Uniwersytet Śląski w Katowicach Wydział Nauk Przyrodniczych

mgr Aleksandra Renc

Przestrzenne i sezonowe zróżnicowanie miejskiej wyspy ciepła w Górnośląsko – Zagłębiowskiej Metropolii na podstawie danych satelitarnych

Praca doktorska

Promotor:

Prof. dr hab. Ewa Łupikasza

Sosnowiec, 2025

Podziękowania

Składam najserdeczniejsze podziękowania dla promotorki niniejszej pracy doktorskiej prof. dr hab. Ewie Łupikaszy, za poświęcony czas, każdą cenną poradę, liczne wskazówki merytoryczne i nieocenioną pomoc. Bardzo dziękuję również za okazaną życzliwość, wsparcie i zaangażowanie podczas całego okresu moich studiów doktoranckich.

Spis treści

I. Formalne elementy rozprawy doktorskiej	4
1. Streszczenie rozprawy doktorskiej w języku polskim	4
2. Streszczenie rozprawy doktorskiej w języku angielskim	7
3. Spis publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej	10
4. Wkład autora rozprawy w poszczególne artykuły naukowe wchodzące w skład rozpr doktorskiej	awy 11
5. Oświadczenia współautorów	13
6. Skróty	16
II. Przewodnik rozprawy doktorskiej	18
1. Wprowadzenie	18
1.1. Motywacja podjętych badań w dobie współczesnych zmian klimatu	19
1.2. Cel rozprawy doktorskiej	23
1.3. Stan dotychczasowych badań	24
1.3.1. Atmosferyczna i powierzchniowa miejska wyspa ciepła	24
1.3.2. Powierzchniowa wyspa chłodu	31
2. Obszar badań	32
3. Dane i źródła danych	34
3.1. Dane satelitarne	34
3.2. Dane meteorologiczne	37
3.3. Klasyfikacje pokrycia terenu	37
4. Metody badań	41
4.1. Metody wyznaczania temperatury powierzchni czynnej	41
4.2. Zasięg powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i powierzchniowej wyspy chłodu	43
4.3. Wskaźniki zasięgu powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i powierzchniowej wyspy chłodu	44
4.4. Wskaźniki intensywności powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła	48
4.5. Reorganizacja klasyfikacji pokrycia terenu CLC	48
4.6. Analizy statystyczne	49
4.7. Oprogramowanie	50
5. Wyniki i dyskusja	51
5.1. Publikacja 1: Rozpoznanie struktury letniej powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i powierzchniowej wyspy chłodu w GZM	51
5.2. Publikacja 2: Wieloletnia zmienność powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła	60
5.3. Publikacja 3: Sezonowa zmienność miejskiej i pozamiejskiej powierzchniowej wyspy chłodu	67
6. Podsumowanie i wnioski	77
7. Spis rycin i tabel	81
8. Bibliografia	82
III. Publikacje wchodzące w skład rozprawy doktorskiej	93

I. Formalne elementy rozprawy doktorskiej

1. Streszczenie rozprawy doktorskiej w języku polskim

Wyższa temperatura w mieście w stosunku do terenów otaczających jest efektem występowania miejskiej wyspy ciepła (ang. Urban Heat Island - UHI). Zjawisko UHI w dobie współczesnych zmian klimatu i postępującej urbanizacji jest szczególnie istotne ponieważ potęguje skutki globalnego ocieplenia poprzez intensyfikację fal upałów w mieście. UHI, stanowiąca zagrożenie dla zdrowia, a w skrajnych przypadkach dla życia mieszkańców miast latem, jest postrzegana jako zjawisko niebezpieczne w skali lokalnej. W pozostałych porach roku występowanie UHI postrzegane jest pozytywnie, niemniej jednak korzyści wynikające z obecności UHI zimą (np. redukcja śmiertelności związanej w hipotermią) są niewspółmierne do negatywnych skutków SHI latem. Dlatego przestrzenna identyfikacja UHI jest niezbędna aby działania adaptacyjne zostały wdrażane w najbardziej problematycznych dzielnicach miast. Pomimo, iż Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolia (GZM) jest jednym z najbardziej zurbanizowanych i zaludnionych obszarów Polski, badania nad UHI w tym obszarze były sporadyczne. W związku z powyższym, głównym celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest rozpoznanie struktury powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (ang. Surface Urban Heat Island – SUHI) w GZM na podstawie danych satelitarnych w ujęciu sezonowym. Pod pojęciem struktury rozumie się przestrzenne zróżnicowanie, kompozycję oraz intensywność SUHI.

Badanie przeprowadzone w oparciu o dane satelitarne Landsat wykazało, że SUHI w środkowej części GMZ ma strukturę archipelagu co jest wynikiem policentrycznej struktury urbanistycznej metropolii (publikacja nr 1). Powierzchniowa wyspa ciepła (*ang. Surface Heat Island* – SHI) w sezonie letnim obejmowała od 15,4% do 16,4% GZM, w zależności od dnia, a 70% jej powierzchni stanowiła zabudowa miejska luźna oraz tereny przemysłowe i handlowe. W obrębie SHI znalazły się również silnie nagrzane powierzchnie terenów rolnych, w związku z tym kluczowym aspektem badań była modyfikacja wskaźnika powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (LCL SUHI). W wyniku wykluczenia silnie nagrzanych powierzchni nie będących obszarami miejskim zasięg SHI zmniejszył się z 2,9% do 2,0% w zależności od dnia. Powierzchniowa wyspa chłodu (*ang. Surface Cold Island* – *SCI*) w GZM stanowiła od 12,2% do 19,4%, w zależności od dnia. Struktura SCI była bardziej rozczłonkowana i obejmowała głównie

lasy i zbiorniki wodne. Ponadto, zidentyfikowano permanentną SHI (9% GZM) i SCI (3,6% GZM) tzn. taką, która obejmuje niezmiennie te same tereny na wszystkich analizowanych obrazach. Opad atmosferyczny, który wystąpił dzień przed rejestracją jednego z analizowanych obrazów satelitarnych spowodował osłabienie efektywności chłodzącej roślinności, przede wszystkim lasów iglastych. W efekcie doprowadziło to do znacznego zmniejszenia zasięgu permanentnej SCI.

Zjawisko SUHI jest determinowane przez charakter powierzchni miejskiej, dlatego kolejny cząstkowy cel badań dotyczył określenia zmian zasięgu SUHI od 1986 do 2021 roku w świetle zmian zagospodarowania terenu w okresie 1990 – 2018 w GZM (publikacja nr 2). Największym przyrostem charakteryzowały się powierzchnie sztuczne – o 4,8%, z kolei największym ubytkiem powierzchnie role – o 3,7% co było bezpośrednio związane z przekształcenia tych obszarów w tereny zabudowane. Porównanie zdjęć satelitarnych zarejestrowanych w różnych latach, lecz w podobnych terminach oraz podczas zbliżonych warunków meteorologicznych wykazało ekspansję SUHI w GZM rzędu 0,6% do 4,3%. Głównym powodem ekspansji SUHI był wzrost udziału obszarów nieprzepuszczalnych w obrębie GZM. Niezależnie od zmian zasięgu przestrzennego, stwierdzono wzrost średniej temperatury powierzchni czynnej wszystkich poddanych analizie typów pokrycia terenu, co wpisuje się w kierunek aktualnych zmian klimatu. Pomimo wzrostu średniej temperatury powierzchni czynnej, intensywność SUHI zmniejszyła się nawet o 3,4°C z powodu większego tempa wzrostu temperatury powierzchni wysp chłodu w GZM. Warto dodać, że taka sytuacja uwarunkowana jest trwającą od lat 90 suszą rolną w Polsce, która w połączeniu ze wzrastająca temperaturą na skutek globalnego ocieplenia doprowadziła do osłabienia efektu chłodzącego roślinności tworzącej wyspę chłodu.

UHI określana jest mianem zjawiska dynamicznego, przejawiającego się dużą zmiennością dobową oraz sezonową. W związku z tym, iż badania sezonowej zmienności SUHI nie były prowadzone w polskich aglomeracjach, w niniejszej pracy określono sezonową zmienność SHI oddzielnie w obrębie obszarów miejskich, jak i pozamiejskich. W większości sezonów miejska SHI była zlokalizowana w środkowej, najbardziej zurbanizowanej części metropolii, a jej powierzchnia zmieniała się pulsacyjnie w ciągu roku od maksimum latem do minimum jesienią co wynikało z rocznego cyklu rozwoju roślinności. Cykl wegetacyjny był również głównym powodem sezonowej zmienności pozamiejskiej SHI, która zimą i jesienią była większa o nieco ponad 1% od miejskiej SHI. Zimą, zarówno miejska jak i pozamiejska SHI zlokalizowane były głównie w zachodniej

części GZM w związku z rozkładem pokrywy śnieżnej, której było najmniej lub nie wystąpiła w ogólne w najniżej położonych zachodnich rejonach metropolii. Przez cały rok miejską SHI w około 80% stanowiły zabudowa miejska luźna oraz tereny przemysłowe i handlowe, jednak dominujący udział tych dwóch klas w SHI zmieniał się w zależności od pory roku. Pomimo, że udział zabudowy zwartej i hałd w powierzchni GZM był niewielki (łącznie ok. 1,1%) to ich potencjał do intensyfikowania SHI jest bardzo duży. Pozamiejska SHI składa się w przeważającej części z terenów rolnych (od 57,5 do 85,8%, w zależności od pory roku). Po raz pierwszy wyznaczono także, permanentną SHI pojawiająca się w tych samych obszarach w każdym sezonie, oraz sezonowo specyficzną SHI pojawiająca się na danym obszarze wyłącznie w danym sezonie. Permanentna miejska SHI obejmowała 3% GZM i składała się głównie z obszarów przemysłowych i handlowych, zabudowy miejskiej luźnej i hałd. Natomiast, ponad 63% sezonowej miejskiej SHI zimą, latem i jesienią pokrywała zabudowa miejska luźna, a około 13% tereny przemysłowe i handlowe. Pozamiejska SHI była zjawiskiem prawie wyłacznie sezonowym o czym świadczy marginalny udział permanentnej SHI w powierzchni GZM (0,4%). Nienawadniane grunty orne najbardziej przyczyniały się do rozwoju sezonowo specyficznej pozamiejskiej SHI.

2. Streszczenie rozprawy doktorskiej w języku angielskim

Higher temperatures in cities compared to surrounding areas are a result of the Urban Heat Island (UHI) phenomenon. In the context of contemporary climate change and ongoing urbanization, UHI is particularly significant as it exacerbates the effects of global warming by heat wave intensification within urban areas. UHI is considered a hazardous phenomenon at a local scale due to being risky for health and, in extreme cases, a threat to the city inhabitants lives during the summer. In other seasons, the presence of UHI is often perceived positively. However, the benefits of winter UHI (e.g., reduction in mortality due to hypothermia) are disproportionate when compared to the negative effects of Surface Heat Island (SHI) during summer. Therefore, UHI spatial identification is essential for the implementation of adaptive measures in the most problematic parts of the city. Although the Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis (GZM) is one of the most urbanized and densely populated regions of Poland, studies on UHI were rarely conducted. Hence, the main goal of this doctoral dissertation is to recognize the surface urban heat island (SUHI) structure in GZM from seasonal perspective based on satellite data. The "structure" refers to the spatial variability, composition, and intensity of SUHI.

The analysis, conducted based on Landsat satellite data, revealed that SUHI in the central part of GZM has an archipelago-like structure due to the polycentric structure of the metropolis (publication no. 1). In the summer season, the Surface Heat Island (SHI) covered between 15,4% and 16,4% of GZM (depending on the date) and 70% of the SHI area consisting of discontinuous urban fabric and industrial and commercial areas. Strongly heated agricultural areas were also included in the SHI. Thus, an essential part of the research was to propose an index for the surface urban heat island (LCL SUHI). After excluding strongly heated non-urban areas, the SHI extent decreased from 2,9% to 2%. Depending on the date, Surface Cold Island (SCI) in GZM accounted for 12.2% to 19.4%. The structure of SCI was more fragmented and mainly included forests and water bodies. Furthermore, permanent SHI (9% of GZM) and permanent SCI (3,6% of GZM) (occurring in the same places regardless of the date) were identified. Precipitation, occurring the day before the recording of one of the analyzed satellite images caused a weakening of the cooling efficiency of vegetation, primarily coniferous forests. As a result, it led to a significant reduction in the permanent SCI extent.

The SUHI is influenced by the characteristics of urban surfaces, therefore the next research objective concerned determining land cover changes from 1990 to 2018 and the

SUHI structure changes from 1986 to 2021 in GZM (publication no. 2). The largest increase was found for impervious surfaces – by 4.8%, while the largest decrease – by 3.7% for agricultural areas due to the transformation of these areas into urbanized ones. A comparison of satellite images taken in different years, but at similar times and under comparable meteorological conditions, revealed the SUHI expansion in GZM from by 0,6% to 4,3%. The main reason for the SUHI expansion was the increase in the share of impervious areas within the GZM. Regardless of the changes in spatial extent, an increase in the mean land surface temperature of all land cover types analyzed was noted, in line with the ongoing climate change trends. Despite the increase in the mean land surface temperature of all surface temperature within GZM. It is important to note that this situation was caused by the agricultural drought that has been going on in Poland since the 1990s, which, combined with the rising temperature due to global warming, has led to a weakening of the cooling effect of the vegetation creating the SCI.

UHI is considered a dynamic phenomenon, manifested by high daily and seasonal variability. Due to the fact that the seasonal variability of SUHI has not been previously studied for the Polish agglomeration, it was decided to fill this gap in the literature. Additionally, the seasonal variability of SHI was analyzed separately for urban and nonurban areas. In most seasons, urban SHI was located primarily in the central, most urbanized part of the metropolis, with its extent fluctuating throughout the year from a peak in summer to a minimum in autumn, which resulted from the annual vegetation cycle. The growing season also played a key role in the seasonal variability of non-urban SHI, which in winter and autumn was slightly more than 1% greater than urban SHI. During winter, both urban and non-urban SHI were mainly located in the western part of GZM, corresponding to the distribution of snow cover, which was least present or completely absent in the lowest-lying western regions of the metropolis. Throughout the year, approximately 80% of urban SHI consisted of discontinuous urban fabric and industrial and commercial areas. However, the effective contribution of these two classes in SHI varied depending on the season. Although there is a small share of continuous urban fabric and dumps in the GZM (approximately 1,1% in total), their potential capability to intensify SHI is considerable. Non-urban SHI was mainly composed of agricultural areas (from 57,5% to 85,8%, depending on the season). For the first time, both permanent SHI (occurring in the same areas each season) and seasonally specific SHI (appearing only in a given season) were identified. Permanent urban SHI covered 3% of GZM, mainly consisting of industrial and commercial sites, discontinuous urban fabric, and dumps. In contrast, over 63% of seasonally specific urban SHI in winter, summer, and autumn was covered by discontinuous urban fabric, while approximately 13% comprised industrial and commercial areas. Non-urban SHI was almost exclusively a seasonal phenomenon, as evidenced by the marginal contribution of permanent SHI to the GZM area (0,4%). Non-irrigated arable lands contributed most to the development of seasonally specific non-urban SHI.

