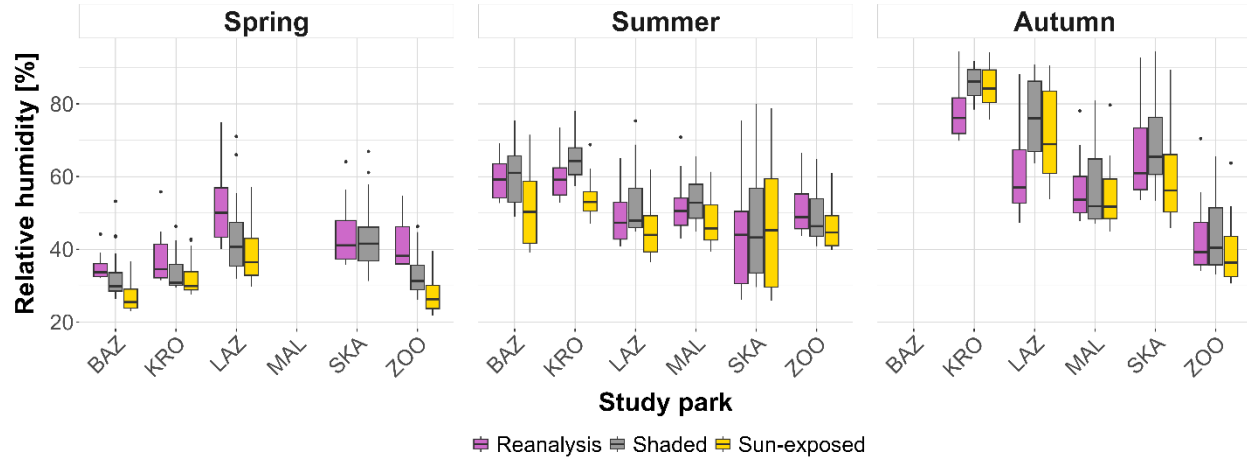
Table A.4. Minimum, maximum, and quartile values of ERA5-HEAT UTCI for Warsaw during the measurement campaigns.

Season	Measurement campaign days					Observation hours				
	min	Q1	Q2	Q3	max	min	Q1	Q2	Q3	max
Spring	-7.8	0.3	11.6	15.3	25.6	9.8	14.1	15.3	21.6	25.6
Summer	10.1	15.0	22.0	28.0	33.0	18.6	25.1	28.1	31.0	33.0
Autumn	-6.6	1.8	6.9	12.7	24.8	-0.2	7.0	13.4	16.5	24.8

Source: based on ERA5-HEAT dataset [3]; The colour legend represents UTCI thermal stress categories according to Bröde et al. [1].



C.



D.

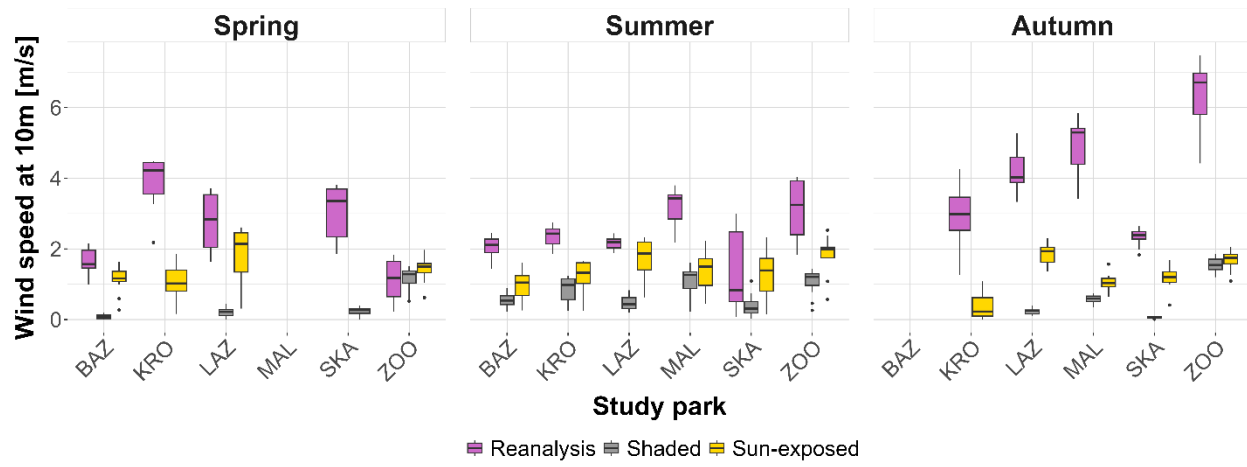


Fig. A.2. Distributions of mean radiant temperature (A), air temperature (B), relative humidity (C), and wind speed at 10 m (D) with reanalysis background reference.

