

Analiza intensywności powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu w latach 2000–2024 na podstawie danych z misji Landsat

Aleksandra Ogłaza-Walkowicz^{1*}, Melika Tasan², Jolanta Dąbrowska¹, Karolina Kawałko¹

¹ Politechnika Wroclawska, Katedra Geodezji i Geoinformatyki, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Na Grobli 15, 50-421 Wrocław,
 *autor do korespondencji: aleksandra.oglaza-walkowicz@pwr.edu.pl

² Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Katedra Budownictwa, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław

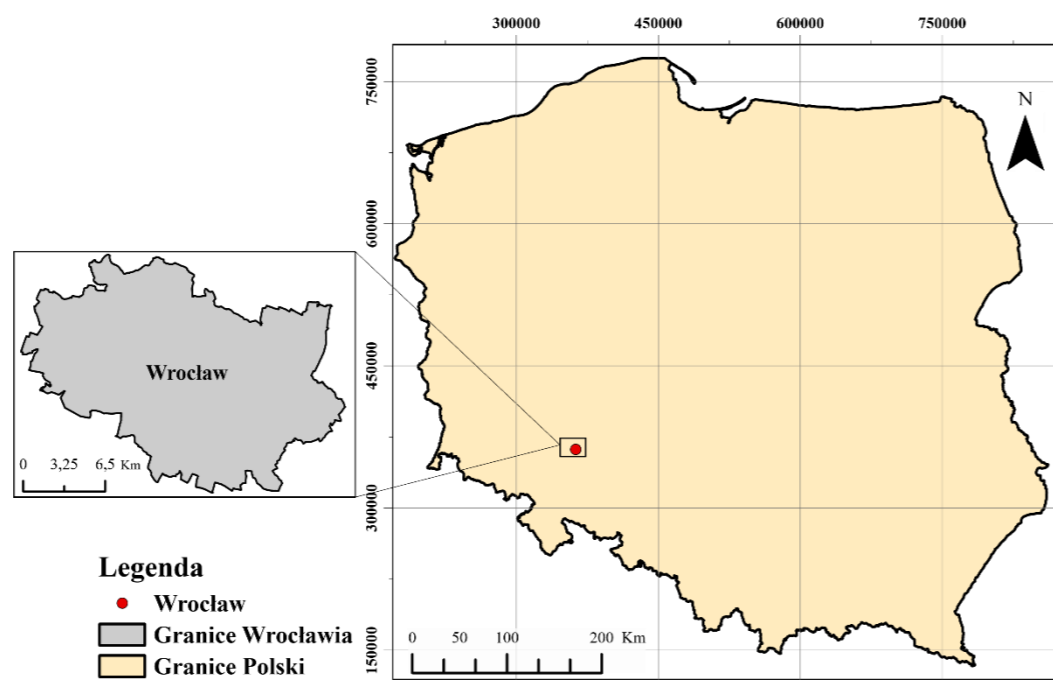
WPROWADZENIE

Miejska wyspa ciepła (MWC) to efekt systematycznego podwyższenia temperatury maksymalnej powietrza obszarów zurbanizowanych względem otaczających terenów niezurbanizowanych, wynikający z przeobrażeń pokrycia terenu, zaburzonego bilansu energetycznego, ograniczonej ewapotranspiracji, zwiększonej szorstkości powierzchni i antropogenicznej emisji ciepła. Powierzchniowa MWC (SUHI) jest charakteryzowana za pomocą temperatury powierzchni terenu (LST) z danych teledetekcyjnych, co zapewnia przestrzenną ciągłość i możliwość długookresowego monitoringu. Równoległe z urbanizacją nasila się częstość fal upałów. W Polsce wyraźne przyspieszenie tego trendu nastąpiło po roku 2012. Wzajemnie wzmacniające się oddziaływanie MWC i fal upałów tworzy strefy ekstremalnego stresu termicznego, wymagające zintegrowanej identyfikacji na potrzeby planowania przestrzennego i działań adaptacyjnych. Środkowoeuropejskie miasta pozostają przy tym słabo reprezentowane w literaturze, zdominowanej przez studia przypadków z Azji i Europy Zachodniej.

OBSZAR BADAWCZY

Wrocław jest stolicą Dolnego Śląska. Położony w południowo-zachodniej Polsce, zajmuje obszar o powierzchni około 292,8 km² i jest zamieszkały przez blisko 673 tys. mieszkańców. Miasto leży na Równinie Wrocławskiej (105-155 m n.p.m.) ma rozbudowaną sieć hydrograficzną z rzeką Odrą i jej dopływami.