3. Spis publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej

1. **Renc, A**., Łupikasza, E., Błaszczyk, M., 2022. Spatial structure of the surface heat and cold islands in summer based on Landsat 8 imagery in southern Poland. Ecological Indicators, 142, 109181. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109181

Impact Factor: 7.0, Liczba cytowań: 11 (10.02.2025 r.).

2. **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. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110997

Impact Factor: 7.1, Liczba cytowań: 7 (10.02.2025 r.).

3. Renc, A., Łupikasza, E., 2024. Permanent and Seasonally Specific Surface Heat Islandin urban and non-urban areas in mid-latitude polycentric agglomeration based on Landsatimages.EcologicalIndicators,169,112871.https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112871

Impact Factor: 7.0, Liczba cytowań: 1 (10.02.2025 r.).

4. Wkład autora rozprawy w poszczególne artykuły naukowe wchodzące w skład rozprawy doktorskiej

Załącznik nr 9 do pisma okólnego nr 2 Prorektora ds. nauki i finansów z dnia 19 lutego 2024 r.

Sosnowiec, 28.02.2025 miejscowość, data

Aleksandra Renc imię i nazwisko kandydata

aleksandra.renc@us.edu.pl adres e-mail

OŚWIADCZENIE OSOBY UBIEGAJĄCEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Oświadczam, że w pracy: **Renc**, A., Łupikasza, E., Błaszczyk, M., 2022. Spatial structure of the surface heat and cold islands in summer based on Landsat 8 imagery in southern Poland. Ecological Indicators, 142, 109181.

Mój wkład polegał na udziale w sformułowaniu problemu badawczego, studium literatury, weryfikacji zebranych obrazów satelitarnych zarejestrowanych między 2013 a 2019 rokiem w sezonie letnim oraz przetworzeniu 4 z nich do postaci temperatury powierzchni gruntu, przygotowaniu innych danych, w tym danych rastrowych, wektorowych oraz danych meteorologicznych, opracowaniu metodologii badań, analizie i interpretacja danych, przygotowaniu tekstu manuskryptu oraz przygotowaniu rycin i tabel (mój udział w pracy wyniósł około 75%).

Oświadczam, że w pracy: **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.

Mój wkład polegał na udziale w sformułowaniu problemu badawczego, studium literatury, weryfikacji zebranych obrazów satelitarnych zarejestrowanych między 1986 a 2021 rokiem w sezonie letnim oraz przetworzeniu 21 z nich do postaci temperatury powierzchni gruntu, przygotowaniu innych danych, w tym danych rastrowych, wektorowych oraz danych meteorologicznych, opracowaniu metodologii badań, analizie i interpretacja danych, przygotowaniu tekstu manuskryptu oraz przygotowaniu rycin i tabel (mój udział w pracy wyniósł około 70%).

Oświadczam, że w pracy: **Renc**, A., Łupikasza, E., 2024. Permanent and Seasonally Specific Surface Heat Island in urban and non-urban areas in mid-latitude polycentric agglomeration based on Landsat images. Ecological Indicators, 169, 112871.

Mój wkład polegał na udziale w sformułowaniu problemu badawczego, studium literatury, weryfikacji zebranych obrazów satelitarnych zarejestrowanych między 1986 a 2022 rokiem oraz przetworzeniu 54 z nich do postaci temperatury powierzchni gruntu, przygotowaniu innych danych, w tym danych rastrowych, wektorowych oraz danych meteorologicznych, opracowaniu metodologii badań, analizie i interpretacja danych, przygotowaniu tekstu manuskryptu oraz przygotowaniu rycin i tabel (mój udział w pracy wyniósł około 50%).

Kenc Alelisandra

5. Oświadczenia współautorów

Załącznik nr 10 do pisma okólnego nr 2 Prorektora ds. nauki i finansów z dnia 19 lutego 2024 r.

OŚWIADCZENIE WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Sosnowiec, dnia 28.02.2025

Ewa Łupikasza Imię i nazwisko współautora publikacji

Uniwersytet Śląski w Katowicach Wydział Nauk Przyrodniczych Instytut Nauk o Ziemi Afiliacja

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy: Renc, A., Łupikasza, E., Błaszczyk, M., 2022. Spatial structure of the surface heat and cold islands in summer based on Landsat 8 imagery in southern Poland. Ecological Indicators, 142, 109181. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109181

Mój udział obejmował współautorstwo koncepcji artykułu, korektę merytoryczną językową tekstu, przygotowanie niektórych materiałów graficznych oraz korespondencję z czasopismem.

Oświadczam, że w pracy: 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. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110997

Mój udział obejmował współautorstwo koncepcji artykułu, korektę merytoryczną językową tekstu, przygotowanie niektórych materiałów graficznych.

Oświadczam, że w pracy: Renc, A., Łupikasza, E., 2024. Permanent and Seasonally Specific Surface Heat Island in urban and non-urban areas in mid-latitude polycentric agglomeration based on Landsat images. Ecological Indicators, 169, 112871. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112871

Mój udział obejmował współautorstwo koncepcji artykułu oraz jego struktury, udział w przygotowaniu wniosków, korektę merytoryczną i językową tekstu, przygotowanie niektórych materiałów graficznych.

Podpis współautora publikacii

Załącznik nr 10 do pisma okólnego nr 2 Prorektora ds. nauki i finansów z dnia 19 lutego 2024 r.

OŚWIADCZENIE

WSPÓŁAUTORA OSOBY UBIEGAJĄEJ SIĘ O WŁASNYM WKŁADZIE W POWSTAWANIE PRACY

Sosnowiec, dnia 28.02.2025r.

Natoonata Bhesele Imię i nazwisko współautora publikacji

WNP Universitet sizisti w Katonical

OŚWIADCZENIE

Oświadczam, że w pracy: Renc, A., Łupikasza, E., Błaszczyk, M., 2022. Spatial structure of the surface heat and cold islands in summer based on Landsat 8 imagery in southern Poland. Ecological Indicators, 142, 109181. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109181

Mój udział polegał na edycji manuskryptu w zakresie merytorycznym (rozdział Materials and methods oraz Rycina 6). Mój udział w pracy wynosi 5%.

Podpis współautora publikacji

6. Skróty

Słownik skrótów zawiera najważniejsze skróty stosowane zarówno w przewodniku do rozprawy doktorskiej jak i w publikacjach wchodzących w jej skład. Słownik został przygotowany zarówno w języku polskim jak i w języku angielskim. Niektóre skróty są nazwami własnymi, dlatego nie posiadają polskich odpowiedników. Skróty zostały przedstawione w kolejności alfabetycznej.

Termin typ pokrycia terenu oraz klasa pokrycia terenu są bardzo często wykorzystywane w niniejszej rozprawie doktorskiej. Z tego względu chciałabym zdefiniować różnicę między tymi terminami, aby nie budziły wątpliwości. Sformułowanie "typ" odnosi się do głównych form pokrycia terenu takich jak: tereny antropogeniczne, tereny rolne, tereny leśne, obszary wodne. Natomiast termin "klasa" odnosi się do bardziej szczegółowych form pokrycia terenu, które wyróżniane są w ramach danego typu pokrycia terenu.

ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer

CLC - CORINE Land Cover

EROS - Earth Resources Observation and Science Center

ETM+ - Enhanced Thematic Mapper Plus

GDP – Gross domestic product. Produkt krajowy brutto (PKP)

GIS – Geographic Information System. System informacji geograficznej

GUS – Główny Urząd Statystyczny

GZM – Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis. Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolia

HIA – Hot Island Area

LCL SUHI – Land Cover Limited Surface Urban Heat Island. Powierzchniowa miejska wyspa ciepła ograniczona przez pokrycie terenu

LCL SUHII - Land Cover Limited Surface Urban Heat Island Intensity

LCZ – Local Climate Zone

LST – Land Surface Temperature. Temperatura Powierzchni Czynnej

MPA – Miejscowy Plan Adaptacji

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index. Znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

OLI – Operational Land Imager

RMUHI – Relief Modified Urban Heat Island

SCI - Surface Cold Island. Powierzchniowa Wyspa Chłodu

SHI - Surface Heat Island. Powierzchniowa Wyspa Ciepła

SUHI - Surface Urban Heat Island. Powierzchniowa Miejska Wyspa Ciepła

SUHII – Surface Urban Heat Island Intensity. Intensywność Powierzchniowej Miejskiej Wyspy Ciepła

SUHI_{WA} – Surface Urban Heat Island, agricultural excluded. Powierzchniowa Miejska Wyspa Ciepła, wyłączone tereny rolne

TIRS – Thermal Infrared Sensor

TM – Thematic Mapper

UHI – Urban Heat Island. Miejska Wyspa Ciepła

USGS - United States Geological Survey

II. Przewodnik rozprawy doktorskiej

1. Wprowadzenie

Postępująca urbanizacja doprowadziła do wzrostu obszarów pokrytych przez powierzchnie nieprzepuszczalne (asfalt, beton itp.), które charakteryzują się dużą pojemnością cieplną oraz niskim albedo (Oke, 1982). Jednocześnie, w obrębie obszarów miejskich zmniejsza się udział powierzchni naturalnych takich jak roślinność, które zapewniają chłodzenie poprzez ewapotranspirację i zacienienie (Amiri i in., 2009; Ziter et al., 2019). Wzrost udziału powierzchni nieprzepuszczalnych kosztem powierzchni naturalnych prowadzi do powstania miejskiej wyspy ciepła (UHI) (Howard, 1818), którą Oke (1995) opisuje jako występowanie wyższej temperatury w mieście w porównaniu do terenów pozamiejskich definiowany na podstawie różnicy temperatury pomiędzy tymi obszarami. W badaniach nad miejską wyspą ciepła wykorzystuje się temperaturę powietrza lub temperatury powierzchni czynnej. O ile nocą temperatura powietrza i powierzchni czynnej, przyjmują podobne wartości, to w ciągu dnia temperatura powierzchni czynnej jest zdecydowanie wyższa niż temperatura powietrza (Oke i in., 2017). Ze względu na różnice w dobowym przebiegu wspomnianych temperatur, kluczowe jest odpowiednie definiowanie UHI w zależności od metody jej wyznaczania (Renard i in., 2019; Masson i in., 2020). UHI studiowana na podstawie pomiarów instrumentalnych temperatury powietrza, najczęściej na wysokości 2 m nad gruntem, określana jest mianem atmosferycznej UHI (ang. canopy layer urban heat island definiowana przez Oke (1995)). Z kolei, UHI badana w oparciu o dane teledetekcyjne takie jak termalne obrazy satelitarne, które umożliwiają oszacowanie temperatury powierzchni gruntu nazywana jest powierzchniową UHI (SUHI), (ang. surface urban heat island definiowana przez Oke (1995)).

Atmosferyczna UHI analizowana jest na wysokości, na której temperatura powietrza w największym stopniu wpływa na zdrowie i komfort ludzi zamieszkujących obszary miejskie (Robine i in. 2008; Estoque i in., 2017). Niemniej jednak wyniki pomiarów instrumentalnych dostarczają danych o charakterze punktowym, co uniemożliwia precyzyjne rozpoznanie struktury przestrzennej UHI. Szczegółową analizę wyspy ciepła umożliwiają dane teledetekcyjne zwłaszcza w obszarach o gęstej strukturze miejskiej (Schwarz i in., 2012). Jak podaje Walczewski (2005) temperatura powierzchni gruntu bezpośrednio wpływa na temperaturę w przyziemnej warstwie atmosfery nawet

do 800-1000 m za dnia w sezonie letnim stąd badania UHI na postawie temperatury gruntu stanowią cenne źródło informacji o atmosferycznej UHI (Voogt i Oke, 2003; Weng i in., 2004; Walawender, 2009).

Rozprawa doktorska składa się z trzech części. Pierwsza z nich dotyczy formalnych elementów pracy. Druga stanowi zasadniczy przewodnik po rozprawie, natomiast trzecia część zawiera cykl publikacji na podstawie, których powstał niniejszy przewodnik. W przewodniku do niniejszej rozprawy doktorskiej będę stosować nazwy wykorzystanych przez mnie wskaźników w języku angielskim, aby zachować spójność z publikacjami, które wchodzą w skład rozprawy doktorskiej. Ze względu dużą liczbę stosowanych wskaźników postanowiłam stosować słowną nazwę "miejska wyspa ciepła" czy "wyspa chłodu" podczas omawiania zjawisk w ogólnym kontekście. Dodatkowo, aby uniknąć powielania informacji graficznej i tabelarycznej zawartych w publikacjach odwołałam się jedynie do numerów rycin i tabel, które ilustrują omawiane wyniki.

Przeprowadzone badania w ramach tej rozprawy doktorskiej zostały opublikowane w postaci trzech publikacji naukowych, które są wynikiem współpracy zespołu autorskiego. W niniejszym przewodniku stanowiącym podstawę mojej obrony doktorskiej, podczas omawiania wyników badań prezentowanych w poszczególnych artykułach zachowam pierwszoosobową narrację.

1.1. Motywacja podjętych badań w dobie współczesnych zmian klimatu

Problematyka UHI w dobie współczesnych zmian klimatu i postępującej urbanizacji jest szczególnie istotna. Wielu badaczy podkreśla, że pod wpływem zmiany klimatu, ekstremalne fale upałów będą częstsze i dodatkowo zintensyfikują UHI w miastach (Basara i in., 2010; Schwarz i in., 2012; Ward i in., 2016; Campbell i in., 2018; Alexander, 2020; Janku i in., 2024). Dni upalne (z maksymalną temperaturą dobową $\geq 30^{\circ}$ C) są obecnie trzykrotnie bardziej prawdopodobne niż 150 lat temu (IPCC, 2021). Większą częstość występowania dni upalnych stwierdzono również w Polsce, zwłaszcza w jej zachodniej i południowej części (Jedruszkiewicz i in., 2024). Średnia roczna liczba dni z falami upałów wzrasta w tempie 4,5 dnia na dekadę (Bednorz i Tomczyk, 2024). Ponadto, coraz więcej dni upalnych pojawia się także w maju i wrześniu co skutkuje wydłużeniem gorącego sezonu w Polsce (Jedruszkiewicz i in., 2024). Zmiany te prowadzą do nasilenia efektu UHI, szczególnie w obszarach o dużym zagęszczeniu zabudowy i skąpej roślinności. Postępująca urbanizacja sprzyja rozrostowi infrastruktury

miejskiej, co prowadzi do wzrostu powierzchni nieprzepuszczalnych w miastach, najczęściej kosztem utraty powierzchni naturalnych. Jest wysoce prawdopodobne, że w przyszłości coraz większa liczba osób będzie znajdować się pod wpływem oddziaływania UHI.