Source: based on in-situ measurements, ERA5-Land dataset [4] and ERA5-HEAT dataset [3].

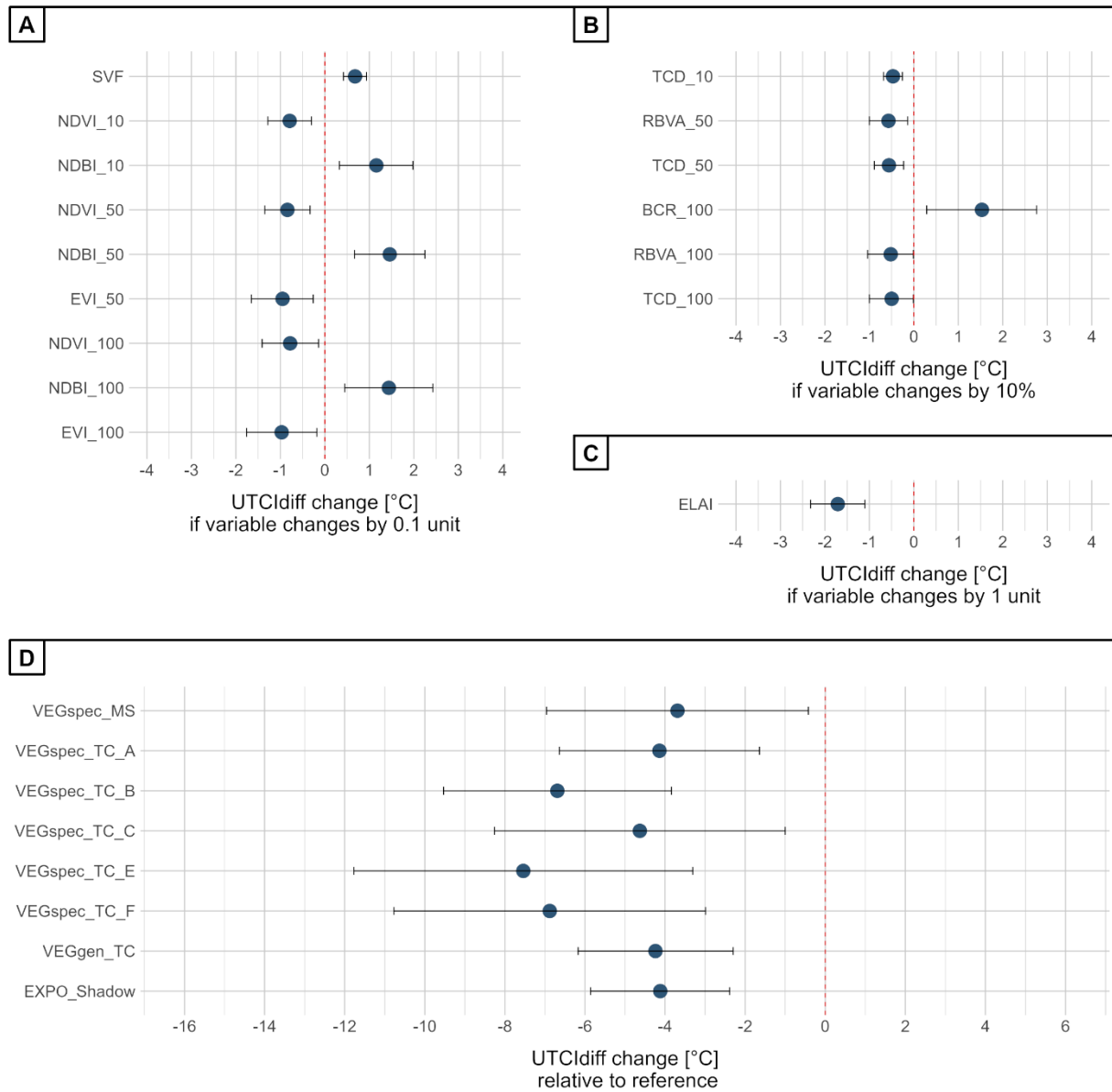


Fig. A.3. Statistically significant ($p = 0.05$) effects of urban environmental factors on UTCI in spring: (A) per 0.1 unit, (B) per 10% change, (C) per 1 unit, or (D) relative to the reference category.

Abbreviations of all indices are provided in *Table 2* of the main article.