Klimat miasta podlega wyraźnemu ociepleniu: średnia roczna temperatura wzrosła z 8,7°C (1971-2000) do 10,6°C (2011-2020), osiągając 12,1°C w 2024 roku. Sieć hydrograficzna i kompleksy leśne tworzą istotny potencjał chłodzący, czyniąc Wrocław reprezentatywnym przykładem miasta narażonego na przegrzanie powierzchni, lecz dysponującego znaczącymi zasobami błękitno-zielonej infrastruktury.



Rys. 1. Lokalizacja Wrocławia na tle Polski

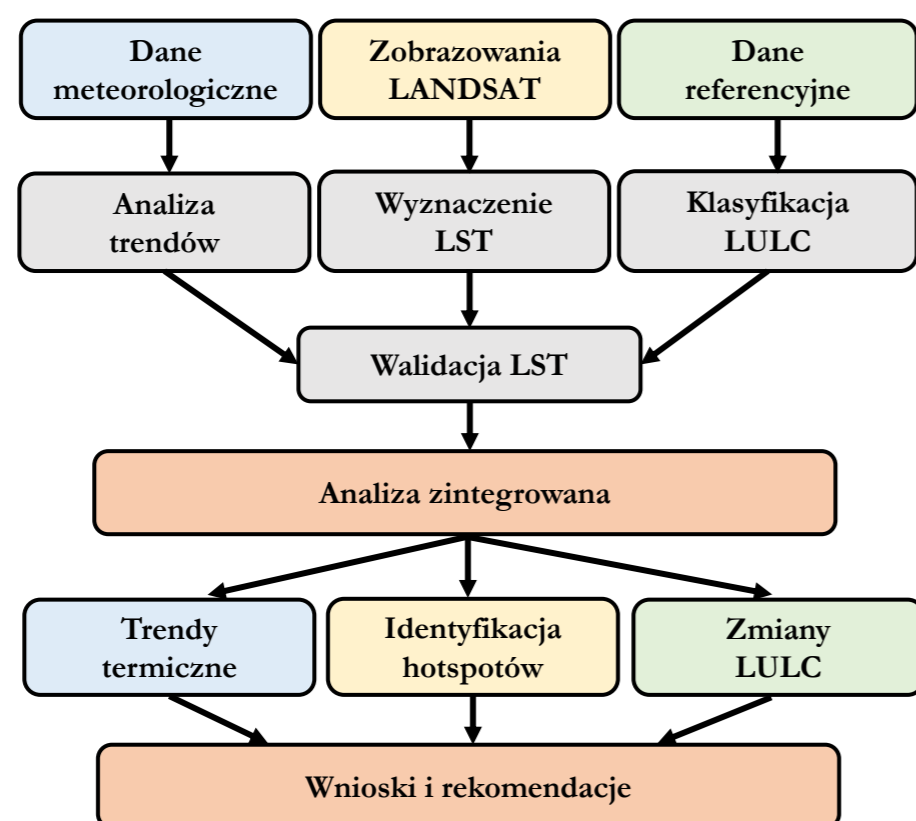
DANE I METODY

DANE

Analizę meteorologiczną przeprowadzono na podstawie dobowych wartości temperatury maksymalnej powietrza (Tmax) ze stacji synoptycznej Wrocław-Strachowice (IMGW-PIB) za okres 2000-2024. Dzień gorący zdefiniowano jako dzień z Tmax ≥ 30°C, falę upałów - jako co najmniej trzy kolejne takie dni. Analizę teledetekcyjną oparto na 59 zobrażeniach satelitarnych misji Landsat 5-9 pozyskanych w miesiącach maj-wrzesień, przy zachowaniu kryterium zachmurzenia poniżej 4%. Na ich podstawie opracowano 59 map LST oraz mapy LULC dla lat 2000, 2012 i 2024. Wszystkie zobrażenia poddano korekcie radiometrycznej i geometrycznej w celu zapewnienia porównywalności międzysensorowej. Klasyfikację LULC wykonano metodą sztucznych sieci neuronowych (ANN). Wyniki LST zwalidowano z danymi ERA5.

METODY

Trendy temperatury powietrza analizowano testem Seasonal Mann-Kendall. Do wyznaczenia LST zastosowano korekcję emisyjności powierzchni opartą na wskaźniku NDVI. Obszary przegrzane identyfikowano trzema metodami: progiem bezwzględnym (LST ≥ 30°C), percentylami (P90 i P95) oraz standaryzacją LST względem odchylenia standardowego okresu badawczego. Podejścia te pozwoliły uchwycić zarówno bezwzględne wartości temperatury powierzchni, jak i jej względne anomalie na tle termicznym miasta.