Wysoka temperatura powietrza w połączeniu z pozostałymi elementami pogody, działa na organizm człowieka obciążająco, prowadząc do przeciążenia układu krążenia oraz zwiększając ryzyko poważnych problemów zdrowotnych, hospitalizacji, a nawet zgonów (Kovats i Hajat, 2008; Guo i in., 2014). W Polsce, w okresie fal upałów zaobserwowano wzrost śmiertelności o 19-22% (Kuchcik i Degórski, 2009), przy czym szacuje się, że w przyszłości w wyniku stresu cieplnego śmiertelność może wzrosnąć nawet o 277%. W przypadku województwa śląskiego szacuje się wzrost śmiertelności od 180 do nawet 460% (Błażejczyk i in., 2015). W związku z powyższym, zjawisko UHI w sezonie letnim postrzegane jest w skali lokalnej za niebezpieczne dla mieszkańców miast.

Najbardziej zagrożoną grupą w społeczeństwie w kontekście negatywnych skutków UHI są niemowlęta, dzieci, osoby starsze oraz ludzie zmagający się z problemami zdrowotnymi w każdym wieku (Robine i in., 2008; Ma i in., 2015). Układ krążenia i mechanizm termoregulacji, które w przypadku dzieci nie są jeszcze w pełni rozwinięte, utrudnia im efektywną regulację temperatury ciała (Tsuzuki, 2023). Podobnie reagują osoby starsze oraz chore ponieważ mechanizm termoregulacji oraz układ krążenia ulegają osłabieniu wraz z wiekiem, w wyniku współistnienia chorób oraz przyjmowania niektórych leków (Daanen et al., 2020). W związku z tym dni gorące powodują większą podatność tych grup ludzi na odwodnienie czy udar cieplny (Robine i n., 2008; Fastl i in., 2024), a także zaostrzenie objawów przewlekłych chorób układu oddechowego i sercowo-naczyniowego (Muras, 2018).

Biorąc pod uwagę fakt, że osoby starsze są najbardziej narażone na negatywne konsekwencje UHI niepokojącym jest fakt, że europejskie społeczeństwo starzeje się. Udział ludności w wieku poprodukcyjnym (60/65+) stanowił 16,8% populacji Polski w 2010 roku i wzrósł do 23,3% w 2023 roku (GUS, 2024). Według prognoz Eurostatu, osoby starsze w Polsce będą stanowiły 35,6% społeczeństwa w 2060 roku (Abramowska-Kmon, 2023). Ponad ¼ wszystkich seniorów w Polsce mieszkała w województwie mazowieckim i śląskim w 2023 roku (GUS, 2024). Zatem, problematyka miejskiej wyspy ciepła w Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (GZM) jest istotna ze względu na duże

zaludnienie oraz znaczący odsetek ludności w wieku senioralnym. W 2013 roku w dwunastu gminach GZM ludność w wieku 65+ stanowiła ponad 20% wszystkich mieszkańców, natomiast w 2023 roku liczba takich gmin wzrosła do 38. Wart dodać, że GZM liczy 41 gmin (GUS, 2024).

UHI jest zjawiskiem dynamicznym, które zmienia się w ciągu roku ze względu na zmienność czynników, które przyczyniają się do jej powstania. Przeprowadzone dotychczas badania w różnych częściach świata potwierdzają zmienność jej intensywności i struktury przestrzennej w zależności od analizowanego sezonu (Geletič i in., 2019; Yang i in., 2020; Sfîcâ i in., 2023). Opisane wcześniej negatywne skutki UHI dotyczyły sezonu letniego. W pozostałych porach roku występowanie wyższej temperatury w mieście bywa postrzegane pozytywnie. Badania wskazują, że UHI zimą ogranicza śmiertelność w miastach spowodowaną niskimi temperaturami nawet o 15% (Macintyre i in., 2021), oraz redukuje zapotrzebowanie energetyczne miast na ogrzewanie mieszkań i budynków użyteczności publicznej. Zredukowana w ten sposób emisja niska (Roxon i in., 2019), może skutkować mniejszą śmiertelnością wynikającą ze wzrostu zanieczyszczenia powietrza w mieście. Badania nad sezonową zmiennością SUHI nie były dotąd podejmowane zarówno w GZM jak i w innych polskich miastach. Stąd analiza sezonowej struktury SUHI stała się jednym z celów mojej rozprawy doktorskiej.

Konsekwencje wynikające z postępującej urbanizacji i globalnego ocieplenia, w tym intensyfikacji UHI w miastach latem, doprowadziły do konieczności podjęcia działań, mających na celu przystosowanie miast do skutków zmiany klimatu. W efekcie opracowano miejskie plany adaptacji (MPA) do zmian klimatu dla 44 największych miast Polski. Badania przeprowadzone na potrzeby MPA jednoznacznie wskazały dni upalne jako jedyne zjawisko zagrażające mieszkańcom wszystkich badanych miast (MPA, 2018). Zatem, rozpoznanie struktury przestrzennej SUHI jest kluczowym elementem procesu adaptacji, umożliwiającym identyfikację obszarów wymagających wdrożenia zmian. Biorąc pod uwagę, że największym wyzwaniem dla miast jest ich chłodzenie, rozpoznanie struktury powierzchniowej wyspy chłodu w mieście również stanowi cenne źródło informacji w procesie adaptacji. Badania nad strukturą, kompozycją i efektywnością chłodzenia powierzchniowej wyspy chłodu obejmującej najchłodniejsze obszary w mieście również dostarczają informacji pomocnych w efektywnych działań adaptacyjnych. Stąd, w swoich badaniach podjęłam również badania nad identyfikacją permanentnej powierzchniowej wyspy chłodu, istniejącej niezależnie od zmiennych warunków meteorologicznych.

Struktura SUHI zależy głównie od struktury urbanistycznej miasta. W przypadku metropolii policentrycznych miejska wyspa ciepła przybiera kształt archipelagu Unikatowa w skali kraju struktura urbanistyczna GZM, gdzie miasta występują w bezpośrednim sąsiedztwie, ze słabo zaznaczonym lub nieistniejącym obszarem peryferyjnym, również stanowiły dla mnie motywację do podjęcia badań nad SUHI. W czasie kiedy formułowałam problematykę badawczą mojego projektu doktorskiego, nie istniały opracowania na temat SUHI w GZM.

1.2. Cel rozprawy doktorskiej

Celem głównym niniejszej rozprawy doktorskiej jest rozpoznanie struktury przestrzennej miejskiej wyspy ciepła (SUHI) w Górnośląsko–Zagłębiowskiej Metropolii (GZM) na podstawie obrazów satelitarnych w ujęciu sezonowym. Pod pojęciem struktury rozumie się rozkład przestrzenny, kompozycję oraz intensywność SUHI. Cel ten realizowałam poprzez następujące cele cząstkowe:

- 1. Rozpoznanie zasięgu i intensywności Powierzchniowej Miejskiej Wyspy Ciepła i Powierzchniowej Wyspy Chłodu w sezonie letnim w aglomeracji policentrycznej (artykuł nr 1).
- Określenie wieloletnich zmian w strukturze powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła w okresie 1986 – 2021 (artykuł nr 2).
- Rozpoznanie sezonowej zmienności powierzchniowej wyspy ciepła w obszarze miejskim i pozamiejskim (artykuł nr 3).

Z uwagi na fakt, iż miejska wyspa ciepła (UHI) jest szczególnie uciążliwa w sezonie letnim, pierwsze dwie publikacje wchodzące w skład niniejszej rozprawy doktorskiej dotyczyły rozpoznania struktury przestrzennej powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (SUHI) tylko w sezonie letnim. W trakcie realizacji tego celu zauważyłam, że w literaturze polskiej nie badano dotąd zjawiska SCI, które obejmuje najchłodniejsze obszary w mieście. Dlatego postanowiłam zbadać również strukturę powierzchniowej wyspy chłodu (SCI) w GZM (Renc i in., 2022). Zjawisko SUHI determinowane jest przez charakter powierzchni miejskiej, w związku z czym wprowadzenie powierzchni nieprzepuszczalnych w miejsce powierzchni roślinnych oraz podmokłych jest głównym czynnikiem powodującym intensyfikację tego zjawiska. Dlatego też badania opublikowane w publikacji nr 2 dotyczyły oceny wpływu zmian struktury przestrzennej GZM w okresie od 1986 do 2021 roku na zasięg i intensywność SUHI (Renc i Łupikasza, 2024). Występowanie i intensywność SUHI charakteryzują się zarówno cyklem dobowym, jak i sezonowym (Oke i in., 2017). Ponadto, w trackie prowadzonych przeze mnie badań zauważyłam, że znacząca część powierzchniowej wyspy ciepła (SHI) występuje w obszarach położonych poza miastem. Stąd w ostatnim artykule wchodzącym w skład cyklu publikacji skupiłam się na ocenie sezonowych zmian struktury SHI zarówno w mieście jak i w obszarze pozamiejskim (Renc i Łupikasza, 2024).

1.3. Stan dotychczasowych badań

1.3.1. Atmosferyczna i powierzchniowa miejska wyspa ciepła

Literatura światowa

Badania związane z miejską wyspą ciepła (UHI), która stanowi najbardziej charakterystyczny element klimatu miasta (Fortuniak, 2003), prowadzone są na całym świecie już od dwóch stuleci (Howard, 1818; Renou, 1868; Hann, 1885; Angot, 1896). Luck Howard (1818) jako pierwszy zaobserwował odrębność klimatyczną miasta, wykazując w swojej pracy wyraźnie wyższą temperaturę powietrza w centrum Londynu w porównaniu z jego terenem pozamiejskim. W późniejszych latach atmosferyczna UHI została zidentyfikowana jako zjawisko występujące głównie nocą, wynikające z rozbieżności między temperaturami miejskimi i wiejskimi oraz z tempa ochładzania powierzchni podczas zachodu słońca (Sundborg 1950; Takahashi, 1959; Chandler 1965; Oke i East 1971).

Kluczowe znaczenie dla rozwoju badań nad UHI miały prace T. R. Oke. W jednej z pierwszych prac, Oke wykazał, że w warunkach bezchmurnych i bezwietrznych ujawnia się wpływ wielkości populacji miast amerykańskich i europejskich na intensywność UHI (Oke, 1973). Oke (1982) jako pierwszy stworzył koncepcję cyklu dobowego atmosferycznej UHI w lecie podczas pogody bezchmurnej, na podstawie temperatury powietrza mierzonej na wysokości 2 metrów nad poziomem gruntu. Badania te wykazały, że intensywność UHI jest największa w okresie trzech do pięciu godzin po zachodzie słońca, a najmniejsza około południa (Oke, 1982). Kolejnym ważnym etapem w badaniach Oke'a było wyróżnienie czterech typów UHI (subsurface UHI, surface UHI, canopy layer UHI, boundary layer UHI), które wynikają z różnic w tempie schładzania i ogrzewania obszarów miejskich i pozamiejskich zachodzących na ich powierzchni, w ich podłożu i w powietrzu tychże obszarów (Oke, 1995). W 2017 roku Oke wraz z zespołem współautorskim (Oke i in. 2017) opublikował wyniki swoich wieloletnich badań w formie monografii pt. "Urban Climates" dostarczającej wszechstronnej wiedzy na temat wpływu urbanizacji na lokalne warunki klimatyczne.

Zjawisko UHI, rozpatrywane z perspektywy pokładu samolotu czy satelity, było przedmiotem badań od początku lat 70 XX wieku (Rao, 1972). Zastosowanie teledetekcji satelitarnej umożliwiło precyzyjne określenie rozkładu przestrzennego powierzchniowej

UHI w miastach Ameryki Północnej (Henry et al., 1989) oraz Europy (Roth et al., 1989). Rozkład ten był ściśle związany ze sposobem zagospodarowania terenu. Tereny przemysłowe oraz gęsto zabudowane wyróżniają się najwyższą LST, przez co identyfikowane są jako SUHI (Roth et al., 1989; Geletič i in., 2016; Stewart i in., 2021). Badania wskazują, że maksymalne natężenie SUHI jest większe w ciągu dnia niż w nocy (Roth et al., 1989; Azevedo i in., 2016). Wynika to z właściwości fizycznych powierzchni budujących miasto, które, ze względu na dużą pojemność cieplną, nagrzewają się silniej w porównaniu do zalegającego nad nimi powietrza (Klok i in., 2012). Ponadto wykazano, że dobowy przebieg SUHI może różnić się znacząco w miastach o podobnym makroklimacie, ale odmiennym sposobie użytkowania gruntu i geometrii powierzchni (Outcalt, 1972; Terjung i Louie, 1973; Carnahan i Larson, 1990).

Zarówno UHI, jak i SUHI były analizowane w bardzo szerokim kontekście, jednak najczęściej poruszano zagadnienie intensywności wyspy ciepła. Najczęściej stosowanym wskaźnikiem intensywności UHI i SUHI jest różnica temperatury między obszarem miejskim a pozamiejskim. Niemniej jednak, metodyka identyfikacji obszarów miejskich i pozamiejskich jest zróżnicowana (Lowry, 1977; Runnalls i Oke, 2000; Oke, 2006; Schwarz i in., 2012; Oke i in., 2017; Liu i in., 2023). W celu ułatwienia identyfikacji powierzchni miejskich, Stewart i Oke (2012) opracowali klasyfikacje pokrycia terenu *Local Climate Zone* (LCZ) rekomendując ją do badań nad wyznaczaniem intensywności UHI. Inną ciekawą metodę wyróżniania obszarów miejskich i pozamiejskich, zaproponował Liu i in. (2015), przyjmując że obszar miejski w ponad 75% pokrywają powierzchnie nieprzepuszczalne z kolei w obrębie obszarów pozamiejskich udział tej powierzchni nie przekracza 30% (Liu i in., 2015).

Podstawą identyfikacji SUHI w granicach miasta najczęściej było kryterium termiczne pomijające informację o sposobie użytkowania gruntu (Zhang i in., 2006; Zhang i in., 2013; Guha i in., 2018; Renard i in., 2019; Huang i in., 2019; Portela i in., 2020). Badania pokazują, że powierzchnie o charakterze zamiejskim, znajdujące się w obrębie granic administracyjnych miast (takie jak tereny rolne, sucha gleba), w ciągu dnia bywają cieplejsze niż powierzchnie miejskie (Goward, 1981; Alexander, 2020). Uwaga badaczy miejskiej wyspy ciepła skupiona była również na znaczeniu obszarów rolnych w badaniach intensywności miejskiej wyspy ciepła. Martin i in. (2015) wskazali problem klasyfikowania terenów rolnych leżących w administracyjnych granicach miast jako SUHI i wykluczyli obszary rolne z obszaru miasta (Martin i in., 2015). Inni badacze

dostrzegli, że silnie nagrzane treny rolne stanowiące obszar pozamiejski nie są dobrym odniesieniem termicznym do badań intensywności SUHI (Yao i in., 2019; Yang i in., 2020; Alexander 2021). Jedną z metod, która pozwoliła wyeliminować ten problem było wyznaczenie obszaru najcieplejszego i najchłodniejszego w mieście do obliczenia intensywności SUHI (Ma i in., 2010; Wu i in., 2019; Roy i in., 2020).