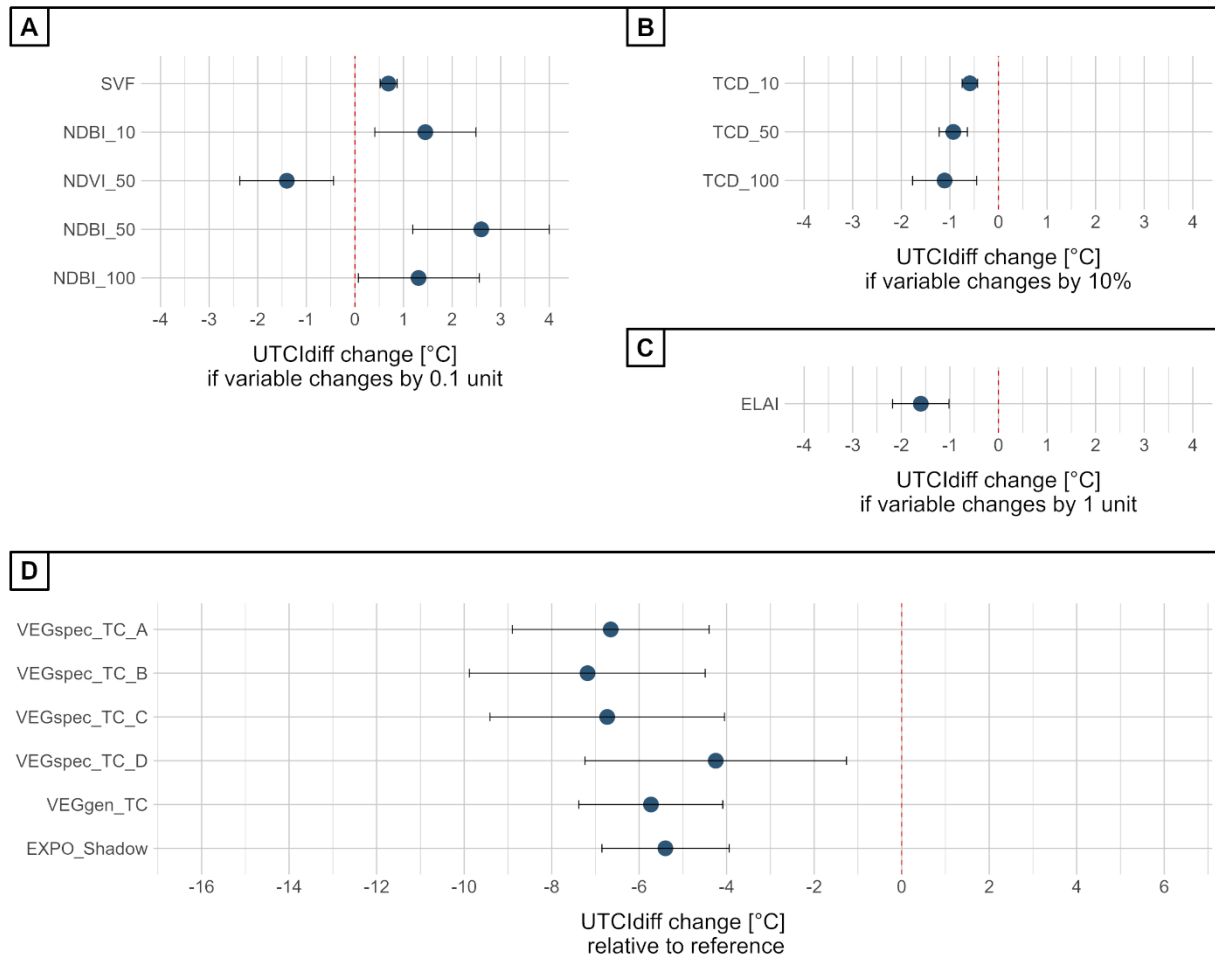


Fig. A.4. Statistically significant ($p = 0.05$) effects of urban environmental factors on UTCI in summer: (A) per 0.1 unit, (B) per 10% change, (C) per 1 unit, or (D) relative to the reference category.

Abbreviations of all indices are provided in *Table 2* of the main article.

