

## ZASTOSOWANIE POMIARÓW SATELITARNYCH (SENTINEL 3) W CHARAKTERYSTYCE POWIERZCHNIOWEJ MIEJSKIEJ WYSPY CIEPŁA W ŁODZI

### The use of satellite measurements (Sentinel 3) in the characteristics of the surface urban heat island in Łódź

MARIUSZ SIEDLECKI<sup>1</sup> , JAN GÓROWSKI<sup>2</sup> 

**Zarys treści.** W opracowaniu zaprezentowano wyniki oceny powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła w Łodzi na podstawie pomiarów satelitarnych z wykorzystaniem satelity Sentinel 3. Do realizacji celów pracy wykorzystano 30 wybranych zdjęć satelitarnych temperatury powierzchniowej z lat 2021–2022. Badania średniej powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła, jej wartości maksymalnej a także rozkładu przestrzennego wykonano oddzielnie dla okresów letniego (kwiecień–wrzesień) oraz zimowego (styczeń–marzec). Uzyskane wyniki pokazały, że mediana wartości powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (PMWC) w okresie letnim wyniosła 2,6°C, a w miesiącach zimowych 1,9°C.

**Słowa kluczowe:** klimat miasta, powierzchniowa miejska wyspa ciepła, formy użytkowania terenu, teledetekcja satelitarna

**Abstract.** The study presents the results of the assessment of the surface urban heat island in Łódź based on satellite detection using the Sentinel 3 satellite. To achieve the objectives of the work, 30 selected satellite images of surface temperature from 2021–2022 were used. The study of the average urban heat island, its maximum value and spatial distribution was carried out separately for the summer (April–September) and winter (January–March) periods. The results showed that the median SUHI value was 2.6°C in the summer and 1.9°C in the winter months.

**Key words:** urban climate, surface urban heat island, land cover, satellite teledetection

## Wprowadzenie

Obszary zurbanizowane ze względu na charakter zabudowy są przykładem silnego przekształcenia środowiska naturalnego. Jednocześnie są to miejsca zamieszkiwane przez ponad połowę ludności świata i odsetek ten wciąż rośnie, a prognozy wskazują, że trend się utrzyma i w połowie XXI wieku odsetek może przekroczyć 70% (*World Urbanization...* 2019). Miasta z uwagi na duży udział powierzchni sztucznych (cechujących się zerową przepuszczalnością i różną absorpcją promieniowania słonecznego), gęstą zabudowę oraz emisję ciepła sztucznego i różnego rodzaju zanieczyszczeń modyfikują warunki klimatyczne.

Jednym z aspektów odrębności klimatu miasta są wyższe temperatury w jego środkowej części. Zjawisko to ze względu na swój charakter przestrzenny określane jest mianem miejskiej wyspy ciepła (MWC). Liczne badania nad tym zjawiskiem przeprowadzone w oparciu o pomiary instrumentalne pokazały, że najwyższe różnice w miastach amerykańskich mogą przekraczać 12°C (np.: Gedzelman i in. 2003; EPA 2017), w miastach japońskich 10°C (np. Fujibe 2011), a wieloletnie pomiary w różnych miastach w Europie pokazały, że MWC może osiągnąć 4–8°C (np.: Oke 1973; Steeneveld i in. 2011; Theeuwes i in. 2017). W polskich miastach stwierdzono, że najwyższe wartości MWC w Warszawie przekraczały poziom 10°C (Wawer 1995), w Lublinie

<sup>1</sup> Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Instytut Klimatologii i Hydrologii, Zakład Meteorologii i Klimatologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: mariusz.siedlecki@geo.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0002-5804-8985

<sup>2</sup> Uniwersytet Łódzki, Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, ul. Matejki 21/23, 90-237 Łódź; e-mail: jan.gorowski@edu.uni.lodz.pl, ORCID: 0000-0002-3660-803X

8°C (Kaszewski, Siwek 1998), a we Wrocławiu 7°C (Szymanowski 2004). W Łodzi odnotowana najwyższa intensywność MWC wyniosła 12°C (Kłysik, Fortuniak 1999). Jednocześnie należy zaznaczyć, że zjawisko MWC ma charakter dynamiczny i cechuje się wyraźną zmiennością dobową, jak i sezonową. Co więcej, intensywność MWC zależy od wielkości zachmurzenia czy też prędkości wiatru. Na przykład w Łodzi najwyższe różnice pomiędzy temperaturą w centrum miasta a temperaturą terenów zamiejskich notowana jest latem w godzinach nocnych (Fortuniak 2003).

Charakterystyka miejskiej wyspy ciepła opiera się głównie na pomiarach temperatury powietrza z wykorzystaniem sieci stacji meteorologicznych rozlokowanych w różnych częściach miasta. Ze względu na ograniczoną liczbę stacji wyniki te cechują się ograniczonym zasięgiem przestrzennym. W celu uchwycenia przestrzennej zmienności MWC już od ponad 40 lat znajdują zastosowanie wyniki pomiarów satelitarnych. Przyczyną wyników te bazujące na obrazie warunków termicznych podłoża pozwalają na charakterystykę tak zwanej powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (PMWC). Dynamika PMWC może odzwierciedlać zmienność zasobów ciepła, które w sposób bezpośredni wpływają na rozwój miejskiej wyspy ciepła. Zastosowanie detekcji satelitarnej w badaniach powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła pozwala na charakterystykę jej przestrzennej i czasowej zmienności czy też związku z typami pokrycia terenu (np.: Streutker 2002; Pu i in. 2006; Giridharan, Kolokotroni 2009; Liu, Zhang 2011; Weng 2012; Li i in. 2016). Prowadzone są również prace nad określeniem związku pomiędzy atmosferyczną i powierzchniową miejską wyspą ciepła (np.: Kawashima i in. 2000; Sun i in. 2005; Fabrizi i in. 2010; Majkowska i in. 2017; Gawuć i in. 2022). Wyniki tych prac wskazują bardzo silny związek pomiędzy MWC, jak i PMWC, co może świadczyć o potencjalnym zastosowaniu pomiarów satelitarnych w badaniu klimatu miasta szczególnie tam, gdzie nie ma możliwości bezpośrednich pomiarów. Jednocześnie należy zaznaczyć, że wyniki pomiarów satelitarnych odnoszą się do określonych warunków meteorologicznych umożliwiających wykonanie zdjęcia satelitarnego.

Rozwój systemów satelitarnych oraz metod analizy danych otrzymywanych z teledetekcji skutkuje również nowymi kierunkami badań. Jednym z nich są prace porównujące PMWC w różnych rejonach świata czy też badania z zakresu metodologii definiowania wyspy ciepła oraz oceny jakości takich danych (np. Gawuć, Stru-

żewska 2016; Lai i in. 2018; Yang i in. 2019; Sobrino, Irakulis 2020; Renc i in. 2022; Renc, Łupikasza 2024).