Literatura krajowa

W Polsce pierwsze badania wykazujące, że obszar miejski Warszawy był cieplejszy średnio o 1,5°C latem i 0,5°C zimą w porównaniu do obszarów peryferyjnych, zostały przeprowadzone już w 1916 roku przez Gorczyńskiego i Kosińską (Gorczyński i Kosińska, 1916). Kossowska (1970) jako pierwsza podjęła próbę określenia zasięgu i intensywności atmosferycznej UHI. W literaturze polskiej termin "miejska wyspa ciepła" nie był jednak jeszcze powszechnie stosowany, dlatego autorka nie uwzględniła go w tytule swojej pracy. W 1980 roku ukazała się publikacja, w której na podstawie 18 stacji pomiarowych rozmieszczonych na terenie całego Krakowa, szczegółowo omawiano intensywność UHI, stosując już termin "miejska wyspa ciepła" (Lewińska i Zgud, 1980). Badania przeprowadzone przez Lweińską i Zguda (1980) wykazały, że największa intensywność UHI jest zauważalna pomiędzy śródmieściem Krakowa a jego obszarami pozamiejskimi. Ponadto wzrost intensywności UHI był powiązany ze wzrostem amplitudy temperatury powietrza, wartości gradientu temperatury w profilu 100 m nad doliną oraz stężeniem zanieczyszczeń pyłowych. W kolejnych latach w wielu ośrodkach badawczych w Polsce organizowano sieci stacji pomiarowych w celu oceny mikroklimatu miasta oraz zjawiska UHI (Kłysik i Fortuniak, 1998; Koczorowska i Farat 2006; Kuchcik i in. 2008).

W odniesieniu do intensywności UHI, Baścik i Zgud, (1984) stwierdzili, wzrost prędkości wiatru oraz zachmurzenia zmniejsza intensywność UHI. Efekt ten nie był obserwowany w zamkniętych układach urbanistycznych. Kłysik (1998b) oszacował, że przy prędkości wiatru powyżej 4m/s, UHI w Łodzi zanika. Kluczową rolę wiatru w tworzeniu UHI w Łodzi potwierdził również Fortuniak (2003). Zjawisko UHI może wystąpić w każdym typie cyrkulacji atmosferycznej, jednak w 60% przypadków pojawia się podczas sytuacji antycyklonalnych (Wawer, 1995). Dodatkowo, stwierdzono niższą intensywności UHI w trakcie pogody cyklonalnej (0,8°C) w porównaniu do pogody antycyklonalnej (1,2°C) (Półrolniczak i in., 2017). Badania przeprowadzone w krakowskiej aglomeracji wykazały, że obecność mgieł również obniża intensywność UHI o ok. 1°C (Bokwa i in., 2018).

Ocena dobowej zmienności UHI oraz jej maksymalnego natężenia była przedmiotem badań w Krakowie (Lewińska i in., 1982), Toruniu (Wójcik i Marciniak, 1984), Warszawie (Wawer, 1995) oraz Łodzi (Kłysik i Fortuniak, 1999). Przeprowadzone tam badania zgodnie wykazały, że UHI charakteryzuje się największą intensywnością w porze ciepłej i w godzinach nocnych. Maksymalna intensywność warszawskiej UHI w ciągu doby przypada na godziny pomiędzy 21:00 a 1:00 w nocy przez cały rok (Wawer, 1997). Fortuniak i Kłysik (2008) ocenili, że w sprzyjających warunkach meteorologicznych UHI w Łodzi osiąga zazwyczaj 3–6°C latem oraz 2–3°C zimą. Niemniej jednak Wawer (1997) i Kłysik (1998b) zauważyli, że pomimo iż warunki meteorologiczne sprzyjające powstaniu UHI częściej występują latem, to ekstremalne wartości jej intensywności przekraczające 10°C występują częściej zimą w wyniku adwekcji mroźnego, arktycznego powietrza nad nagrzane miasto. W Polsce największy kontrast termiczny między centrum miasta a jego obszarami peryferyjnymi, wyniósł prawie 12°C w Łodzi (Kłysik, 1998b) oraz 12,2°C w Warszawie (Kuchcik i in., 2024).

Pionowy zasięg UHI również był przedmiotem wielu badań, szczególnie w aglomeracji krakowskiej. Badania przeprowadzone przez Lewińską (1984) wykazały, że pionowy zasięg UHI sięgał od 100 do 200 metrów w sezonie chłodnym, a w sezonie ciepłym sięgał powyżej 200m. Według Walczewskiego (2005) wysokość, do której obserwowano odziaływanie UHI, była jednak zdecydowanie większa i wynosiła od 800 do 1000 metrów w ciągu dnia oraz od 300 do 400 metrów w ciągu nocy latem. Natomiast zimą, pionowy zasięg warstwy mieszania w Krakowie wynosił od 300 do 600 metrów.

We Wrocławiu wykorzystując wyniki mobilnych pomiarów meteorologicznych, stworzono model rozkładu temperatury na podstawie, którego określono strukturę przestrzenną UHI. Badania te wykazały, że wrocławska UHI charakteryzuje się strukturą wielokomórkową i wyraźnie odzwierciedla sposób zagospodarowania terenu (Szymanowski, 2003). Z kolei Kuchcik i Milewski (2016) wykazali, że w Warszawie natężenie UHI malało wraz z odległością od centrum miasta, a UHI zaznaczała się w odległości do około 13 kilometrów od wspomnianego centrum (Kuchcik i Milewski, 2016). W miarę rozwoju technologii, dostępu do danych satelitarnych oraz narzędzi systemów informacji geograficznej (GIS) pojawiły się prace wykorzystujące teledetekcję do szacowania temperatury powietrza w przyziemnej warstwy atmosfery, a tym samym do analiz przestrzennych UHI (Szymanowski i Kryza, 2011; Majkowska-Justowiak, 2018). Szymanowski i Kryza (2011) ocenili, że niezależnie od pory roku, czynnikami najsilniej wpływającymi na temperaturę powietrza było albedo, szorstkość podłoża, współczynnik widoczności nieba oraz dzienna suma natężenia promieniowania. Z kolei Majkowska-Justowiak (2018) wyznaczyła zasięg UHI w Poznaniu, która (UHI) obejmowała około 12% powierzchni miasta. Dodatkowo autorka oceniła, że najwyższą temperaturą gruntu charakteryzowały się obszary przemysłowe i handlowe.

Mieszkańcy obszarów silnie zurbanizowanych są narażeni na większy stres termiczny ze względu na charakter zabudowy tych obszarów sprzyjający intensyfikacji UHI (Okoniewska, 2020). Badania pokazują, że w polskich miastach podczas upałów łącznie umiera około 173 osób, z czego średnio notuje się od 3 do 6 przypadków w mniejszych miastach (Olsztyn, Zielona Góra, Toruń, Rzeszów, Białystok), i od 28 (Łódź) do 48 (Warszawa) przypadków w dużych miastach takich jak Warszawa (Błażejczyk i in., 2018). Najbardziej obciążające warunki biotermiczne spośród wielu analizowanych miast wystąpiły w Krakowie. Położenie krakowskiej stacji pomiarowej w centrum zabudowy miejskiej miało determinujący wpływ na uzyskane wyniki (Okoniewska, 2020). UHI ma także istotny wpływ na środowisko przyrodnicze w miastach, prowadząc do zmian lokalnego mikroklimatu. W 2018 roku opublikowano wyniki badań nad UHI w Lublinie. Wykazano, że bogactwo gatunków, szczególnie udział terofitów, gatunków obcych, termofilnych i heliofilnych, zmniejszało się wraz z odległością od centrum miasta (Rysiak i Czarnecka, 2018).

Zjawisko UHI zostało szczegółowo scharakteryzowane w Łodzi (Fortuniak, 2003), Wrocławiu (Szymanowski, 2004) oraz Warszawie (Błażejczyk i in., 2014). Autorzy w swoich szeroko zakrojonych badaniach nad UHI opublikowanych w formie monografii omówili specyfikę UHI w poszczególnych miastach oraz włączyli wiele podstawowych informacji teoretycznych na temat zjawiska miejskiej wyspy ciepła.

Wykorzystanie danych satelitarnych w badaniach dotyczących UHI jest powszechne w skali światowej, jednak w Polsce badania nad SUHI na podstawie zdjęć satelitarnych podejmowane były rzadziej. Pierwsza praca dotyczącą warszawskiej SUHI, opracowana przez Kraujalisa, powstała już w latach 70 XX wieku (Fortuniak, 2019). W większości tego typu badań korzystano z danych satelitarnych Landsat (Osińska-Skotak i Madany 1998; Jędruszkiewicz and Zieliński, 2012; Walawender i in. 2014; Majkowska i in., 2017; Nadudvari, 2021; Matuszek i in., 2024; Jarzyna, 2024), lub danych rejestrowanych przez czujnik MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) satelity Terra i Aqua (Gawuć, 2014; Gawuć i Strużewska, 2016; Gawuć i in., 2020), czujnik ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) satelity Terra (Nadudvari, 2021) oraz czujnik AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) satelity NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (Hajto, 2009; Hajto i in., 2013).

Wyniki badań Osińskiej-Skotak i Madany (1998) wykazały, że tylko w jednym z trzech analizowanych dni, tj. 15 lipca 1987 roku, zaobserwowano dobrze wykształconą SUHI w związku z opadem, który wystąpił w dniu poprzedzającym rejestrację obrazu. Ponadto, autorki podkreślały, że wykorzystanie danych satelitarnych stanowi skuteczne rozwiązanie w identyfikacji SUHI. Badania przeprowadzone w kolejnych latach pozwoliły na określenie zasięgu stref ciepła i stref chłodu w Łodzi (Jędruszkiewicz and Zieliński, 2012) oraz w Poznaniu (Majkowska i in., 2017). W obu tych miastach zidentyfikowano strefy wysp ciepła w obszarach o gęstej zabudowie, oraz na terenach przemysłowych i handlowych. Z kolei lasy i parki miejskie parki pełniły rolę stref chłodu. Podobną konfigurację przestrzenną SUHI zaobserwowano także w Krakowie (Walawender i in., 2014), górnośląskiej aglomeracji (Nadudvari i in., 2021) oraz Kielcach (Jarzyna, 2024). W Krakowie wyznaczono stabilne strefy ciepła i chłodu, które występowały od marca do sierpnia i obejmowały odpowiednio 2,6% i 3,2% powierzchni miasta w latach 2000 – 2001 (Walawender i in., 2014). Natomiast, SHI w Kielcach, badana w latach 2015 - 2019 (czerwiec-sierpień), obejmowała od 34% do 70% powierzchni miasta (Jerzyna, 2024). Najnowsze podejście do określenia zasięgu SUHI w powiecie poznańskim polegało na identyfikacji obszarów, które nie tylko stanowiły SUHI w danym dniu, ale były również stałymi obszarami SUHI na więcej niż jednym obrazie satelitarnym zarejestrowanym w latach 2019 – 2022 (Matuszek i in., 2024). Wyniki wykazały, że SUHI, zaobserwowana na podstawie pojedynczego obrazu satelitarnego, obejmowała prawie 17% powierzchni powiatu poznańskiego oraz 14% powierzchni miasta Poznań. Z kolei SUHI, która pojawiła się w tych samych obszarach na więcej niż czterech obrazach satelitarnych, stanowiła około 0,5% powierzchni powiatu poznańskiego i 2% powierzchni miasta Poznań.

Intensywność SUHI w Krakowie została zbadana na podstawie 63 obrazów satelitarnych z lat 2004–2005, reprezentujących każdy z sezonów (Hajto, 2009). Najwyższa intensywność krakowskiej SUHI analizowana jako różnica LST między obszarem miejskim a pozamiejskim, wynosiła od 4°C do 12°C w ciągu dnia w sezonie wegetacyjnym. W godzinach późnopopołudniowych i nocnych intensywność SUHI wynosiła średnio 6 – 7°C (Hajto, 2009, Hajto i in., 2013). Gawuć (2014) porównał intensywności SUHI w trzech polskich miastach - Krakowie, Warszawie i Wrocławiu, w dniach 5 sierpnia 2012 roku (godzina 22:20) oraz 8 sierpnia 2013 roku (godzina 11:40). W zależności od zastosowanego wskaźnika uzyskał różne rezultaty na temat intensywności SUHI. Różnica miedzy maksymalną temperaturą wewnątrz miasta a minimalną temperaturą poza miastem (intensywność SUHI), była najwyższa w porze nocnej w Krakowie (8,5°C), a w porze dziennej w Warszawie (14,6 °C) (Gawuć, 2014). Sytuacja uległa zmianie gdy intensywność zmierzono jako różnica miedzy średnią LST wewnątrz miasta a obszarem pozamiejskim. Wówczas okazało się, że nocna SUHI była intensywniejsza w Warszawie (2,1°C), zaś dzienna w Krakowie (2,4°C) (Gawuć, 2014). Ponadto, w Warszawie oszacowano średnią intensywność SUHI rzędu co najmniej 1°C w okresie 2000-2014 (Gawuć i Strużewska, 2016) oraz 2008-2017 (Gawuć i in., 2020). Intensywność dziennej SUHI w Poznaniu określonej na podstawie różnicy średniej LST w obszarach najcieplejszych (zabudowa miejska zwarta) oraz najchłodniejszych (lasy liściaste) wyniosła 6,5°C (Majkowska i in., 2017). Na podstawie czterech miast należących do konurbacji górnośląskiej (Katowice, Sosnowiec, Gliwice, Bytom) wykazano, że intensywność SUHI istotnie wzrastała gdy temperatura powietrza przekraczała 31°C, a także że jej intensywność zależała głównie od zróżnicowanych sezonowo warunków meteorologicznych (Nadudvari, 2021).