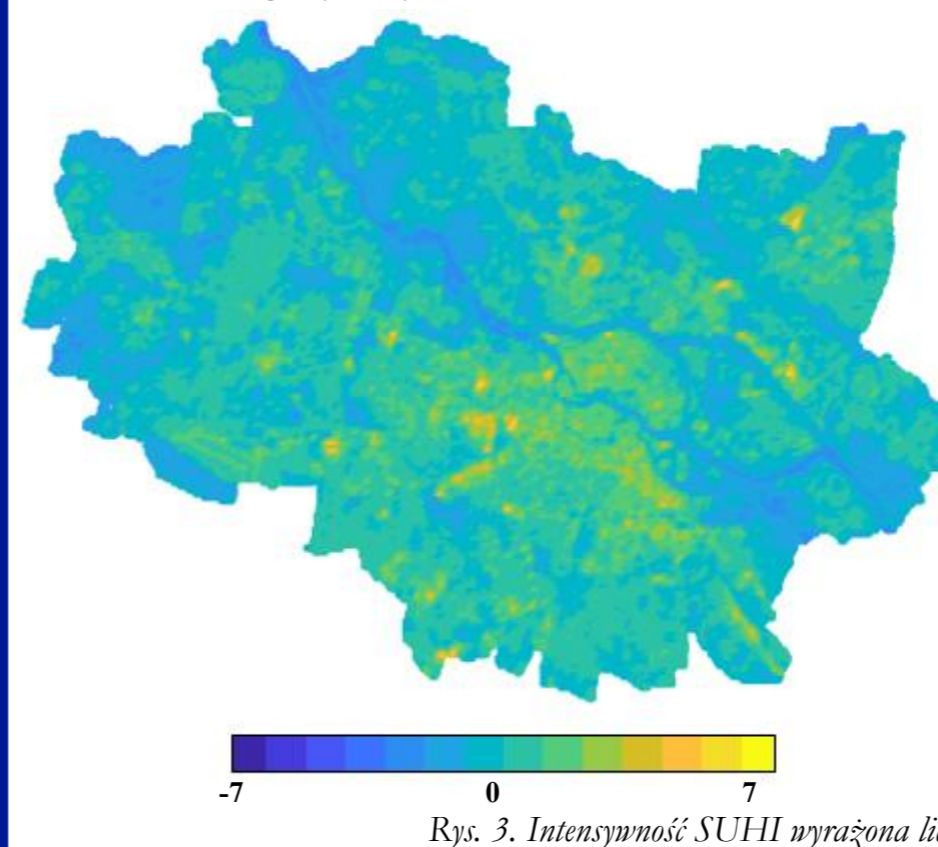
Rys. 2. Algorytm badań

REZULTATY

Analiza meteorologiczna wykazała istotny statystycznie wzrost temperatury maksymalnej powietrza (Tmax) w latach 2000-2024 odpowiednio o 0,93°C na dekadę (p < 0,001). W całym okresie odnotowano 46 fal upałów i 372 dni gorących, przy wyraźnym nasileniu tych zjawisk w ostatnich latach analizy.

Analiza pokrycia terenu wykazała postępującą transformację przestrzenną miasta. Udział terenów zielonych zmniejszył się z 74,4% w 2000 roku do 64,3% w 2024 roku, podczas gdy powierzchnia terenów zurbanizowanych wzrosła z 24,2% do 33,7%.

Intensywność SUHI przyjmuje wartości od -4 do +7 odchylen standardowych. Dominują wartości bliskie zeru: piksele z odchyleniem 0-1 stanowią 38,4%, a w przedziale -1 - 0 mają wartość 32,5%. Wartości powyżej +3 obejmują niespełna 0,6% powierzchni miasta, tworząc jednak wyraźne skupiska w strefach przemysłowych i centrach logistycznych.