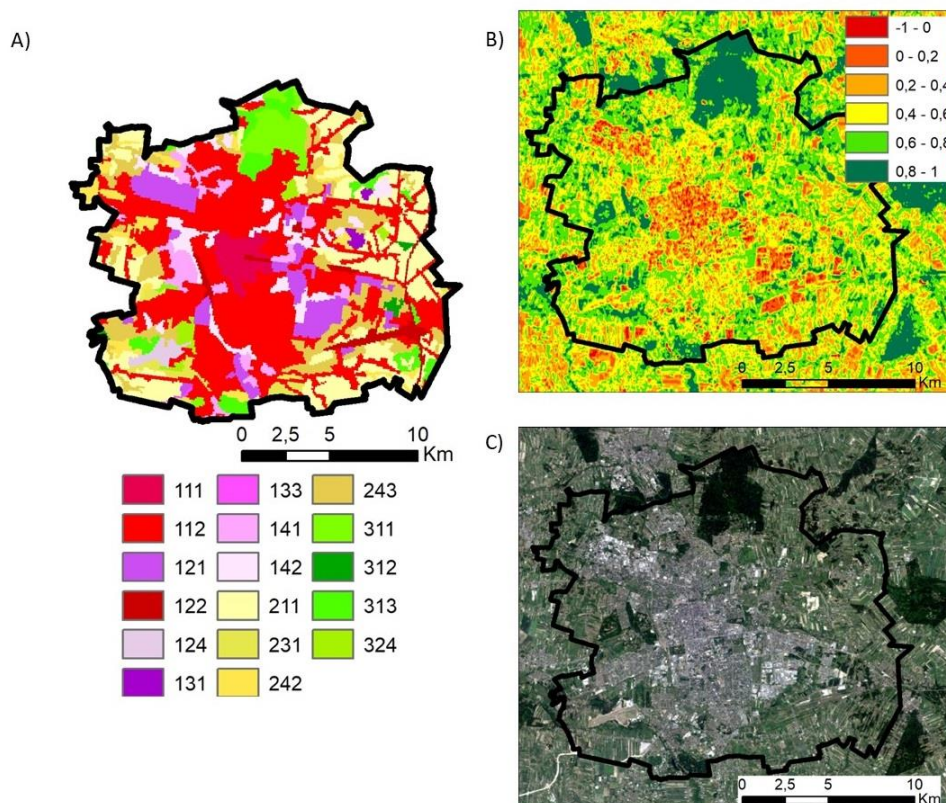
Podstawowym celem opracowania jest charakterystyka powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła w Łodzi, wykorzystując temperaturę radiacyjną powierzchni uzyskaną przez satelitę Sentinel 3. Dotychczasowe badania z wykorzystaniem stacji naziemnych pokazały, że charakter zabudowy Łodzi stanowi dogodne warunki do tworzenia się miejskiej wyspy ciepła MWC (Kłysik, Fortuniak 1999; Fortuniak 2003). Jednakże zagadnienie jej struktury przestrzennej na podstawie tradycyjnych pomiarów jest słabo poznane. Uzyskane wyniki z detekcji satelitarnej pozwalają poszerzyć wiedzę z zakresu struktury przestrzennej tego zjawiska meteorologicznego.

## Dane i metody

### Obszar badań

Łódź położona w środkowej Polsce jest jednym z największych miast, którego populacja wynosi około 670 tysięcy ludności (Statystyka Łodzi 2022). Ponad 52% obszaru miasta stanowią tereny zabudowane i zurbanizowane. Centralną część miasta stanowi ściśle centrum z gęstą zabudową o charakterze mieszkalnym i mieszkalno-przemysłowo-usługowym z niewielkimi obszarami parków miejskich (rys. 1A). Potwierdzają to zdjęcie rozkładu przestrzennego indeksu NDVI (rys. 1B) czy też obraz miasta wykonany w kolorach naturalnych (rys. 1C). Niskie wartości wskaźnika NDVI oznaczają mały udział powierzchni roślinnych. Centralna część miasta charakteryzuje się niskimi wartościami tego indeksu.

Układ wąskich ulic, zorientowanych względem siebie prostopadle i gęsta zabudowa kilkupiętrowych budynków tworzą na znacznej części tak zwane „kaniony uliczne”. Udział powierzchni sztucznych w tej części miasta stanowi 50%, przy czym w kilku rejonach odsetek ten jest nawet wyższy i stanowi 75% (Kłysik 1998). W otoczeniu ściśłego centrum miasta znajdują się nowe dzielnice zabudowane przez 4–5 lub 12-piętrowe bloki. W rejonie północno-wschodnim miasta a także na terenie dzielnic Widzew i Górna znajdują się obszary przemysłowe. Obszary zabudowy jednorodzinnej zajmują głównie peryferyjne części miasta. Warto również zwrócić uwagę, że w północno-wschodniej części miasta znajduje się zwarty kompleks leśny, tak zwany Las Łągiewnicki będący częścią Parku Krajobrazowego Wzniesień Łódzkich (rys. 1BC).



Rys. 1. Typy pokrycia terenu na podstawie Corine Land Cover 2018 (A), przykład rozkładu przestrzennego wartości indeksu NDVI na podstawie Sentinel 2 (B), przykład widoku w kolorach naturalnych na podstawie Sentinel 2 (C)

A – Typy pokrycia terenu: 111 – zabudowa miejska zwarta, 112 – zabudowa miejska luźna, 121 – tereny przemysłowe i handlowe, 122 – tereny drogowe i kolejowe, 124 – lotniska, 131 – miejsca wydobycia surowców mineralnych, 133 – place budowy, 141 – tereny zielone, 142 – tereny sportowe i rekreacyjne, 211 – grunty orne, 231 – łąki i pastwiska, 242 – złożone systemy upraw i działek, 243 – tereny rolnicze z udziałem roślinności naturalnej, 311 – las liściasty, 312 – bór iglasty, 313 – las mieszany, 324 – lasy i roślinność krzewiasta w stanie przejściowym

Fig. 1. Types of land cover according to Corine Land Cover 2018 (A), example of NDVI values distribution from Sentinel 2 with border of Łódź (B), example of true-colour scene from Sentinel 2 (C)  
 A – Types of land cover: 111 – continuous urban fabric, 112 – discontinuous urban fabric, 121 – industrial and commercial units, 122 – road and rail networks, 124 – airports, 131 – mineral extraction sites, 133 – construction sites, 141 – green urban areas, 142 – sport and leisure facilities, 211 – non-irrigated arable land, 231 – pastures, 242 – complex cultivation patterns, 243 – agriculture areas, 311 – broadleaf forest, 312 – coniferous forest, 313 – mixed forest, 324 – transitional woodland-shrub