1.3.2. Powierzchniowa wyspa chłodu

Problematyka miejskiej wyspy chłodu (SCI), w porównaniu do SUHI, podejmowana była stosunkowo rzadko. Wyjątkiem są badania dotyczące miast półpustynnych, gdzie SCI identyfikowana jest w centrum miasta ze względu na pustynny charakter otoczenia (Rasul i in., 2015; Mirzaei i in., 2020). Istniejące badania odnoszące się do SCI jako strefy chłodu występującej poza miastem często ograniczały się do identyfikacji stref chłodu, bez przedstawienia ich wielkości czy kompozycji (Jędruszkiewicz i Zieliński, 2012; Alexander, 2020). W ostatnich latach w związku z nasilającym się globalnym ocieplenie zainteresowanie naukowców kwestiami identyfikacji wysp chłodu wzrosło, ponieważ stanowią one istotny element przeciwdziałania negatywnym skutkom wzrostu temperatur w miastach (Qiu i in., 2023; Liu i in., 2024; Rezaei i in., 2024). Zmaksymalizowanie efektywności chłodzącej stref chłodu jest możliwe dzięki odpowiedniej konfiguracji rodzaju i wysokości roślinności (Yu i in., 2018; Rakoto i in., 2021). Ponadto Vatani i in. (2019) stwierdzili, że lasy liściaste wykazują lepszą efektywność chłodzenia w porównaniu do lasów iglastych w przypadku strefy umiarkowanej co powinno być uwzględniane w planach zarządzania lasem. W Chinach udowodniono, że intensywność efektu chłodzącego wyspy chłodu zależy od gatunku drzew i waha się od 5,05 °C do 16,12 °C (Wang i in., 2023). Ponadto stwierdzono, że tworzenie sieci korytarzy między poszczególnymi wyspami chłodu zapobiega ich fragmentacji i zapewnia miastu większą wydajność chłodzenia (Qiu i in., 2023).

31

2. Obszar badań

Górnośląsko–Zagłębiowska Metropolia (GZM) zlokalizowana jest w południowej części Polski, w środkowej części województwa śląskiego (Ryc. 1). Zajmuje powierzchnię 2 533 km², co stanowi ok. 21% powierzchni całego województwa. GZM powstała w 2017 roku. Jednak już od drugiej połowy XX wieku gminy należące do metropolii w większości funkcjonowały jako policentryczna konurbacja katowicka, składająca się z bezpośrednio graniczących ze sobą miast o zbliżonym potencjale demograficznym i funkcjonalnym (Krzysztofik, 2014). Metropolia składa się z 41 gmin, spośród których, 26 to gminy o charakterze miejskim, 13 to gminy o charakterze pozamiejskim, oraz 2 gminy o charakterze miejskim.



Rycina 1. Rodzaj gmin (A) oraz ukształtowanie terenu (B) Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (GZM) na tle województwa śląskiego i Polski

GZM zaliczana jest do grupy największych aglomeracji policentrycznych w Europie (Nadudvari, 2021) licząc 2 128 061 mieszkańców. Gęstość zaludnienia GZM jest jedną z najwyższych w kraju i wynosi 833 osób na km² (stan na 31.12.2023, GUS). Ponadto, GZM jest obszarem metropolitarnym o największym w Polsce, zaraz po Warszawie, potencjale gospodarczym, niezależnie od analizowanego wskaźnika. Produkt krajowy brutto (PKB) generowany przez GZM wskazuje, że region ten stale rozwija się gospodarczo, pomimo stale malejącego potencjału demograficznego (Gwozsdz i in., 2022).

Środkowa część tworząca rdzeń GZM charakteryzuje się, niezmiennie od lat dziewięćdziesiątych, dużą powierzchnią terenów nieprzepuszczalnych (Ryc. 1). Jednocześnie powierzchnia terenów roślinnych i wodnych jest niewielka. Rdzeń GZM tworzy gęsta zabudowa mieszkaniowa i przemysłowa, a także charakterystyczne dla tego regionu formy terenu, takie jak hałdy. Struktura urbanistyczna GZM różni się od innych monocentrycznych miast Polski takich jak np. Warszawa z uwagi na jej policentryczny charakter. Według klasyfikacji CORINE Land Cover tereny antropogeniczne stanowiły 30,6% powierzchni GZM w 2018 roku. Pozostałe formy pokrycia terenu jak tereny rolne, powierzchnie leśne i roślinne oraz zbiorniki wodne zajmowały odpowiednio 39,1%, 30,4% i 1,7% obszaru GZM. Teren GZM wznosi się od 186,7 m n.p.m. w zachodniej jego części zlokalizowanej w dolinie rzeki Kłodnica do 395,7 m n.p.m. w północno wschodniej części metropolii. Według klasyfikacji Koppen-Geigera, GZM leży w strefie klimatu wilgotnego kontynentalnego z łagodnym latem i opadami występującymi przez cały rok. Średnia roczna temperatura powietrza na stacji Katowice - Muchowiec wyniosła 9,0°C w okresie 1991 – 2020 i wzrosła o 1,1°C w stosunku do temperatury w poprzednim okresie standardowym 1961 – 1990. Roczna suma opadów wynosi 723,2 mm. Średnia liczba dni pochmurnych to prawie 140 dni (1991 – 2020) (https://klimat.imgw.pl/pl/climate-normals/TSR_AVE).

3. Dane i źródła danych

3.1. Dane satelitarne

Podstawowym rodzajem danych wykorzystywanych w niniejszej rozprawie doktorskiej są obrazy satelitarne LANDSAT. Z pośród zebranych 150 obrazów satelitarnych zaledwie połowa została wykorzystana w badaniach ze względu na duży stopień zachmurzenia w obrębie GZM, uniemożliwiający oszacowanie LST. Analizie poddano takie obrazy satelitarne, na których zachmurzenie zakrywało mniej niż 5% powierzchni badanego terenu. Obszar pokryty chmurami poddano maskowaniu, czyli usunięto zachmurzenie. W publikacji nr 1 wykorzystano 4 obrazy satelitarne LANDSAT 8 (Collection 1 Level-1) zarejestrowane w sezonie letnim (czerwiec - lipiec) w okresie pomiędzy 2013 a 2019. Jeden z wybranych obrazów posiadał zachmurzenie, które poddano maskowaniu. Wykorzystano także jeden obraz zarejestrowany w trakcie trwania fali upałów (29 lipca 2013). W publikacji nr 2 wykorzystano 21 obrazów satelitarnych LANDSAT 4-5, 7 i 8 (Collection 1 Level-1 oraz Collection 2 Level-2) zarejestrowanych w sezonie letnim w okresie od 1986 do 2021 roku. Wykorzystano osiem obrazów z zachmurzeniem, które poddano maskowaniu oraz trzy obrazy zarejestrowane w trakcie trwania fal upałów (28 sierpnia 1992, 25 lipca 1994, 29 lipca 2013). W publikacji nr 3 wykorzystano wszystkie niezachmurzone obrazy satelitarne zarejestrowane w okresie pomiędzy 1985 a 2022, tj. 54 obrazy satelitarne LANDSAT 4-5, 7 i 8 (Collection 2 Level-2) z czego sześć obrazów było zarejestrowanych zimą (grudzień – luty), dziewiętnaście wiosną (marzec – maj), czternaście latem (czerwiec – sierpień) oraz piętnaście jesienią (wrzesień - listopad). Trzy obrazy zostały zarejestrowane w trakcie trwania fal upałów (28 sierpnia 1992, 25 lipca 1994, 29 lipca 2013). Lista obrazów satelitarnych wykorzystanych w publikacji nr 2 i 3 wraz z opisem warunków meteorologicznych panujących bezpośrednio przed ich rejestracją (9 UTC) na stacji Katowice Muchowiec znajdują się w aneksach dołączonych do tychże publikacji (ang. Appendix A). W przypadku danych satelitarnych wykorzystałam dwa rodzaje produktów tj. Collection 1 Level-1 oraz Collection 2 Level-2. Dane z Collection 1 Level-1 wymagają dodatkowego opracowania przed przystąpieniem do właściwej analizy, czyli zastosowania korekcji atmosferycznej, oszacowania emisyjności różnych powierzchni gruntu, oraz oszacowania LST. Dane z Collection 2 Level-2 są gotowymi do wykorzystania produktami naukowymi opracowanymi przez NASA i USGS (Crawford

i in., 2023). Dane Collection 2 Level-2 nie były dostępne na etapie przygotowywania przez mnie publikacji nr 1.

Landsat 4-5, Landsat 7 oraz Landsat 8 zostały umieszczone na orbicie heliosynchronicznej odpowiednio w 1982, 1999 oraz 2013 roku prze NASA i United States Geological Survey (USGS). Wszystkie misje Landsat charakteryzują się 30 metrową rozdzielczością przestrzenną kanałów spektralnych z zakresu światła widzialnego, podczerwieni i średniej podczerwieni (Tabela 1). Kanały panchromatyczne obecne w czujnikach Landsat 7 i 8 posiadają rozdzielczość przestrzenną równą 15 m. Obrazy rejestrowane przez kanały termalne mieszczą się w rozdzielczości przestrzennej od 60 do 120 m, jednakże poddawane są procesowi zwiększenia rozdzielczości przestrzennej i dostarczane są użytkownikom obrazy o 30 metrowej rozdzielczości przestrzennej, aby zachować kompatybilność z pozostałymi kanałami spektralnymi (USGS, 2024). Czas rewizyty wynosi 16 dni, a przejście przez równik przypada na godzinę ok. 10 UTC (+/- 15 minut). Satelity rejestrują powierzchnie ziemi w systemie Worldwide Reference System (WRS), który polega na rejestracji i gromadzeniu danych według ścieżek i rzędów (Path and Row) (EROS 2017; USGS, 2019; USGS 2024). Przybliżony rozmiar sceny Landsat to 170 na 183 km dzięki czemu obszar GZM był obejmowany w całości przez scenę o numerze ścieżki 189 i numerze rzędu 25. Wszystkie obrazy można pozyskać za pomoca przeglądarki EarthExplorer (https://earthexplorer.usgs.gov/), która jest obsługiwana prze USGS.

Zalety i ograniczenia danych Landsat

Aby zapewnić jak największą spójność przeprowadzonych przez mnie badań w ramach projektu doktorskiego zdecydowałam się wykorzystać jednorodne dane satelitarne. Zaletą misji Landsat, która między innymi zdecydowała o jego wyborze jest bardzo dobra rozdzielczość przestrzenna dla kanałów termalnych, która jest niezwykle istotna dla badań uwzględniających strukturę urbanistyczną miasta. Po drugie, Landsat dostarcza nieprzerwanych danych dla kanałów termalnych już od 1984 roku co jest istotne dla analizy wieloletniej zmienności SUHI, która była celem artykułu nr 2 rozprawy doktorskiej. Jednym z założeń misji Landsat jest harmonizacja parametrów technicznych (orbita, czas rewizyty, kalibracja, zakresu geometrii pozyskiwania zobrazowań oraz właściwości spektralnych) dla każdego kolejnego satelity. Zapewnia to niewielkie różnice w zakresie obrazowania powierzchni Ziemi pomiędzy poszczególnymi satelitami

umożliwiając kontynuowanie monitoringu środowiska na podstawie tych samych danych (Landsat Science Team, 2014). Dane satelitarne Landsat posiadają także pewne ograniczenia, w tym słabą rozdzielczość czasową wykonywania zobrazowań. W badaniach nad SUHI użyteczne są obrazy satelitarne nie posiadające zachmurzenia, ponieważ chmury uniemożliwiają pozyskanie informacji na temat gruntu, który przesłaniają. Biorąc pod uwagę fakt, że zachmurzenie w Polsce występuje przez około 70% roku (Sypniewska i Szyga-Pluta, 2018), a okres rewizyty satelitów Landsat wynosi 16 dni, pozyskanie większej liczby obrazów nadających się do analiz jest niezwykle trudne, szczególnie dla tak dużego obszaru jak GZM. Stąd wynika ograniczona liczba przeanalizowanych obrazów satelitarnych, zwłaszcza w okresie zimowym.

Rodzaj czujnika	Długość fali [µm]	Rozdzielczość przestrzenna [m]	
Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM)			
Kanał 1 – Blue	0.45-0.52	30	
Kanał 2 – Green	0.52-0.60	30	
Kanał 3 – Red	0.63-0.69	30	
Kanał 4 – NIR	0.76-0.90	30	
Kanał 5 – SWIR 1	1.55-1.75	30	
Kanał 6 – Thermal	10.40-12.50	120 (30)*	
Kanał 7 – SWIR 2	2.08-2.35	30	
Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)			
Kanał 1 – Blue	0.45-0.52	30	
Kanał 2 – Green	0.52-0.60	30	
Kanał 3 – Red	0.63-0.69	30	
Kanał 4 – NIR	0.77-0.90	30	
Kanał 5 – SWIR 1	1.55-1.75	30	
Kanał 6 – Thermal	10.40-12.50	60 (30)*	
Kanał 7 – SWIR 2	2.09-2.35	30	
Kanał 8 – Panchromatic	0.52-0.90	15	
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) i Thermal Infrared Sensor (TIRS)			
Kanał 1 – Coastal aerosol	0.43-0.45	30	
Kanał 2 – Blue	0.45-0.51	30	
Kanał 3 – Green	0.53-0.59	30	
Kanał 4 – Red	0.64-0.67	30	
Kanał 5 – NIR	0.85-0.88	30	
Kanał 6 – SWIR 1	1.57-1.65	30	
Kanał 7 – SWIR 2	2.11-2.29	30	
Kanał 8 – Panchromatic	0.50-0.68	15	
Kanał 9 – Cirrus	1.36-1.38	30	
Kanał 10 – TIRS 1	10.6-11.19	100 (30)*	
Kanał 11 – TIRS 2	11 50-12 51	100 (30)*	

Tabela 1. Charakterystyka czujników satelitarnych LANDSAT

Wyjaśnienia: NIR – Near Infrared; SWIR – Shortwave Infrared; TIRS – Thermal Infrared; * kanały spektralne dostarczane do użytkowników w zwiększonej rozdzielczości 30m, więcej informacji na stronie: https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites
3.2. Dane meteorologiczne

Warunki meteorologiczne przyczyniają się do wielkości ciepła gromadzonego lub utraconego przez powierzchnię, co z kolei oddziałuje na wartość LST. W związku z tym w swoich badaniach korzystałam także z danych meteorologicznych, które służyły ocenie i weryfikacji warunków meteorologicznych w dniach pozyskania obrazów satelitarnych, a także w dniach bezpośrednio je poprzedzających. Brano pod uwagę takie elementy meteorologiczne jak temperatura powietrza, ciśnienie atmosferyczne, prędkość i kierunek zachmurzenie ogólne, pokrywa śnieżna oraz opad wiatru, atmosferyczny. Wykorzystałam dane ze stacji synoptycznej Katowice-Muchowiec (N: 50.240622; E: 19.032693), zarządzanej przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB). Najczęściej rozpatrywałam dane z godziny 9:00 i 10:00 UTC, aby uzyskać informacje na temat pogody panującej w trakcie rejestracji obrazów satelitarnych (9:40 UTC). W niektórych przypadkach sprawdzałam również warunki meteorologiczne panujące w czasie trzech dób poprzedzających dzień wykonania zdjęcia przez satelitę. Przykładem takiej sytuacji było wystąpienie opadu, który wpływał na właściwości wilgotnościowe gruntu i w efekcie na LST (publikacja nr 1), lub wystąpienie pokrywy śnieżnej i jej wysokości (publikacja nr 3). Informacje te były kluczowe podczas oceny zmienności zasięgu i intensywności SUHI i SCI w zależności od analizowanego dnia (publikacja nr 1). Ocena warunków meteorologicznych miała także istotne znaczenie przy wyborze obrazów satelitarnych do analizy wieloletniej zmienność SUHI (publikacja nr 2), aby wyeliminować wpływ różnych warunków meteorologicznych na zmiany jej zasięgu i intensywności w czasie.