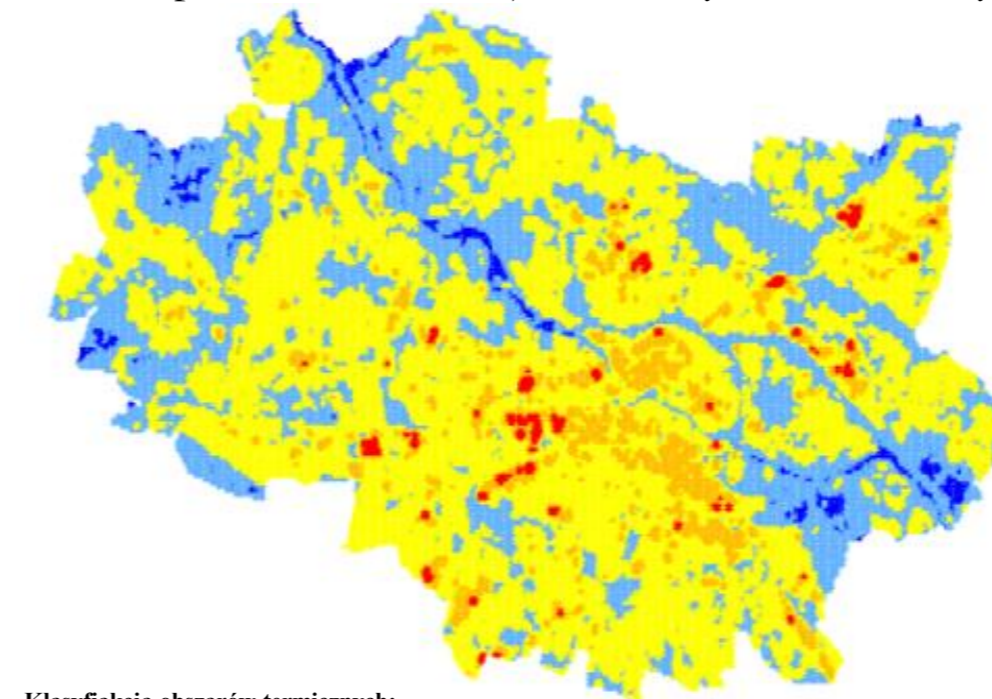
Rys. 3. Intensywność SUHI wyrażona liczbą odchylen standardowych wartości LST od średniej

$$LSTs = \frac{LSTx - LST\mu}{LST\sigma}$$

Gdzie:
 LSTx - wartość LST konkretnego piksela
 LSTμ - średnia LST dla badanego obszaru
 LSTσ - odchylenie standardowe LST

Klasa	Wzór
obszar bardzo zimny	$LST \leq LST\text{mean} - 2\text{Std}$
obszar zimny	$LST\text{mean} - 2\text{Std} \leq LST \leq LST\text{mean} - \text{Std}$
obszar chłodny	$LST\text{mean} - \text{Std} \leq LST \leq LST\text{mean}$
obszar ciepły	$LST\text{mean} \leq LST \leq LST\text{mean} + \text{Std}$
obszar gorący	$LST\text{mean} + \text{Std} \leq LST \leq LST\text{mean} + 2\text{Std}$
obszar bardzo gorący	$LST \geq LST\text{mean} + 2\text{Std}$

Klasyfikacja obszarów termicznych dla całego okresu wskazuje, że dominującymi klasami były strefy ciepłe (47,5%) i chłodne (44,1%), przy łącznym udziale klas gorących wynoszącym 3,97% oraz zimnych 4,43%. Klasy gorące koncentrują się w zwartych obszarach przemysłowych i logistycznych, podczas gdy klasy zimne pokrywają się z kompleksami lasów miejskich i korytarzami rzecznyymi Odrą, Bystrzycą i Widawą.