## Dane satelitarne

Do realizacji celów badawczych pracy posłużono się wynikami detekcji satelitarnej temperatury powierzchni (LST – *Land Surface Temperature*) z systemu satelitów Sentinel 3, który jest nadzorowany przez *European Space Agency* (ESA) w ramach programu Copernicus (Copernicus 2024). Wartości LST otrzymywane są na podstawie rejestracji promieniowania w 12 kanałach spektralnych przez skaner o wysokiej rozdzielczości SLSTR – *Sea and Land Surface Temperature Instrument* (Polehampton i in. 2023) i udostępniane bezpośrednio w ramach tak zwanego drugiego po-

ziomu (Level 2) przetwarzania danych. Procedura obliczania LST opiera się na zarejestrowanym promieniowaniu w trzech kanałach spektralnych: 3,7  $\mu\text{m}$ , 10,8  $\mu\text{m}$  oraz 12  $\mu\text{m}$ . Dodatkowo otrzymane wartości poddaje się korekcji ze względu na charakter i stan roślinności, a także zawartość pary wodnej w atmosferze (Sentinel 2024).

Nad obszarem badań satelity Sentinel 3A i Sentinel 3B pojawiają się dwa razy na dobę; w godzinach porannych między 8:00–10:00 UTC oraz wieczorem między 19:00–21:00 UTC. Do realizacji celów badawczych wybrano 30 obrazów z terminu wieczornego w okresie od 1 stycznia 2021 roku do 30 sierpnia 2022 roku. Dokładne in-

Tabela 1

Podstawowe informacje o wybranych zdjęciach Sentinel 3 oraz warunkach meteorologicznych na stacji Łódź-Lublinek w wybranych dniach (sezon I–III)

Basic information about the Sentinel 3 images and meteorological conditions on Łódź-Lublinek station during the selected days (cold season)

Data/ Date	Godzina przelotu/ Acquisition data	T <sub>sr</sub> / T <sub>avg</sub> [°C]	Grubość pokrywy śnieżnej/ Snow cover depth [cm]
2021.01.11	20:04	-0,5	3
2021.01.22	20:22	4,5	4
2021.02.01	19:58	-7,5	5
2021.02.08	20:17	-9,2	3
2021.03.30	20:21	4,5	0
2022.03.01	20:10	-7,4	0
2022.03.14	20:34	-8,7	0
2022.03.18	20:30	4,8	0
2022.03.19	20:04	1,9	0
2022.03.20	20:17	1,3	0
2022.03.21	19:51	3,5	0
2022.03.22	20:26	4,1	0
2022.03.24	20:13	8,6	0
2022.03.25	19:47	5,7	0
2022.03.28	20:10	3,1	0
2022.03.29	20:41	10,6	0

formacje dotyczące dat i czasu przelotu satelity, jak i wybranych warunków meteorologicznych przedstawiono w Tabeli 1 i Tabeli 2. Następnie z wykorzystaniem oprogramowania SNAP – *Sentinel Application Platform* (SNAP 2024) wartości LST przekonwertowano do geograficznego układu współrzędnych i zapisano w formacie geotiff. Tak przygotowane dane zostały następnie opracowane w aplikacji ArcMap (2024).

Charakterystykę powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła obliczono w oparciu o dwa wskaźniki przedstawiające maksymalną ( $SUHI_{MAX}$ ) i średnią ( $SUHI_{AVE}$ ) intensywność powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (wzór 1 i 2). Maksymalną intensywność powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła ( $SUHI_{MAX}$ ) obliczono jako różnicę pomiędzy maksymalną wartością  $LST_{MAX}$  w obrębie miasta i średnią temperaturą powierzchni ( $LST_{RUR}$ ) w obszarze otaczającym miasto (Sobrino, Irakulis 2020). Natomiast w przypadku wskaźnika  $SUHI_{AVE}$  zastosowano średnią temperaturę powierzchni  $LST_{AVE}$  w obszarze miejskim

i średnią temperaturę powierzchni w obszarze otaczającym miasto (Sobrino, Irakulis 2020):

$$SUHI_{MAX} = LST_{UMAX} - LST_{RUR} \quad (1)$$

$$SUHI_{AVE} = LST_{UAVE} - LST_{RUR} \quad (2)$$

gdzie:

$LST_{UMAX}$  – najwyższa wartość temperatury powierzchni w obszarze zurbanizowanym (najcieplejszy piksel) [°C],

$LST_{UAVE}$  – średnia wartość temperatury powierzchni w obszarze zurbanizowanym [°C],

$LST_{RUR}$  – średnia wartość temperatury powierzchni w obszarze podmiejskim (otoczenie miasta) [°C].

W badaniach nad zastosowaniem detekcji satelitarnej w klimacie miasta pojawia się problem z wyznaczeniem powierzchni, które prezentują obszar zurbanizowany. Granice administracyjne obejmują również tereny leśne, rolnicze itp. W tym opracowaniu posłużono się mapą klasyfi-

Tabela 2

Podstawowe informacje o wybranych zdjęciach Sentinel 3 oraz warunkach meteorologicznych na stacji Łódź-Lublinek w wybranych dniach (sezon IV–IX)

Basic information about the Sentinel 3 images and meteorological conditions on Łódź-Lublinek station during the selected days (warm season)

Data/ Date	Godzina przelotu/ Acquisition data	T <sub>sr</sub> T <sub>avg</sub> [°C]	Opad atmosferyczny/ Precipitation
202.06.14	20:11	14,6	24 h po opadach atmosferycznych
2021.09.14	20:26	15,6	24 h po opadach atmosferycznych
2022.04.29	20:41	8,8	-
2022.05.01	19:49	9,5	-
2022.05.02	20:02	10,7	-
2022.05.11	20:30	19,0	-
2022.05.15	20:26	12,1	-
2022.06.01	19:45	14,4	24 h po burzy
2022.06.10	19:51	18,4	-
2022.06.23	20:15	16,1	24 h po opadach atmosferycznych
2022.07.03	19:55	16,5	24 h po burzy
2022.07.17	19:53	13,6	24 h po burzy
2022.07.19	20:41	17,6	-
2022.07.24	20:12	21,5	24 h po burzy

kacji pokrycia terenu opracowaną przez ESA w ramach projektu Climate Change Initiative (CCI; 2024) Przedstawiony typ użytkowania terenu określany jako „urban areas” posłużył do wybrania typu pokrycia terenu z temperaturą powierzchni obszaru zurbanizowanego. Obszar ten jest bardzo zbliżony do tego wyznaczonego przez klasy 1–7 według klasyfikacji Corine Land Cover 2018 przedstawionego na Rysunku 1d.