3.3. Klasyfikacje pokrycia terenu

Sposób zagospodarowania terenu w mieście jest determinującym czynnikiem powstania SUHI (Oke et al., 1982; Xi et al., 2024). Wykorzystanie danych na temat pokrycia terenu było zatem nieodłącznym elementem analiz związanych z wieloaspektową oceną struktury przestrzennej wspominanego zjawiska. We wszystkich artykułach tworzących rozprawę doktorską wykorzystałam klasyfikację pokrycia terenu CORINE Land Cover (CLC). Klasyfikacja CLC uważana jest za jedną z najbardziej spójnych i starannie przygotowanych klasyfikacji w Europie (Reinhart i in., 2021). Kluczową zaletą klasyfikacji CLC jest jej duża szczegółowość, np., uwzględnia ona specyficzne, dla GZM formy terenu jakimi są hałdy. Drugą istotną zaletą jest jej dostępność w niezmiennej

strukturze klas pokrycia terenu od 1990 roku do 2018 roku, co umożliwia monitorowanie zmian w czasie na podstawie niezmieniających się typów pokrycia gruntu.

CORINE Land Cover

W publikacji nr 1 i nr 3 wykorzystałam najnowszą klasyfikacje CLC z 2018 roku. W publikacji nr 2, rozpatrującej także zmiany pokrycia terenu w GZM w okresie 1990-2018, wykorzystałam wszystkie dostępne klasyfikacje CLC pochodzące z 1990 (CLC90), 2000 (CLC00), 2006 (CLC06), 2012 (CLC12), i 2018 (CLC18). Klasyfikacja CLC wyróżnia 44 klasy w obrębie 5 głównych typów pokrycia terenu, takich jak:

- tereny antropogeniczne (11 klas, w tym wszystkie 11 w GZM),
- tereny rolne (11 klas, w tym **5** w GZM),
- lasy i ekosystemy seminaturalne (12 klas, w tym 7 w GZM),
- obszary podmokłe (5 klas, w tym 1 w GZM), oraz
- obszary wodne (5 klas, w tym 1 w GZM).

Minimalna powierzchnia mapowania wynosi 25 ha dla zjawisk powierzchniowych i 100 m dla zjawisk liniowych, natomiast ogólna dokładność geometryczna klasyfikacji wynosi co najmniej 100 m. Klasyfikacje CLC zostały wykonane na podstawie map topograficznych oraz różnych danych satelitarnych (CLC1990: Landsat 4-5; CLC2000: Landsat 7; CLC2006: SPOT4/5, IRS P6 LISS III; CLC2012: IRS P6 LISS III, RapidEye; CLC2018: Sentinel-2, Landsat 8). Prace nad pierwszą klasyfikacją CLC były prowadzone w latach 1986-1998 dla roku referencyjnego 1990. Każda następna klasyfikacja powstała dla kolejnych lat referencyjnych realizowanych w okresie +/- jeden rok w odniesieniu do roku referencyjnego (np. CLC 2000 realizowany był w latach 1999-2001). Klasyfikacja CLC została opracowana w ramach europejskiego programu monitorowania Ziemi Copernicus Land Monitoring koordynowanego przez Europejską Agencję Środowiska (EEA). Dane są dostępne do Copernicus Land Monitoring (CLMS) pobrania na stronie Service https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=download (EEA, 2017).

W badanym okresie 1990 – 2018 zidentyfikowałam 25 klas pokrycia terenu w GZM, według wszystkich dostępnych klasyfikacji CLC. Kilka klas zidentyfikowano tylko w niektórych z rozpatrywanych lat, w tym klasa 331 – *plaże, wydmy, piaski,*

występująca jedynie w 2018 roku, klasa 334 - pogorzeliska oraz klasa 411 - bagnaśródlądowe, która występowała tylko w 1990 roku. Wynikało to ze zmian zagospodarowania terenu w tym czasie w GZM. Klasy stanowiące mniej niż 0,1% powierzchni GZM, zostały wykluczone z badań z powodu ich marginalnego znaczenia. Wśród nich znalazły się wspomniane wcześniej klasy 331, 334 oraz 411 oraz klasa 222 – sady i plantacje, która pojawiała się we wszystkich dostępnych klasyfikacjach CLC. W związku z powyższym, ostatecznie w badaniach uwzględniłam 21 klas pokrycia terenu, które występowały w całym analizowanym okresie badawczym 1990 – 2018. Lista wszystkich klas wraz z informacją o ich modyfikacji, wykonanej na potrzeby publikacji nr 2, znajduje się w aneksie dołączonym do wspomnianej publikacji (*ang. Appendix B*).

Local Climate Zone

LCZ jest najpowszechniej stosowaną na świecie klasyfikacją pokrycia terenu w badaniach dotyczących UHI, o czym wspominano w sekcji opisującej stan dotychczasowych badań. Biorąc pod uwagę ten fakt, w artykule nr 3 również uwzględniłam tę klasyfikację głównie w celu porównania uzyskanych wyników z badaniami wykonanymi na podstawie klasyfikacji CLC wypełniając w ten sposób lukę w literaturze przedmiotu.

Klasyfikacja LCZ wyróżnia 17 klas pokrycia terenu, z pośród których 10 klas wyróżniono na podstawie rodzaju zabudowy (LCZ1 – *Compact high-rise*; LCZ2 – *Compact midrise*; LCZ3 – *Compact high-rise*; LCZ4 – *Open high-rise*; LCZ5 – *Open midrise*; LCZ6 – *Open low-rise*; LCZ7 – *Lightweight low-rise*; LCZ8 – *Large low-rise*; LCZ9 – *Sparsely built*; LCZ10 – *Heavy industry*), a pozostałe 7 klas wydzielono pod względem pokrycia terenu (LCZA – *Dense trees*; LCZB – *Scattered trees*; LCZC – *Bush, scrub*; LCZD – *Low plants*; LCZE – *Bare rock or paved*; LCZF – *Bare soil or sand*; LCZG – *Water*). Nazwy poszczególnych klas podane są w języku angielskim, ponieważ nie posiadają one polskich odpowiedników. Klasy wydzielone są w oparciu o najważniejsze parametry struktury i pokrycia gruntu takie jak poziom jego uszczelnienia czy gęstość i wysokość budynków oraz drzew. Dodatkowo, w klasyfikacji uwzględnione są także materiały, z których zbudowane są powierzchnie oraz emisja ciepła antropogenicznego (Stewart i Oke, 2012).

LCZ można wygenerować dla dowolnego miejsca na świecie za pomocą generatora LCZ (https://lcz-generator.rub.de/submissions) opracowanego przez Demuzere i in. (2021). Warto dodać, że wszystkie klasyfikacje wygenerowane przez użytkowników są dostępne i możliwe do pobrania, wraz z oceną ich dokładności. Rozmieszczenie LCZ w GZM zostało stworzone dla roku referencyjnego 2018, w oparciu o pola treningowe stworzone w aplikacji Google Earth, na podstawie obrazu satelitarnego z dnia 06.06.2018 roku (Renc, 2023). W publikacji nr 3 wykorzystano LCZ o dokładności równej 0,84 i rozdzielczości przestrzennej 100 m. W GZM zidentyfikowano 11 z 17 klas LCZ. Klasy, których nie udało się wyróżnić, to LCZ1, 3, 4, 7, 10 oraz LCZC. Klasa LCZ10 realnie występuje w GZM, ale podczas próby jej wyodrębnienia generator mylił tę klasę zabudowy z klasą LCZ8 tj. Large lowrise, co w rezultacie skutkowało dużo niższą ogólną dokładnością wygenerowanej klasyfikacji. W związku z powyższym, zdecydowałam nie wyodrębniać klasy LCZ10, a obszary przemysłowe przez nią reprezentowane zostały włączone do LCZ8, która wyróżnia duże tereny handlowe i magazynowe. W rezultacie, LCZ8 w GZM obejmuje tereny przemysłowo-handlowe w sposób zbliżony do CLC121.

Ograniczenia

Obie klasyfikacje obarczone są pewnymi błędami. W przypadku CLC, niektóre rodzaje pokrycia terenu zostały błędnie sklasyfikowane. Na przykład, zbiorniki wodne interpretowane są jako obszary przemysłowe, a w obrębie obszarów leśnych występują niezidentyfikowane, silnie nagrzane hałdy. W przypadkach, które zostały dostrzeżone, klasyfikacja została poddana ręcznej korekcie, aby uzyskać jak najbardziej wiarygodne wyniki. Należy jednak pamiętać, że powierzchnia terenu pomiędzy tworzeniem kolejnych klasyfikacji ulega ciągłym zmianom. W związku z tym, obszary, które w 2012 roku były pokryte powierzchniami rolnymi, w 2018 roku mogły mieć inne przeznaczenie, co może generować błędy, których należy być świadomym. Klasyfikacja LCZ tworzona w oparciu o dedykowane ku temu narzędzie również czasem błędnie interpretuje niektóre klasy pokrycia terenu na podstawie indywidulanie przygotowanych pól treningowych. Dodatkowo, identyfikacja typów pokrycia w obrębie terenów rolnych i terenów leśnych jest bardzo ogólna. Wynika to z faktu, iż LCZ zostało opracowane w celu, wyodrębnienia różnych form miejskich terenów zabudowanych.

3.4. Dane demograficzne

Dane demograficzne, czyli liczba mieszkańców i gęstość zaludnienia każdej gminy w GZM zostały wykorzystane tylko w publikacji nr 2 w celu oszacowania wpływu tych wskaźników demograficznych na wzrost LST oraz odsetek powierzchni SUHI w gminach. Dane demograficzne obejmowały okres od 1995 do 2020 roku. Są one dostępne dla wszystkich użytkowników na stronie https://bdl.stat.gov.pl/bdl/start.

4. Metody badań

4.1. Metody wyznaczania temperatury powierzchni czynnej

Podstawą wszystkich artykułów wchodzących w skład niniejszej rozprawy doktorskiej były obrazy satelitarne Landsat na podstawie, których oszacowano rozkład LST. Jak wspomniano w rozdziale *Dane i źródła danych: Dane Satelitarne*, do tego celu wykorzystałam dwa rodzaje produktów. W publikacji nr 1 i nr 2 były to produkty satelitarne Landsat Collection 1 Level-1, natomiast w publikacji nr 3 wykorzystałam produkty satelitarne Landsat Collection 2 Level-2, które zawierają gotowe do analiz produkty LST.

Do oszacowania LST niezbędne są obrazy zarejestrowane w podczerwieni termalnej tj. kanale spektralnym 10 i 11 dla Landsat 8 oraz kanale 6 dla Landsat 4-5 oraz 7. Wspomniane kanały termalne w produktach Landsat Collection 1 Level-1 przedstawiają zakodowaną w postaci wartości jasności pikseli obrazu (ang. digital number) radiancję. Aby otrzymać obraz przedstawiający radiancję spektralną (ang. spectral radiance) należy przetworzyć obraz przedstawiający wartość jasności pikseli za pomocą odpowiedniego algorytmu oraz współczynników przeliczeniowych zawartych w metadanych każdego obrazu satelitarnego (USGS, 2019). Następnie, na podstawie uzyskanej radiancji spektralnej obliczyłam wartość temperatury radiacyjnej (ang. brightness temperature), stosując dedykowany dla czujników Landsat algorytm opisujący prawo Plancka (Weng i in., 2004; Barsi i in., 2005). Algorytm ten nie uwzględnia jednak korekcji atmosferycznej, która eliminuje wpływ atmosfery na rejestrowane przez czujnik satelity promieniowanie podczerwone. Aby dokładnie oszacować LST konieczne jest przeprowadzenie korekcji atmosferycznej (Barsi i in., 2005; Renard i in., 2019). W związku z powyższym, w badaniach wykorzystałam oprogramowanie PCI Geomatica z dodatkowym modułem obejmującym korekcję

41

atmosferyczną dla kanałów termalnych. Dzięki temu otrzymałam obrazy satelitarne przedstawiające temperaturę radiacyjną uwzględniającą korektę atmosferyczną. W przypadku danych Landsat 8 korzystałam wyłącznie z kanału 10, ponieważ ze względu na dużą niepewność kalibracji kanału 11, USGS rekomenduje używanie wyłącznie kanału 10 do oszacowania LST (USGS, 2019).

Aby otrzymać finalny obraz prezentujący LST, w kolejnym etapie procesu przetwarzania obrazów satelitarnych przeprowadziłam korektę emisyjności między różnymi typami pokrycia gruntu. Pominięcie tego kroku może generować duże błędy podczas obliczania rzeczywistej LST (Stathopoulou i Cartalis, 2007). Istnieje wiele metod obliczenia współczynnika emisyjności, w tym metoda szacowania za pomocą progów znormalizowanego różnicowego wskaźnika roślinności (NDVI) (ang. Normalized Difference Vegetation Index Thresholds Method) autorstwa Sobrino i Raissouni (2000). Wybrałam ją, ponieważ metoda ta generuje niewielki błąd pomiędzy wartościami szacunkowymi a pomiarowymi rzędu 1% (Sobrino i in., 2008). Metoda progów NDVI polega na oszacowaniu emisyjności za pomocą algorytmu zaproponowanego przez Sobrino i Raissouni (2000) tylko dla powierzchni miejskich, czyli takich, których piksele przyjmują wartość NDVI od 0,2 do 0,5. Według autorów, piksele w obrębie obszaru miejskiego klasyfikowane są jako tzw. piksele mieszane, tworzące mozaikę powierzchni sztucznych i roślinnych. Z przeprowadzonych przeze mnie badań wynika, że 70% pikseli znajdujących się w obrębie granic terenów miejskich GZM przyjmuje wartości NDVI z przedziału (NDVI od 0,2 do 0,5) zaproponowanego przez Sobrino i Raissouni (2000) jako powierzchnie miejskie. Obszary miejskie nie są jednorodne, dlatego przypisanie im wartości emisyjności według tego kryterium jest rozsądne. Kolejnym krokiem w ostatecznym oszacowaniu emisyjności metodą progów NDVI jest przypisanie odpowiedniej wartości emisyjności (0,96 lub 0,99) powierzchnią, których piksele przyjmują wartość NDVI z następujących przedziałów: NDVI <0 (0.99), NDVI = 0 - 0.2 (0.96), NDVI>0.5 (0.99). Metoda progów NDVI jest powszechnie stosowania w szacowaniu emisyjności różnych powierzchni (Walawender i in., 2011; Avdan i Jovanovska 2016; Guha i in., 2018; Roy i in., 2020). Ostatecznie, wykorzystując zależność pomiędzy emisyjnością, temperaturą kinetyczną i temperaturą radiacyjną (Artis i Carnahan, 1982) oszacowałam LST wyrażoną w stopniach Celsjusza. Całą procedurę uzyskiwania LST opisałam szczegółowo w publikacjach nr 1 i nr 2.