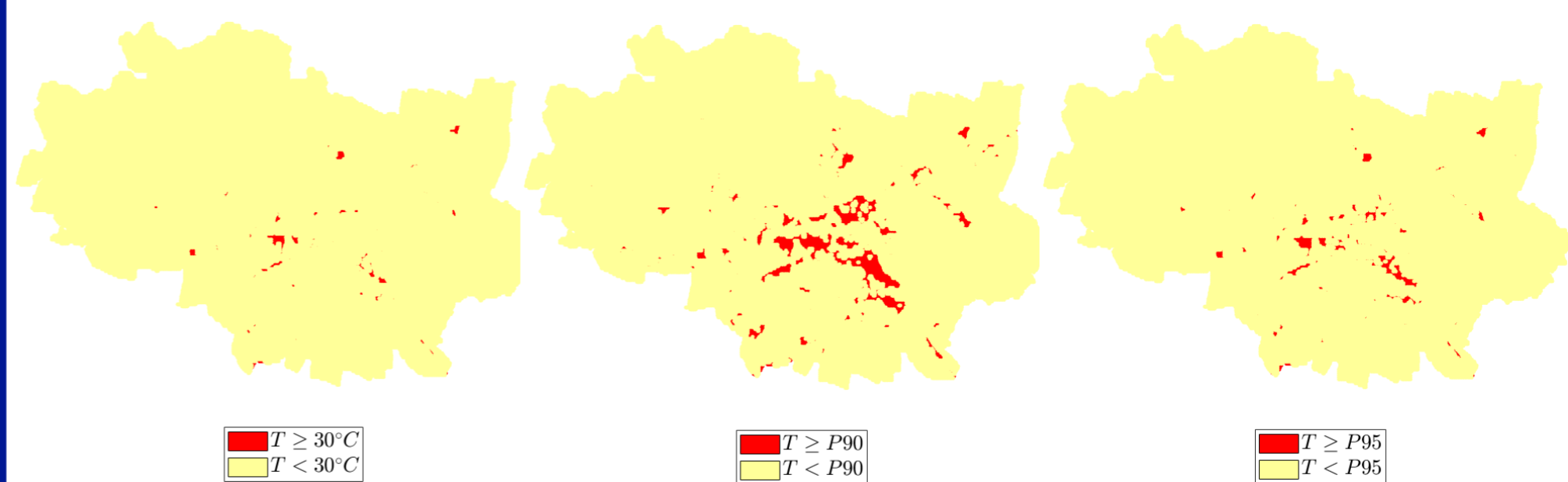


Klasyfikacja obszarów termicznych:
 ■ bardzo zimny ■ zimny ■ chłodny ■ ciepły ■ gorący ■ bardzo gorący

Rys. 4. Klasyfikacja obszarów termicznych

Klasa	Procentowy udział
Obszar bardzo zimny	0
Obszar zimny	4,43
Obszar chłodny	44,06
Obszar ciepły	47,54
Obszar gorący	3,68
Obszar bardzo gorący	0,28

Identyfikacja hotspotów różnymi metodami dała spójne wyniki. Przy progu LST ≥ 30°C hotspoty objęły 2,67% powierzchni, przy P90 - 10%, przy P95 - 5,0%. We wszystkich podejściach dominującymi lokalizacjami były tereny przemysłowe, centra logistyczne i wielkopowierzchniowe obiekty handlowe z rozległymi dachami i parkingami. Obszary poza zasięgiem hotspotów to przede wszystkim kompleksy leśne oraz korytarze rzeki Odrą i jej dopływów, tworzące wyraźne strefy obniżonej temperatury powierzchni na tle zurbanizowanego otoczenia.



Rys. 5. Identyfikacja hotspotów (obszarów najbardziej obciążonych termicznie) za pomocą progów temperatury powierzchni terenu (30°C) oraz progami percentylowymi (90 i 95)

WNIOSKI

Wyniki badań potwierdzają, że ocieplenie klimatu i zmiany pokrycia terenu wspólnie kształtują strukturę termiczną miasta, wzmacniając przestrzenne zróżnicowanie temperatury powierzchni. W latach 2000–2024 odnotowano istotny statystycznie wzrost temperatury powietrza, nasilenie częstości fal upałów oraz równoległe zmniejszenie udziału terenów zielonych na rzecz powierzchni zurbanizowanych.

Charakter pokrycia terenu i właściwości fizyczne powierzchni, takie jak albedo, zdolność do pochłaniania ciepła i stopień uszczelnienia, okazały się kluczowymi czynnikami kształtującymi przestrzenne wzorce termiczne. Najbardziej niekorzystne wartości wskaźników termicznych stwierdzono dla terenów przemysłowych, centrów logistycznych i wielkopowierzchniowych obiektów handlowych. Zaobserwowana asymetria anomalii termicznych z przewagą pikseli o dodatnim odchyleniu LST w późniejszych latach analizy wskazuje na postępującą intensyfikację efektu miejskiej wyspy ciepła. Korzystne warunki termiczne zachowały natomiast kompleksy leśne oraz korytarze rzek, pełniące funkcję kluczowych elementów błękitno-zielonej infrastruktury chłodzącej miasto.

Uzyskane wyniki wskazują na potrzebę uwzględnienia ochrony i rozbudowy błękitno-zielonej infrastruktury w planowaniu przestrzennym i działaniach adaptacyjnych. Priorytetem powinna być ochrona istniejących kompleksów leśnych i korytarzy rzecznych jako naturalnych regulatorów termicznych, a także modyfikacja właściwości termicznych szarej infrastruktury, a w szczególności poprzez stosowanie materiałów o podwyższonym albedo i zazielenianie dachów obiektów przemysłowych i handlowych. Połączenie długookresowych danych meteorologicznych z wielodekadowymi archiwami satelitarnymi stanowi skuteczne narzędzie monitoringu odporności klimatycznej miast, użyteczne w kontekście realizacji Celów Zrównoważonego Rozwoju (SDG) w dynamicznie przekształcających się miastach Europy Środkowej.