Obszar podmiejski (na podstawie którego wyznaczono temperaturę zamiejską) został zdefiniowany według następującej formuły (Sobrino i Irakulis 2020):

$$W_U = 0,25A^{0,5} \quad (3)$$

gdzie:

$W_U$  – dystans obszaru podmiejskiego w otoczeniu miasta [km],

$A$  – powierzchnia miasta [km<sup>2</sup>].

Według tak zdefiniowanej formuły (wzór 3) wyznaczono bufor wokół granic miasta Łodzi równy 4 km. Przy czym z uwagi na fakt, że w bezpośrednim sąsiedztwie Łodzi znajdują się miasta

satelickie, takie jak Zgierz, Pabianice, Aleksandrów Łódzki, z wyznaczonego obszaru podmiejskiego (wzór 3) wycięto tereny o zabudowie miejskiej. Tak przygotowany plik wektorowy posłużył do wyznaczenia obszaru, na podstawie którego obliczono wartości  $LST_{RUR}$ .

Charakterystykę zróżnicowania przestrzennego temperatury powierzchni w obrębie miasta oparto o wartości anomalii temperatury  $LST_{anom}$ , które zostały policzone jako różnice pomiędzy wartością  $LST$  w określonym miejscu a średnią wartością temperatury powierzchni w obrębie granic administracyjnych miasta.

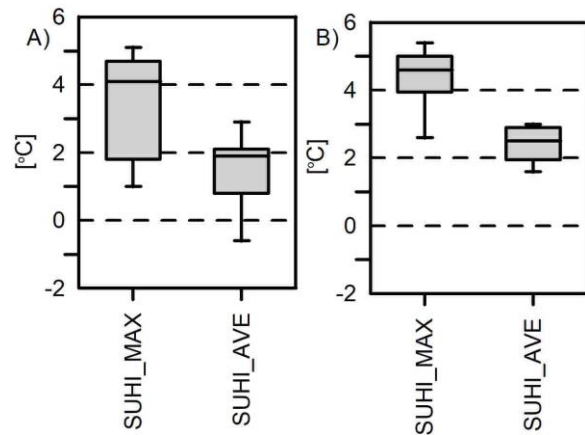
Badania powierzchniowej wyspy ciepła przeprowadzono oddzielnie dla sezonu zimowego i sezonu letniego. W pierwszej kolejności obliczono medianę, rozstęp kwartyłowy, a także zakres zmienności wskaźników  $SUHI_{AVE}$  i  $SUHI_{MAX}$ . Następnie wartości anomalii temperatury powierzchni stanowiły podstawę do przedstawienia średniego rozkładu przestrzennego temperatury powierzchni, jak również scharakteryzowania jej w zależności od określonych form użytkowania terenu.

## Wyniki badań i dyskusja

Mediana intensywności powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła ( $SUHI_{AVE}$ ) w okresie od kwietnia do września wyniosła  $2,6^{\circ}\text{C}$  (rys. 2a), a w okresie od stycznia do marca  $1,9^{\circ}\text{C}$  (rys. 2b). Natomiast mediana maksymalnej intensywności powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła ( $SUHI_{MAX}$ ) wyniosła  $4,6^{\circ}\text{C}$  i  $4,1^{\circ}\text{C}$  odpowiednio w sezonie letnim i zimowym. Porównując wartości skrajne, jak i rozstęp kwartylowy, można stwierdzić, że wyraźnie zaznaczyła się większa zmienność uzyskanych wyników w okresie styczeń–marzec. Zakres zmienności  $SUHI_{AVE}$  zimą zmieniał się w przedziale od  $-0,6^{\circ}\text{C}$  do  $3^{\circ}\text{C}$ , podczas gdy w cieplej połowie roku wartości te zmieniały się w granicach  $1,6$ – $2,9^{\circ}\text{C}$  (rys. 2a). W przypadku wskaźnika  $SUHI_{MAX}$  wartości te zawierały się w przedziale od  $2,6^{\circ}\text{C}$  do  $5,4^{\circ}\text{C}$  oraz od  $1^{\circ}\text{C}$  do  $5,1^{\circ}\text{C}$  odpowiednio w sezonie letnim i zimowym (rys. 2a i rys. 2b). Podobne badania nad tym zjawiskiem w innych miastach Polski z wykorzystaniem satelity Landsat (Gawuć 2013) pokazują średnie natężenie PMWC na poziomie  $0,9^{\circ}\text{C}$  we Wrocławiu i  $1,6^{\circ}\text{C}$  w Warszawie. Natomiast najnowsze badania przeprowadzone dla obszaru Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii pokazały, że w przypadku zespołu obszarów zurbanizowanych powierzchniowa miejska wyspa ciepła ma charakter „archipelagu”, a uzyskane wartości PMWC dla pomiarów w sezonie letnim osiągają poziom od  $5,6^{\circ}\text{C}$  do  $6,5^{\circ}\text{C}$  (Renc i in. 2022). Szersze badania nad PMWC w innych miastach europejskich (Berlin, Madryt, Paryż, Londyn) pokazały, że średnie wartości PMWC zawierały się w przedziale  $2,6$ – $2,8^{\circ}\text{C}$  (Sobrino, Irakulis 2013). Natomiast analiza temperatury powierzchniowej z 32 chińskich miast z wykorzystaniem satelity MODIS wskazała, że średnia PMWC w sezonie letnim wyniosła  $3$ – $4^{\circ}\text{C}$  (Zhou i in. 2014).

Prezentowane wartości dla Łodzi uzyskane metodą telelekcji satelitarnej są bardzo zbliżone do tych, które uzyskiwano z pomiarów naziemnych. Średnie miesięczne wartości miejskiej wyspy ciepła (na podstawie stacji naziemnych) nie przekraczały  $2^{\circ}\text{C}$  a natężenie MWC  $>3^{\circ}\text{C}$  najczęściej obserwowano w okresie letnim w godzinach nocnych (Fortuniak 2003). Powierzchniowa miejska wyspa ciepła stanowi zasób ciepła do rozwoju atmosferycznej wyspy ciepła. Uzyskane wyniki z analizy zdjęć z przelotu wieczornego mogą stanowić poparcie tej tezy.