Z uwagi na brak sieci stacji meteorologicznych w GZM, walidacja w oparciu o dane instrumentalne nie została przeprowadzona. Jednakże, istnieje wiele prac potwierdzających wysoką efektywność zastosowanej metody obliczania LST. Tardy i in. (2016), wykonując walidacje LST uzyskanej z Landsat w oparciu o pomiary temperatury powierzchni *in situ*, wskazali RMSE w zakresie od 1,84 °C do 2,55 °C. Z kolei, Duan i in. (2021) stwierdzili, że średnie odchylenie LST zweryfikowane danymi *in situ* mieściło się w zakresie od -1,1 do 1,0 K, przy RMSE między 1,1 a 2,1 K, w zależności od rodzaju powierzchni. Na etapie przygotowywania publikacji nr 2, USGS udostępniło gotowe do analiz dane LST pochodzące z Landsat Collection 2 Level-2. Na ich podstawie przeprowadziłam walidację dla oszacowanych przeze mnie obrazów LST pochodzących z Collection 1 Level-1, stosując metodę piksel do piksela (*ang. pixel by pixel*). RMSE wyniosło od 0,93 do 1,39°C dla wszystkich 21 analizowanych obrazów satelitarnych.

4.2. Zasięg powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i powierzchniowej wyspy chłodu

LST z konkretnego dnia została przez mnie wykorzystana do oszacowania zasięgu SHI i SCI (publikacja nr 1 i nr 2). W publikacji nr 3 oszacowałam średnią sezonową LST, aby uzyskać bardziej reprezentatywny rozkład SHI. W efekcie dla każdego sezonu uzyskałam jeden obraz przedstawiający LST. Średnie sezonowe LST obliczyłam na podstawie 6 obrazów dla zimy (ang. DJF; December, January, Fabruary), 19 obrazów dla wiosny (ang. MAM; March, April, May), 15 obrazów dla lata (ang. JJA; June, July, August), oraz 14 obrazów dla jesieni (ang. SON; September, October, November). Dodatkowo oceniłam stopień reprezentatywności uzyskanych obrazów sezonowej LST stosując współczynnik korelacji Persona. Wartość wszystkich współczynników korelacji były istotne statystycznie co najmniej na poziomie 0,05, i wahały się od 0,49 do 0,71 dla zimy, 0,72 do 0,91 dla wiosny, 0,77 do 0,91 dla lata i 0,44 do 0,91 dla jesieni. Największy zakres zmian wartości współczynnika Persona wystąpił jesienią, ze względu na jeden obraz zarejestrowany w listopadzie, który wyróżniał się znacznie niższą LST od pozostałych zarejestrowanych wczesną jesienią. Wyłączając listopad, jesienią korelacje między średnią LST a LST pojedynczych obrazów wahały się od 0,69 do 0,91. Wartości wspomnianych wskaźników korelacji wraz z statystykami opisowymi LST dla wszystkich badanych obrazów zamieszczone są w aneksie dołączonym do publikacji nr 3 (ang. Appendix A).

Ograniczenia

Zakres czasowy wykorzystanych obrazów w publikacji nr 3 obejmuje lata 1985 – 2022, co może budzić pewne zastrzeżenia, biorąc pod uwagę zmiany zagospodarowania terenu zachodzące w tym czas w GZM. Należy jednak zaznaczyć, że GZM była silnie zurbanizowanym i przekształconym obszarem już w latach 90 tych. Warto w tym miejscu dodać, że zmiany zagospodarowania terenu w GZM (wzrost powierzchni terenów miejskich z 26,9% w 1990 do 30,9% w 2018 roku, zmiana o 4%), które analizowałam w publikacji nr 2 były w tym czasie zauważalny, jednak znacznie mniejszy niż w przypadku innych miast (wzrost o 7% w Grenadzie (Hiszpania) oraz o 13,6% w obszarze metropolitalnym Chattogram (CMA, Bangladesz) w podobnych okresach badawczych). W związku z powyższym zdecydowałam się wykorzystać wszystkie dostępne w tym okresie, niezachmurzone obrazy satelitarne Landsat.

4.3. Wskaźniki zasięgu powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i powierzchniowej wyspy chłodu

W rozdziale *Stan dotychczasowych badań* niniejszej rozprawy doktorskiej, poruszyłam problematykę związaną z różnorodnym definiowaniem zasięgu SUHI. Z tego względu **kluczową była dla mnie decyzja o metodzie wyznaczenia SUHI**, która posłuży jako podstawa do dalszych analiz we wszystkich publikacjach wchodzących w skład tej rozprawy. W związku z powyższym, SUHI została określona na podstawie najczęściej stosowanego w literaturze naukowej kryterium (Ma i in., 2010; Schwarz i in., 2012; Walawender i in., 2011; Ward i in., 2016; Guha i in., 2018; Alexander 2020; Qiu et al., 2023). Próg termiczny niezbędny do wyznaczenia SUHI obliczono na podstawie uśrednionej dla danego obszaru badawczego LST oraz jej odchylenia standardowego (Zhang i Wang, 2008), zgodnie z poniższą formułą:

$$T = \mu + x * \delta$$
, gdzie

T – próg LST dla wystąpienia zjawiska,

- μ średnia LST dla danego obszaru badawczego,
- x wielkość odchylenia standardowego
- δ odchylenie standardowe.

Wskaźnik zaproponowany przez Zhang i Wang (2008) pozwala wyodrębnić najcieplejsze (*Hot Island Area - HIA*) i najchłodniejsze obszary w mieście. Autorzy kryterium wskazują, że wielkość odchylenia standardowego równa +/- 1 jest najbardziej odpowiednia do wyznaczenia zasięgu przestrzennego miejskiej wyspy ciepła i wyspy chłodu. Wartość tę uznali za optymalną, ponieważ piksele spełniające tak określone kryterium w największym stopniu pokrywały się z obszarem miejskim (>80% pikseli).

Zasugerowane przez Zhang'a i Wang'a (2008) kryterium, zdaniem tych autorów najbardziej odpowiednie do wyznaczenia miejskiej wyspy ciepła i miejskiej wyspy chłodu (średnia LST +/-1 odchylenia standardowego) zaadoptowałam w swoich badaniach do wyznaczenia zasięgu powierzchniowej wyspy ciepła (*ang. Surface Heat Island – SHI*) oraz powierzchniowej wyspy chłodu (*ang. Surface Cold Island – SCI*) (Tabela 1). Postanowiłam wyznaczyć także zasięg SCI, ze względu na jej coraz większe znaczenie w adaptacji do zmian klimatu.

Przyjęte przeze mnie i opisane powyżej kryterium nie uwzględnia rodzaju zagospodarowania terenu. W rezultacie wszystkie silnie nagrzane powierzchnie, w tym np. tereny rolne stanowią wyspę ciepła (SHI) a niekoniecznie miejską wyspę ciepła (ang. Surface Urban Heat Island - SUHI). Dlatego, aby wyznaczyć rzeczywisty zasięg SUHI, do terenów miejskich zaliczyłam wszystkie klasy należące do typu pokrycia terenów antropogenicznych klasyfikacji CLC - obszary zabudowy miejskiej, przemysłowe i eksploatacyjne, rekreacyjne, parki leśne oraz hałdy. Włączenie do obszarów miejskich trzech ostatnich z wymienionych klas może wzbudzać dyskusję jednak przyjęłam, że obszar miejski stanowi mozaikę różnych powierzchni, stanowiących integralną całość. Pozostałe typy pokrycia terenu w administracyjnych granicach GZM, tj., tereny rolne, leśne i wodne, uznałam za obszar pozamiejski. Wyznaczenie zasięgu obszarów typowo miejskich pozwoliło na wyeliminowanie z obszaru miasta wyznaczonego granicami administracyjnymi terenów o charakterze pozamiejskim. W ten sposób powstała definicja i wskaźnik Land Cover Limited Surface Urban Heat Island (LCL SUHI) tj. Powierzchniowa Miejska Wyspa Ciepła ograniczona przez pokrycie terenu. Wskaźnik LCL SUHI jest podstawą analiz przeprowadzonych we wszystkich artykułach tworzących moją rozprawę doktorską.

Nazwa wskaźnika	Definicja i pełna nazwa wskaźnika	Kryterium
SHI	Powierzchniowa wyspa ciepła (SHI). Najcieplejszy obszar w mieście o temperaturze	$LST_{SHI} > \mu + 1\delta$
	podłoża powyżej przyjętej progowej LST _{SHI}	μ – średnia LST dla GZM ,
	Wskaźnik wykorzystany w publikaciach pr 1–2 i 3	o – odchylenie standardowe LSI _{SHI} - próg LST do wyznaczenia SHI
SCI	Powierzchniowa wyspa chłodu (SCI).	$LST_{SCI} < \mu - 1\delta$
	Najchłodniejszy obszar w mieście, o temperaturze	1
	podłoża poniżej przyjętej progowej LST _{SCI}	
	Wskaźnik wykorzystany w publikacjach nr 1	
LCL SUHI	Powierzchniowa miejska wyspa ciepła (LCL	$LST_{LCL SUHI} > \mu + 1\delta$
	SUHI) ograniczona przez typ pokrycia terenu.	
	SHI znajdująca się wyłącznie w obrębie obszarów miaiskich	
	obszarów niejskien.	
	Wskaźnik wykorzystany w publikacjach nr 1, 2 i 3	
Silna	Silna powierzchniowa miejska wyspa ciepła	$LST_{Silna \ LCL \ SUHI} > \mu + 2\delta$
LCL SUHI	(strong LCL SUHI) ograniczona przez typ pokrycja terenu Wystenuje wyłacznie w obrebie	
	obszarów miejskich. Zwana dalej silną	
	powierzchniową miejską wyspą ciepła	
	Walasén ila ang dagang sa mah lilasa inah ang 1	
Ekstremalna	Ekstremalna powierzchniowa miejska wyspa	$I ST_{Ekstromoles} \downarrow CL SUM \ge 11 + 3\delta$
LCL SUHI	ciepła (extreme LCL SUHI) ograniczona przez typ	EST Exsuentanta LCL SUPI $\sim \mu + 50$
	pokrycia terenu. Występuje wyłącznie w obrębie	
	obszarów miejskich. Zwana dalej ekstremalną	
	powierzenniówą niejską wyspą ciepia	
	Wskaźnik wykorzystany w publikacjach nr 1	
Permanentna	Permanentna powierzchniowa wyspa ciepła	-
бпі	(SHI) pojawiajaca sie niezmiennie w tych samych	
	miejscach (część wspólna wszystkich	
	analizowanych w publikacji SHI)	
	Wskaźnik wykorzystany w publikacjach nr 1 i 2	
Permanentna	Permanentna powierzchniowa wyspa chłodu	-
SCI	(permanent SCI). Powierzchniowa wyspa chłodu (SCI) pojawiająca się niezmiennie w tych samych	
	miejscach (część wspólna wszystkich	
	analizowanych w publikacji SCI)	
	Wskaźnik wykorzystany w publikaciach nr 1	
SUHI _{WA}	Powierzchniowa wyspa ciepła nieuwzględniająca	$LST_{SUHIWA} > \mu_{WA} + 1\delta_{WA}$
	terenów rolnych (SUHI _{WA}). Definiowana	
	analogicznie jak SHI, ale pomijając obszary rolne.	μ_{WA} – średnia LST dla GZM z
		wyjączenieni ierenow roinycn, Swa – odchylenie standardowe I ST
		dla GZM z wyłaczenie terenów
	Wskaźnik wykorzystany w publikacjach nr 2	rolnych
Pozamiejska	Pozamiejska powierzchniowa wyspa ciepła (non-	$LST_{nonSHI} > \mu + 1\delta$
SHI	urban SHI). SHI występująca wyłącznie w obrębie obszarów pozamiejskich	
	Wskaźnik wykorzystany w publikacjach nr 3	

Tabela 2. Wskaźniki dot. zasięgu wyspy ciepła i wyspy chłodu wykorzystane w poszczególnych publikacjach

Sezonowo	Sezonowo specyficzna miejska powierzchniowa	-
specyficzna	wsypa ciepła (Seasonally specific urban SHI).	
miejska SHI	Miejska SHI występująca tylko i wyłącznie	
_	w jednym sezonie.	
	Wskaźnik wykorzystany w publikacjach nr 3	
Sezonowo	Sezonowo specyficzna pozamiejska	-
specyficzna	powierzchniowa wsypa ciepła (Seasonally specific	
pozamiejska	non-urban SHI). Pozamiejska SHI występująca	
SHI	tylko i wyłącznie w jednym sezonie.	
	Wskaźnik wykorzystany w publikacjach nr 3	
Permanentna	Permanentna miejska powierzchniowa wyspa	-
miejska SHI	ciepła (permanent urban SHI). Permanentna SHI	
-	występująca niezmiennie w tych samych	
	miejscach (część wspólna wszystkich	
	rozpatrywanych urban SHI)	
	Wskaźnik wykorzystany w publikacjach nr 3	
Permanentna	Permanentna pozamiejska powierzchniowa wyspa	-
pozamiejska	ciepła (permanent non-urban SHI). Permanentna	
SHI	pozamiejska SHI występująca niezmiennie w tych	
	samych miejscach (część wspólna wszystkich	
	rozpatrywanych pozamiejskich SHI)	
	Wskaźnik wykorzystany w publikacjach nr 3	

Wyjaśnienia: Land Cover Limited (LCL) - Ograniczone przez pokrycie terenu

W publikacji nr 1 oszacowałam także zasięg przestrzenny silnej i ekstremalnie silnej LCL SUHI (*ang. Strong and Extreme Land Cover Limited Surface Urban Heat Island*). Użyte w tym celu kryteria termiczne zestawiono w Tabeli 3. Zdarzały się przypadki, kiedy tereny rolne miały podobną lub wyższą LST od terenów miejskich, co determinowało bardzo wysoki próg termiczny warunkujący wystąpienie wyspy ciepła, zwłaszcza w sierpniu. Aby określić zasięg miejskiej wyspy ciepła, w którym na próg termiczny warunkujący jej powstanie nie mają wpływu tereny rolne, zdefiniowałam kolejny wskaźnik *Surface urban heat island without agricultural areas (SUHI*_{WA}.), rozpatrywany w publikacji nr 2. W odróżnieniu do pozostałych wskaźników, próg wystąpienia *SUHI*_{WA} został określony na podstawie średniej LST obszaru GZM z wyłączeniem terenów rolnych (Tabela 2). Dla wyjaśnienia, w przypadku omawianego powyżej wskaźnika LCL SUHI, w obliczeniach wartości progowych LST do wyznaczenia wyspy ciepła uwzględniono wszystkie typy gruntów.