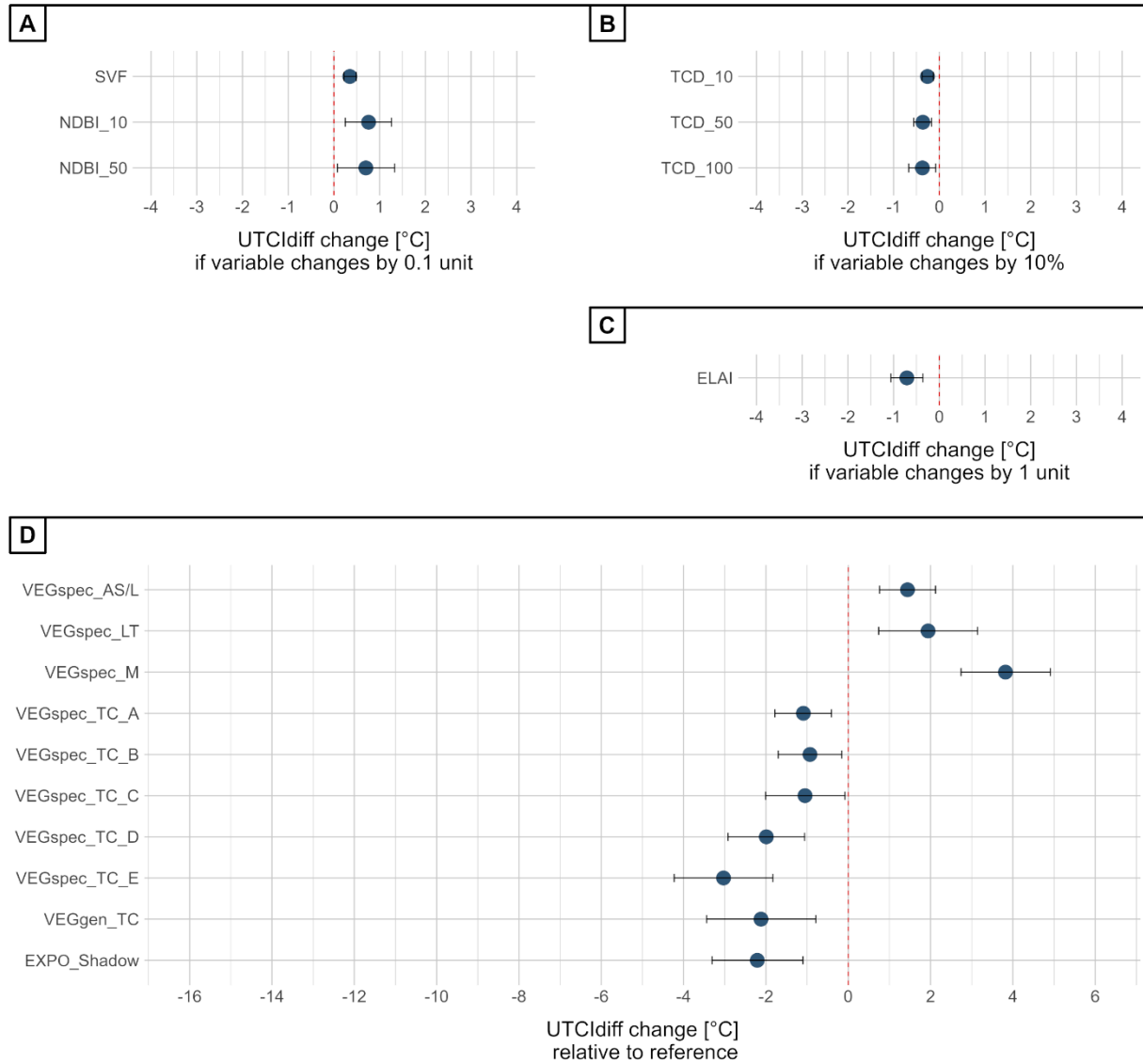


Fig. A.5. Statistically significant ($p = 0.05$) effects of urban environmental factors on UTCI in autumn: (A) per 0.1 unit, (B) per 10% change, (C) per 1 unit, or (D) relative to the reference category.

Abbreviations of all indices are provided in *Table 2* of the main article.

References

- [1] Bröde P, Fiala D, Błażejczyk K, Holmér I, Jendritzky G, Kampmann B, Tinz B, Havenith G. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol*. 2012. 56: 481–94. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.
- [2] Lindner-Cendrowska K, Baranowski J. Niepewność pomiarów średniej temperatury promieniowania za pomocą termometrów kulistych = Uncertainty of mean radiant-temperature measurements using globe thermometers. *CBGiOS IGiPZ PAN*. 2023. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2023.3.4>.
- [3] Di Napoli C, Barnard C, Prudhomme C, Cloke HL, Pappenberger F. Thermal comfort indices derived from ERA5 reanalysis. 2020. <https://doi.org/10.24381/cds.553b7518>.
- [4] Muñoz Sabate J. ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2019. <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac>.