Przewagą wyników detekcji satelitarnej nad klasycznymi pomiarami naziemnymi jest możli-

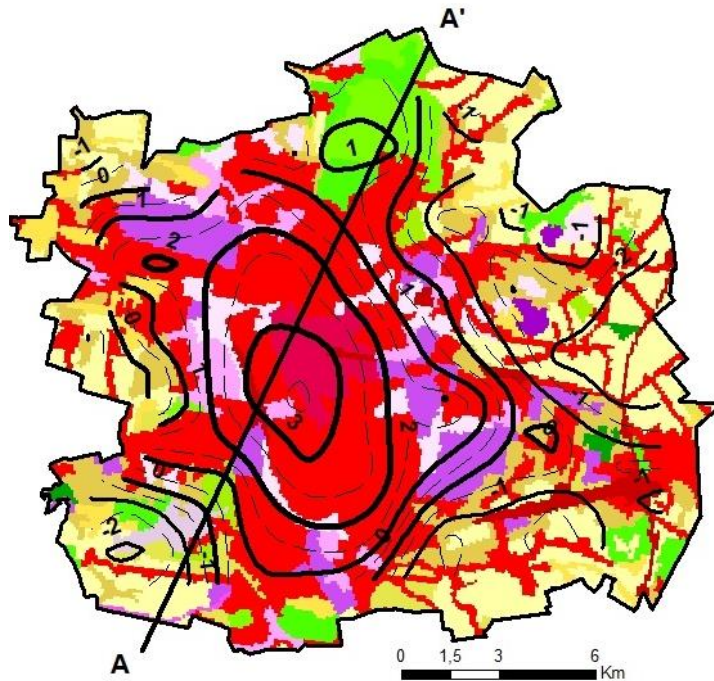


Rys. 2. Wybrane statystyki powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła w Łodzi w miesiącach IV-IX (A) oraz w miesiącach I-III (B)

Selected characteristics of surface urban heat island in Łódź: (A) April–September; (B) January–March

wość ukazania szczegółowej zmienności przestrzennej temperatury. W cieplej porze roku najwyższą średnią temperaturą powierzchni (LST) charakteryzuje się ściśle centrum miasta o zwartej zabudowie (rys. 3). W rejonie tym wartości te są średnio o  $3^{\circ}\text{C}$  wyższe od średniej temperatury powierzchniowej w obszarze administracyjnym miasta. Dodatkowo anomalie temperatury powierzchniowej obejmują wszystkie centralne dzielnice miasta. Również stosunkowo wyższymi temperaturami cechują się rejonu we wschodniej jak i w północno-zachodniej części miasta. W obu tych rejonach rozciągają się duże dzielnice mieszkaniowe Widzew i Teofilów (gdzie dominują 5–10-kondygnacyjne bloki) sąsiadujące z terenami użytkowymi przemysłowo i usługowo. Najniższymi powierzchniowymi temperaturami w obrębie miasta (ujemne wartości anomalii LST) charakteryzują się rejonu peryferyjne, gdzie dominują tereny rolnicze lub luźnej zabudowy jednorodzinnej. W tych rejonach wartości temperatury powierzchniowej są średnio o około  $1$ – $2^{\circ}\text{C}$  niższe od średniej dla całego obszaru w granicach administracyjnych Łodzi (rys. 3).

W okresie zimowym rozkład przestrzennej anomalii temperatury (rys. 4) jest podobny do tych z sezonu letniego. W centralnej części miasta wartości temperatury powierzchniowej były o około  $2^{\circ}\text{C}$  wyższe od średniej temperatury wyznaczonej dla całego zdjęcia w obrębie granic miasta. Wspomniane na przykładzie pomiarów z cieplej pory roku rejonu o najniższych wartościach anomalii LST również w tym przypadku cechują się ujemnymi wartościami  $LST_{anom}$ . Przy czym wyznaczone średnie wartości zawierają się w przedziale

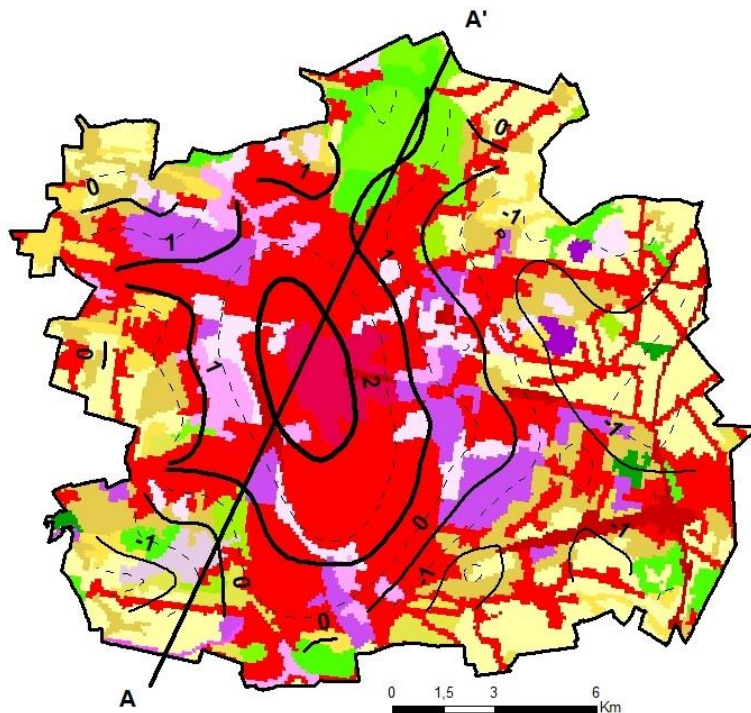


Rys. 3. Rozkład przestrzenny średniej anomalii temperatury powierzchniowej  $LST_{anom}$  w Łodzi na podstawie detekcji satelitarnej w miesiącach IV–IX na tle typów pokrycia terenu

Na mapie zaznaczono profil A–A' użyty na rys. 5; Oznaczenia form pokrycia terenu jak na rys. 1A

Spatial distribution of mean surface temperature anomaly  $LST_{anom}$  in Łódź based on satellite detection in April–September against the background of land cover types

Map shows profile line A–A' used in Fig. 5; Designations of land cover forms as in Fig. 1A

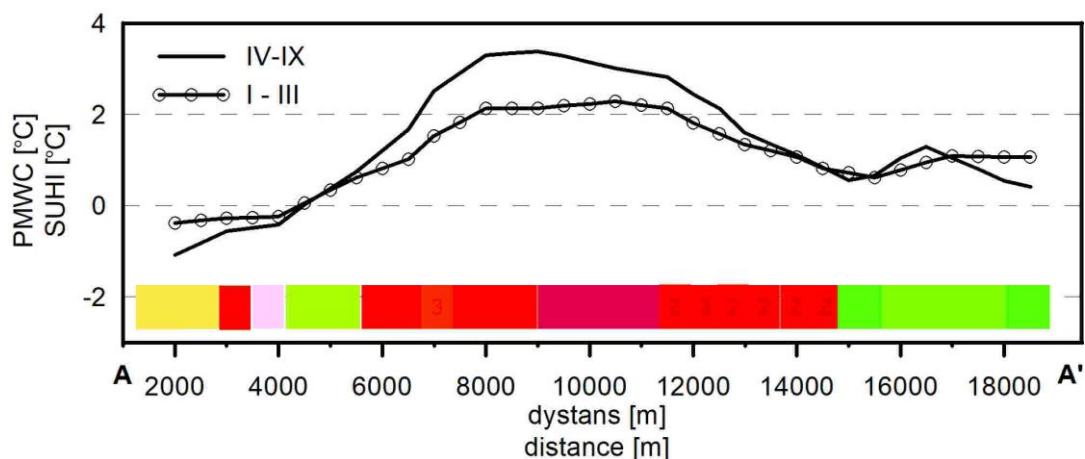


Rys. 4. Rozkład przestrzenny średniej anomalii temperatury powierzchniowej  $LST_{anom}$  w Łodzi na podstawie detekcji satelitarnej w miesiącach I–III na tle typów pokrycia terenu

Na mapie zaznaczono profil A–A' użyty na rys. 5; Oznaczenia form pokrycia terenu jak na rys. 1A

Spatial distribution of mean surface temperature anomaly  $LST_{anom}$  in Łódź based on satellite detection in January–March against the background of land cover types

Map shows profile line A–A' used in Fig. 5; Designations of land cover forms as in Fig. 1A



Rys. 5. Zmiany średniej sezonowej wartości PMWC wzdłuż profilu A–A' (rys. 3) na tle form pokrycia terenu  
Oznaczenia form pokrycia terenu jak na rys. 1A

Changes in average seasonal SUHI value along the A–A' profile (Fig. 3)  
against the background of land cover forms  
Designations of land cover forms as in Fig. 1A

od 0 do  $-1,5^{\circ}\text{C}$  (rys. 4). Uzyskane mapy ukazujące przestrzenne zróżnicowanie temperatury powierzchniowej wyraźnie wskazują wyższe temperatury w przypadku gęstej zabudowy miejskiej. Potwierdza to również przebieg wartości  $LST_{anom}$  wzdłuż wyznaczonego profilu A–A'. Zarówno na podstawie wyników pomiarów zimowych, jak i z okresu letniego wyraźnie widać najsilniejszy wzrost temperatury powierzchniowej tam, gdzie zmienia się charakter pokrycia terenu z obszarów rolniczych i leśnych w zabudowę miejską luźną i zabudowę miejską zwartą (rys. 5). Przedstawiony rozkład przestrzenny PMWC wskazuje zgodność z wynikami sondaży patrolowych wykonanych w wybranych dniach (sezonu zimowego) w warunkach sprzyjających rozwojowi MWC. Podczas tych pomiarów najwyższe wartości temperatury w obserwowane były w ścisłym centrum miasta od  $-7^{\circ}\text{C}$  do  $-8^{\circ}\text{C}$ , na terenach zamiejskich temperatury spadły do poziomu  $-12^{\circ}\text{C}$ ,  $-18^{\circ}\text{C}$  (Kłysik 1998). Relatywnie wyższymi temperaturami cechowały się również rejon wspomnianych już dużych dzielnic mieszkaniowych (Kłysik 1998).

Charakterystyka anomalii LST dla form użytkowania terenu (tab. 3–4) potwierdza wpływ na kształtowanie temperatury powierzchniowej. Dodatnimi średnimi wartościami  $LST_{anom}$ , zarówno dla sezonu letniego, jak i zimowego, cechują się dzielnice o zabudowie zwartej, zabudowie miejskiej luźnej oraz tereny przemysłowe. Warto podkreślić, że w przypadku ścisłego centrum (zabudowa miejska zwarta) na wszystkich analizowanych zdjęciach wartości wyznaczonej anomalii

temperatury powierzchniowej były dodatnie, a najwyższe z nich przekraczały  $4^{\circ}\text{C}$ . W przypadku pozostałych form użytkowania minimalne  $LST_{anom}$  przyjmowały wartości ujemne. Warto również podkreślić, że obszar ten – jak pokazują wartości odchylenia standardowego, a także współczynnika zmienności – cechuje się bardzo małą zmiennością LST w porównaniu z innymi formami pokrycia terenu. Najchłodniejszym rejonami pod względem temperatury radiacyjnej były głównie obszary o charakterze rolniczym. Średnie wartości  $LST_{anom}$  wyniosły  $-0,6^{\circ}\text{C}$  i  $-0,9^{\circ}\text{C}$  odpowiednio dla chłodnej oraz ciepłej pory roku. Co więcej, to w tym typie pokrycia terenu charakterystyczne są najniższe wartości anomalii temperatury radiacyjnej w granicach miasta.

W przypadku takich rejonów jak lotnisko, miejsca wydobywania surowców i place budowy notowane średnie  $LST_{anom}$  były również bardzo niskie. Należy jednak pamiętać, że obszary te są stosunkowo mało rozległe przestrzennie, co może powodować (w przypadku rozdzielczości zdjęć satelity Sentinel 3), że obraz reprezentuje termikę obszarów sąsiednich. Doskonałym przykładem może być teren lotniska, gdzie w znacznej części występuje niska szata roślinna.

Na uwagę zasługuje również temperatura powierzchniowa obszarów sklasyfikowanych jako las liściasty. Tereny te to przede wszystkim zwarte kompleksy leśne w północno-wschodniej części miasta. Uzyskane wyniki pokazują, że szczególnie podczas pomiarów w chłodnej porze roku (tab. 4) temperatura powierzchniowa jest relatywnie wysoka na tle pozostałych form użytkowania terenu.



Tabela 3

Wybrane statystyki anomalii temperatury powierzchni na obszarze miasta dla określonych form użytkowania terenu w sezonie IV–IX

Selected statistics of surface temperature anomalies in urban area for land cover types during the warm season

Formy użytkowania/ <i>Land cover</i>	Średnia/ <i>Mean</i> [°C]	Odcylenie standardowe/ <i>Standard deviation</i> [°C]	Minimum/ <i>Minimum</i> [°C]	Maksimum/ <i>Maximum</i> [°C]	Współczynnik zmienności/ <i>Variation coefficient</i>
zabudowa miejska zwarta/ <i>continuous urban fabric</i>	2,7	0,7	1,1	4,3	0,2
zabudowa miejska luźna/ <i>discontinuous urban fabric</i>	0,6	1,6	-3,1	4,4	2,5
tereny przemysłowe i handlowe/ <i>industrial or commercial units</i>	1,0	1,0	-2,2	3,4	1,0
tereny drogowe i kolejowe/ <i>road and rail networks</i>	0,3	1,8	-2,2	4,3	6,7
lotniska/ <i>airports</i>	-1,3	1,0	-3,5	0,5	-0,8
miejsca wydobycia surowców mineralnych/ <i>mineral extraction sites</i>	-1,3	0,5	-2,3	-0,8	-0,4
plac budowy/ <i>construction sites</i>	-1,4	0,7	-1,0	1,5	-0,5
tereny zielone/ <i>green urban areas</i>	0,0	1,1	-1,0	4,0	-
tereny sportowe i rekreacyjne/ <i>sport and leisure facilities</i>	0,7	1,2	-2,0	3,4	1,8
tereny rolnicze/ <i>agriculture land</i>	-0,9	1,1	-3,9	3,6	-1,3
las liściasty/ <i>broad-leaved forest</i>	0,6	1,3	-2,1	3,6	2,0
bór iglasty/ <i>coniferous forest</i>	-0,9	0,7	-2,4	0,2	-0,7
las mieszany/ <i>mixed forest</i>	-0,2	1,1	-2,9	3,6	-7,0
lasy i roślinność krzewiasta/ <i>transitional woodland-shrub</i>	-0,1	1,0	-2,4	1,7	-8,6

Dodatkowo należy podkreślić, że w przypadku tego typu pokrycia terenu, jak i w przypadku lasów mieszanych i roślinności krzewiastej, zarówno w cieplej, jak i chłodnej porze roku wartości LST cechowały się znacznie większą zmiennością osiągniętych wartości.

## Podsumowanie

Uzyskane wyniki na podstawie detekcji satelitarnej temperatury radiacyjnej potwierdziły tworze-

nie się wyraźnej powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła w Łodzi. W okresie letnim w godzinach wieczornych najwyższe różnice pomiędzy temperaturą radiacyjną powierzchni miejskiej a obszarami podmiejskimi przekraczały 4 °C.

Charakterystyka zmienności przestrzennej temperatury powierzchni w obrębie miasta wskazała na ścisły związek notowanych wartości z formami pokrycia terenu. Gęsta zabudowa miejska z dużym odsetkiem powierzchni sztucznych okazały się czynnikami decydującymi o najwyższych wartościach temperatury powierzchniowej.

Tabela 4

Wybrane statystyki wartości anomalii temperatury powierzchni na obszarze miasta dla określonych form użytkowania terenu w sezonie I–III

Selected statistics of surface temperature anomalies in urban area for land cover types during the cold season

Formy użytkowania/ <i>Land cover</i>	Średnia/ <i>Mean</i> [°C]	Odcylenie standardowe/ <i>Standard deviation</i> [°C]	Minimum/ <i>Minimum</i> [°C]	Maksimum/ <i>Maximum</i> [°C]	Współczynnik zmienności/ <i>Variation coefficient</i>
zabudowa miejska zwarta/ <i>continuous urban fabric</i>	2,1	0,9	0,5	4,0	0,4
zabudowa miejska luźna/ <i>discontinuous urban fabric</i>	0,5	1,4	-4,0	4,2	3,1
tereny przemysłowe i handlowe/ <i>industrial or commercial units</i>	0,6	1,1	-2,6	3,3	1,9
tereny drogowe i kolejowe/ <i>road and rail networks</i>	-0,2	1,6	-2,9	3,7	-7,7
lotniska/ <i>airports</i>	-1,1	1,6	-4,1	2,5	-1,4
miejsca wydobycia surowców mineralnych/ <i>mineral extraction sites</i>	-1,2	0,9	-2,2	0,6	-0,7
plac budowy/ <i>construction sites</i>	0,01	1,0	-1,1	2,7	-
tereny zielone/ <i>green urban areas</i>	0,9	1,4	-2,5	3,8	1,5
tereny sportowe i rekreacyjne/ <i>sport and leisure facilities</i>	0,6	1,1	-2,0	3,7	1,8
tereny rolnicze/ <i>agriculture land</i>	-0,6	1,2	-4,6	3,3	-2,1
las liściasty/ <i>broad-leaved forest</i>	1,2	1,2	-1,3	4,2	1,0
bór iglasty/ <i>coniferous forest</i>	-1,0	0,8	-2,3	0,4	-0,8
las mieszany/ <i>mixed forest</i>	0,05	1,2	-3,0	3,1	-
lasy i roślinność krzewiasta/ <i>transitional woodland-shrub</i>	0,2	1,1	-1,2	3,6	6,4

Przeprowadzone badania pokazały, że wyniki pomiarów temperatury powierzchni stanowią istotne uzupełnienie obserwacji prowadzonych przez inne systemy satelitarne, na przykład MODIS lub Landsat.

## Literatura

- ArcMap. 2024. Online: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/resources> (data ostatniego dostępu: 05.09.2024).
- CCI (Climate Change Initiative). 2024. Online: <https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/> (data ostatniego dostępu: 05.09.2024).
- Copernicus. 2024. Online: <https://www.copernicus.eu/pl> (data dostępu: 05.09.2024).
- EPA (Environmental Protection Agency). 2017. *Heat Island effect*. Online: [https://19january2017snapshot.epa.gov/heat-islands/heat-island-impacts\\_.html](https://19january2017snapshot.epa.gov/heat-islands/heat-island-impacts_.html) (data ostatniego dostępu: 26.01.2024)
- Fabrizi R., Bonafoni S., Biondi R. 2010. Satellite and ground-based sensors for the urban heat island analysis in the city of Rome. *Remote Sensing* 2: 1400-1415. DOI:10.3390/rs2051400
- Fortuniak K. 2003. Miejska Wyspa Ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne,

- modele numeryczne i statystyczne. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego.
- Fujibe F. 2011. Urban warming in Japanese cities and its relation to climate change monitoring. *International Journal of Climatology* 31: 162-173.  
DOI: 10.1002/joc.2142
- Gedzelman S.D., Austin S., Cermak R., Stefano N., Partridge S., Quesenberry S., Robinson D.A. 2003. Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theoretical and Applied Climatology* 75: 29-42.  
DOI: 10.1007/s00704-002-0724-2
- Giridharan R., Kolokotroni M. 2009. Urban heat island characteristics in London during winter. *Solar Energy* 83: 1668-1682.
- Gawuć L. 2014. Dobowa zmienność powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła wybranych miast w Polsce podczas fali upałów w sierpniu 2013 roku na podstawie danych satelitarnych. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Inżynieria Środowiska* 68: 19-34.
- Gawuć L., Strużewska J. 2016. Impact of MODIS quality control on temporally aggregated urban surface temperature and long-term surface urban heat island intensity. *Remote Sensing* 8: 374.  
DOI:10.3390/rs8050374
- Gawuć L., Łobocki L., Strużewska J. 2022. Application of the profile method for the estimation of urban sensible heat flux using roadside weather monitoring data and satellite imagery. *Urban Climate* 42: 101098.
- Kaszewski B.M., Siwek K. 1998. Cechy przebiegu dobowego temperatury powietrza w centrum i na peryferiach Lublina. *Acta Universitatis Lodzianis – Folia Geographica Physica* 3: 213-220.
- Kawashima S., Tomoyuki I., Mitsuo M., Tetsuhisa M. 2000. Relations between Surface Temperature and Air Temperature on a Local Scale during Winter Nights. *Journal of Applied Meteorology* 39: 1570-1579.
- Kłysik K. 1998. Charakterystyka powierzchni miejskich w Łodzi z klimatologicznego punktu widzenia. *Acta Universitatis Lodzianis – Folia Geographica Physica* 3: 173-185.
- Kłysik K., Fortuniak K. 1999. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland. *Atmospheric Environment* 33 (24-25): 3885-3895.
- Lai J., Zhan W., Huang F., Quan J., Hu L., Gao L., Ju W. 2018. Does quality control matter? Surface urban heat island intensity variations estimated by satellite-derived land surface temperature products. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 139: 212-227.
- Li X., Li W., Middel A., Harlan S., Brazel A., Turner B. 2016. Remote sensing of the surface urban heat island and land architecture in Phoenix, Arizona: Combined effects of land composition and configuration and cadastral-demographic-economic factors. *Remote Sensing of Environment* 174: 233-243.
- Liu L., Zhang Y. 2011. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong. *Remote Sensing* 3: 1535-1552.
- Majkowska A., Kolendowicz L., Pótrolniczak M., Hauke J., Czernecki B. 2017. The urban heat island in the city of Poznań as derived from Landsat 5 TM. *Theoretical and Applied Climatology* 128: 769-783.  
DOI: 10.1007/s00704-016-1737-6
- Oke T.R. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7: 769-779.
- Polehampton E., Cox C., Smith D., Ghent M. 2023. Copernicus Sentinel 3 SLSTR Land User Handbook. Online: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-slstr> (data ostatniego dostępu: 2024.02.06)
- Pu R., Gong P., Michishita R., Sasagawa T. 2006. Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval. *Remote Sensing and Environment* 104: 211-225.
- Renc A., Łupikasza E. 2024. Changes in the Surface urban heat island between 1986 and 2021 in the polycentric Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis, southern Poland. *Building and Environment* 247: 110997.
- Renc A., Łupikasza E., Błaszczak M. 2022. Spatial structure of the surface heat and cold islands in summer based on Landsat8 imagery in southern Poland. *Ecological Indicators* 142: 109181.
- Sentinel. 2024. Online: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-slstr/level-2/land-surface-temperature-1st> (data ostatniego dostępu: 05.09.2024).
- SNAP. 2024. Online: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/> (data ostatniego dostępu: 05.09.2024).
- Sobrino J.A., Irakulis I. 2020. A methodology for comparing the surface urban heat island in selected Urban agglomerations around the world from Sentinel-3 SLSTR data. *Remote Sensing* 12: 2052.

- Statystyka Łodzi. 2022. Urząd statystyczny w Łodzi. Online: lodz.stat.gov.pl (data ostatniego dostępu: 2024.02.06)
- Steenefeld G.J., Koopmans S., Heusinkveld B.G., van Hove L.W.A., Holtslag A.A.M. 2011. Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands. *Journal of Geophysical Research* 116: D20129. DOI:10.1029/2011JD015988
- Streutker D.R. 2002. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing* 23(13): 2595-2608.
- Szymanowski M. 2004. Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu. *Acta Universitatis Wratislaviensis. Studia Geograficzne* 77.
- Sun Y.J., Wang J.F., Zhang R.H., Gillies R.R., Xue Y., Bo Y.C. 2005. Air temperature retrieval from remote sensing data based on thermodynamics. *Theoretical and Applied Climatology* 80: 37-4.
- Theeuwes N.E., Steenefeld G.J., Ronda R.J., Holtslag A.A. 2017. A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. *International Journal of Climatology* 37: 443-454. DOI: 10.1002/joc.4717
- Wawer J. 1997. Miejska wyspa ciepła w Warszawie. *Prace i Studia Geograficzne* 20: 105-197.
- Weng Q. 2012. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment* 117: 34-49.
- World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. 2019. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. New York, United Nations.
- Yang Q., Huang A., Tang Q. 2019. The footprint of urban heat island effect in 302 Chinese cities: Temporal trends and associated factors. *Science of the Total Environment* 655: 652-662.
- Zhou D., Zhao S., Liu S., Zhang L., Zhu C. 2014. Surface urban heat island in China's 32 major cities: Spatial patterns and drivers. *Remote Sensing of Environment* 152: 51-56.

## Summary

The urban heat island (UHI) is a complex meteorological phenomenon that has a significant impact on thermal comfort in the urban environment. In cities such as Łódź, urban development, a small percentage of green areas and intensive human activity contribute to an increase in air temperature compared to the surrounding rural areas. Previous research based mainly on ground stations has indicated the existence of UHI in Łódź, but their ability to analyse spatial variability is limited. In this context, the use of Sentinel-3 satellite data can be an effective method for surface UHI assessment.

In the study of the urban heat island in Łódź, satellite detection data of surface temperature (LST – Land Surface Temperature) from the Sentinel-3 satellite system supervised by the European Space Agency were used. In order to achieve the research objectives, 30 cases were selected from the evening, when the sky was clear, from January 1, 2021 to August 30, 2022.

The analysis showed that the median value of the surface average urban heat island ( $SUHI_{AVE}$ ) was  $2.6^{\circ}C$  in the period from January to September, while the median maximum values ( $SUHI_{MAX}$ ) reached  $4.6^{\circ}C$ . Comparison of the results against those for other cities in Poland and Europe showed that SUHI values in Łódź are similar or slightly lower, which suggests a moderate intensity of this phenomenon compared to other agglomerations.

Satellite detection data made it possible to assess the spatial variability of surface temperature in Łódź. It has been shown that the highest temperatures occur in the very centre of the city, where temperature anomalies are on average  $3^{\circ}C$  higher than the average for the entire city area.

Areas with dense development, both in the city centre and in residential districts, are characterized by positive temperature anomalies, reaching even over  $4^{\circ}C$ . However, agricultural areas or with areas of sparse single-family buildings show negative temperature anomalies.