Problem wyspy ciepła na terenach pozamiejskich często był pomijany. W związku z tym, w publikacji nr 3, której celem głównym było określenie sezonowych zmian **SHI**, zdecydowałam się zbadać nie tylko miejską SHI (*ang. urban SHI*), ale także pozamiejską SHI (*ang. non-urban SHI*). Dodatkowo, w celu określenia sezonowo pojawiających się

obszarów SHI, wyznaczyłam zasięg sezonowo specyficznej miejskiej i pozamiejskiej SHI (*ang. Seasonal specific urban SHI oraz Seasonal specific non-urban SHI*) (Tabela 2). Ponadto, w każdej z publikacji badałam trwałość występowania SHI poprzez wyznaczenie obszarów zaliczanych do SHI na każdym z rozpatrywanych obrazów satelitarnych, które określono terminem permanentna SHI (*ang. permanent SHI*). W publikacji nr 1 wyznaczyłam także zasięg permanentnej SCI (*ang. permanent SCI*). Z kolei, w publikacji nr 3, permanentną SHI wyznaczyłam oddzielnie dla obszarów miejskich i pozamiejskich (*ang. permanent urban SHI* i *permanent non-urban SHI*) (Tabela 2).

4.4. Wskaźniki intensywności powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła

Najczęściej stosowanym wskaźnikiem intensywności SUHI jest różnica LST pomiędzy obszarami miejskimi i pozamiejskimi. Taki wskaźnik intensywności SUHI (*ang. Surface Heat Island Intensity*) stosowałam w publikacji nr 1. W obrębie terenów pozamiejskich w GZM występują także mocno nagrzane obszary rolne, które znacząco podnoszą średnią LST obszarów pozamiejskich (Goward, 1981). Wśród obszarów miejskich znajdują się powierzchnie naturalne, takie jak parki miejskie, które z kolei obniżają średnią LST dla terenów miejskich (Dousset, 2011). Przytoczone przykłady, pokazują trudność w określeniu intensywności SUHI stosując przedstawione powyżej kryterium (Stewart i in., 2021). W związku z tym, zdecydowano się obliczyć drugi wskaźnik intensywności SUHI (ang. *Land Cover Limited Surface Urban Heat Island Intensity - LCL SUHII*). Wskaźnik ten został zdefiniowany jako różnica LST pomiędzy LCL SUHI a SCI (Tabela 2). Dzięki temu możliwe było obliczenie różnicy LST między najcieplejszymi i najchłodniejszymi obszarami w GZM. Wskaźnik ten został również wykorzystany do oszacowania wieloletniej zmienności intensywności SUHI w publikacji nr 2.

4.5. Reorganizacja klasyfikacji pokrycia terenu CLC

Reorganizacja klasyfikacji CLC dla lat 1990, 2000, 2006, 2012 i 2018 została przeprowadzona i wykorzystana jedynie w publikacji nr 2. Głównym celem tej reorganizacji było uproszczenie klasyfikacji oraz uzyskanie większej spójności właściwości fizycznych wydzielonych form pokrycia terenu. Ponadto, uproszczenie klasyfikacji umożliwiło porównanie uzyskanych wyników badań z wynikami innych badaczy zajmujących się wpływem zmian zagospodarowania terenu na SUHI.

W związku z powyższym tereny antropogeniczne składające się z 11 klas pokrycia terenu podzieliłam na dwa główne typy, mianowicie powierzchnie nieprzepuszczalne (klasy 111, 112, 121, 122, 123, 124 i 142) oraz odkryte grunty przemysłowe lub inne podobne grunty (131, 132 i 133), które nazywane są później odkrytymi gruntami. GZM to obszar poprzemysłowy, na którym występują specyficzne formy terenu, jak kopalnie (klasa 131) i hałdy (klasa 132), często zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie zabudowy miejskiej. Tereny zielone (klasa 141), które stanowią klasę w obrębie terenów antropogenicznych, przeniosłam do grupy terenów leśnych i seminaturalnych klasyfikacji CLC. Tereny te mimo swojego antropogenicznego charakteru (są to głównie parki miejskie) wyróżniają się odmiennymi właściwościami fizycznymi od powierzchni zabudowanych czy odkrytych gruntów, które wpływają na LST. Po wprowadzeniu opisanych powyżej zmian, wyróżniłam pieć głównych typów pokrycia terenu w GZM: powierzchnie nieprzepuszczalne (ang. impervious surfaces), odkryte grunty przemysłowe lub inne podobne grunty (ang. industrial and related bare land), tereny rolne (ang. agricultural areas), tereny roślinne (ang. vegetation areas) oraz obszary wodne (ang. water areas). Tabela przedstawiająca oryginalną klasyfikacje CLC oraz zaproponowaną przez mnie przeorganizowaną klasyfikację CLC znajduje się w aneksie dołączonym do publikacji nr 2 (ang. Appendix B).

4.6. Analizy statystyczne

W każdej publikacji obliczyłam podstawowe statystyki opisowe LST, takie jak wartość minimalna, średnia, odchylenie standardowe oraz wartość maksymalna dla każdego badanego obrazu satelitarnego. W niektórych przypadkach, obliczyłam także wartość kwartyla 1 i 3 (publikacja nr 1 i publikacja nr 3). Podobne statystki zostały obliczone i przedstawione w postaci wykresów pudełkowych dla wszystkich klas pokrycia terenu występujących w GZM oraz dla każdego analizowanego obrazu satelitarnego w publikacji nr 1. W publikacji nr 2 analizowano wyłacznie średnią LST głównych (zmodyfikowanych) typów pokrycia terenu CLC, w kontekście porównania czasowej zmienności tych wartości na podstawie wybranych obrazów satelitarnych.

W publikacji nr 1 zbadano zależności pomiędzy odsetkiem wybranych typów i klas pokrycia terenu klasyfikacji CLC a średnią LST, odsetkiem SHI, SCI, permanent SHI i permanent SCI w każdej gminie GZM, wykorzystując współczynnika korelacji Pearsona oraz analizę regresji. Wybrano główne typy pokrycia terenu, do których należą

tereny antropogeniczne, tereny rolne, lasy i ekosystemy seminaturalne, obszary wodne, a także klasy pokrycia terenu stanowiące największą część SHI i SCI, takie jak zabudowa miejska luźna, tereny przemysłowe i handlowe (badane pod katem zależności z odsetkiem SHI oraz permanent SHI w gminie), lasy iglaste oraz lasy liściaste i mieszane (analizowane pod kątem zależności z odsetkiem SCI i permanent SCI w gminie). W przypadku, gdy dany typ lub klasa pokrycia terenu nie występowały w gminie, korelacje badano dwiema metodami: uwzględniając wszystkie gminy i przypisując wartość 0 jeśli dany typ pokrycia terenu nie występował w gminie; wyłączając gminy, w których dany typ lub klasa pokrycia terenu nie występowały. Sytuacja ta dotyczyła przede wszystkim obszarów wodnych, które występowały jedynie w 26 z 41 gmin GZM, lasów iglastych (obecne w 30 gminach) oraz terenów przemysłowych i handlowych (obecne w 35 gminach). W publikacji nr 2 obliczyłam również współczynnik korelacji Persona pomiędzy liczbą mieszkańców i gęstością zaludnienia a średnią LST i odsetkiem SUHI w gminach GZM. Istotność statystyczną sprawdziłam za pomocą testu t-Studenta przyjmując poziom istotności α<0,05 dla przypadków istotnych.

4.7. Oprogramowanie

Przetwarzanie zdjęć satelitarnych oraz pozostałe analizy przestrzenne wykonałam za pomocą oprogramowania ArcMap 10.7.1 oraz ArcGIS Pro. Wykorzystane oprogramowanie posłużyło m.in. do oszacowania powierzchni różnych form pokrycia terenu w GZM, obliczenia średnich LST dla poszczególnych form pokrycia terenu oraz oceny sprawdzenie rozpatrywanych typów terenów w powierzchni SUHI i SCI. Ponadto, za pomocą PCI Geomatica przeprowadzono korekcję atmosferyczną termalnych obrazów satelitarnych, zapewniającą poprawne oszacowanie LST. Z kolei, analizy statystyczne wykonano w środowisku RStudio.

5. Wyniki i dyskusja

5.1. Publikacja 1: Rozpoznanie struktury letniej powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła i powierzchniowej wyspy chłodu w GZM

Renc, A., Łupikasza, E., Błaszczyk, M., 2022. Spatial structure of the surface heat and cold islands in summer based on Landsat 8 imagery in southern Poland. Ecological Indicators, 142, 109181.

Celem badań realizowanych w publikacji nr 1 było rozpoznanie struktury powierzchniowej wyspy ciepła (SHI), powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (LCL SUHI) oraz powierzchniowej wyspy chłodu (SCI) w sezonie letnim w GZM. W publikacji wyróżniłam również obszary najbardziej predysponowane do wystąpienia najintensywniejszej SUHI.

Rozkład przestrzenny LST

Rozkład przestrzenny LST określono na podstawie czterech obrazów satelitarnych zarejestrowanych w czerwcu i lipcu w latach 2013 – 2019. Najwyższą średnią wartość LST dla GZM, wynoszącą 39,7°C, zanotowano 29 lipca 2013 roku, a najniższą równą 33,5°C, 22 czerwca 2017 roku. Obraz pochodzący z 29 lipca 2013 roku został zarejestrowany w trakcie trwania fali upałów, która spowodowała, że powierzchnia GZM w tym dniu była bardziej nagrzana w porównaniu do pozostałych dni (Rycina 2).



Rycina 2. Rozkład przestrzenny LST w GZM Wyjaśnienia: białe plamy na obrazie z 12 czerwca 2019 roku oznaczają usunięte zachmurzenie

Zależności LST od pokrycia terenu

Rozkład przestrzenny najcieplejszych i najchłodniejszych obszarów pozostawał podobny w każdym z analizowanych dni. Środkowa, najbardziej zurbanizowana część GZM, obejmująca zabudowę miejską, tereny przemysłowe i handlowe, oraz zwałowiska i hałdy koresponduje z występowaniem najwyższych temperatur w tej części GZM. W zależności od analizowanego dnia LST wspomnianych powierzchni wyniosła 43,9°C do 50,0°C w obrębie zabudowy miejskiej, 40,3°C do 46,0°C w obrębie terenów przemysłowych i handlowych, oraz 40,2°C do 45,2°C na terenie zwałowisk i hałd. Najchłodniejsze powierzchnie w GZM związane są z obecnością roślinności, a w szczególności z obecnością zbiorników wodnych, których średnia wartość LST w zależność od dnia wahała się od 27,7°C do 32,9°C. Analogiczne wnioski sformułowali naukowcy analizujący rozkład LST w kontekście zagospodarowania terenu na całym świecie (Li i in., 2014; Geletič i in., 2016; Dushi i Berila 2022), w tym badacze z Krakowa (Walawender i in., 2014) oraz Poznania (Majkowska i in., 2017). Wyniki moich badań pokazują, że charakterystyczne dla GZM hałdy zajmują trzecią pozycję pod względem najbardziej nagrzanych gruntów w przypadku trzech z czterech analizowanych obrazów, co świadczy o ich dużym potencjale w intensyfikowaniu SUHI w GZM. Dodatkowo, wykonałam trzy profile LST, wyznaczone tak aby reprezentowały jak najwięcej typów pokrycie terenu w GZM (Rycina 6, publikacja nr 1). Wyniki te wykazały, że zmienność temperatury w gęstych obszarach leśnych jest niewielka w porównaniu do dużej zmienności obserwowanej na terenach antropogenicznych.

Wyniki korelacji Persona i analiza regresji potwierdziły, że w GZM podobnie jak w wielu innych obszarach powierzchnie sztuczne silnie wpływają na LST (korelacja w zakresie od 0,62 do 0,86). Dziesięcioprocentowy wzrost powierzchni sztucznych powoduje wzrost LST o 0,4 do 0,7°C (Tabela 5 i Rycina 7 w publikacji nr 1). Estoque i in. (2017) podobnie ocenili, że wzrost powierzchni nieprzepuszczalnych w Bangkoku (Tajlandia), Manili (Filipiny) oraz Dżakarcie (Indonezja) przyczynił się do wzrostu LST o 0,4 do 0,6°C. Z kolei Alexander (2020) wykazał, że w Arhus (Dania) 10% wzrost liczby budynków spowodował wzrost LST nawet o 1,3°C. Zbiorniki wodne (korelacja: -0,44 – -0,49 dla gmin, w których wystąpiły zbiorniki wodne) i tereny roślinne (korelacja: -0,38 - -0,67) przyczyniały się do obniżenia LST. Wzrost powierzchni terenów roślinnych wywołuje spadek LST w GZM o 0,2°C do 0,6°C. Uzyskane wyniki dotyczące obecności roślinności w miastach są zgodne z badaniami przeprowadzonymi przez innych naukowców na całym świecie. Niemniej jednak efekt chłodzący roślinności w GZM jest mniejszy niż np. w Arhus (Dania), gdzie ten sam wzrost powierzchni roślinność powodował redukcję LST o 0,9°C (Alexander, 2020), oraz w miastach azjatyckich, gdzie redukcja LST wynosiła od 0,6 do 1,2°C (Estoque i in., 2017).

Zasięg przestrzenny SHI, LCL SUHI oraz SCI

SUHI w środkowej części GZM posiada strukturę archipelagu, co jest wynikiem policentrycznej struktury metropolii. Silnie rozwinięte miasta GZM zlokalizowane w jej północnej i południowej części takie jak Tarnowskie Góry, Siewierz, Tychy czy Knurów tworzą policentryczną SUHI przypominającą archipelag wysp. Policentryczna struktura przestrzenna SUHI skutkuje mniejszą intensywnością w porównaniu do najczęściej występującej wyspy, ponieważ ogniska ciepła są rozpraszane (Han i in., 2022). Podobną, policentryczną strukturę SUHI rozpoznano w kilku miastach amerykańskich (Buyantuyev i Wu, 2009; Shepherd i in., 2013), oraz w Europie, w tym w Arhus (Dania) (Alexander, 2020).



Rycina 3. Rozkład przestrzenny SHI, LCL SUHI oraz SCI Wyjaśnienia: białe plamy na obrazie z 12 czerwca 2019 roku oznaczają usunięte zachmurzenie

SHI, obejmująca wszystkie silnie nagrzane powierzchnie, stanowiła od 15,4% do 16,4% GZM w zależności od dnia (Rycina 3). Zasięg LCL SUHI obejmował od 12,8% do 14,4% powierzchni GZM, co oznacza, że nawet do 2,9% powierzchni metropolii będącej w zasięgu SHI stanowiły silnie nagrzane grunty np. terenów rolnych (kolor fioletowy na rycinie 3). Największy zasięg przestrzenny SHI i LCL SUHI stwierdzono 3 lipca 2015 roku, pomimo iż najwyższa temperatura powietrza wystapiła 29 lipca 2013 roku (fala upałów). Dzień ten (3 lipca 2013 roku) wyróżniał się silną sytuacją antycyklonalną (1027,8 hPa), której warunki meteorologiczne sprzyjają intensyfikacji wyspy ciepła (Oke, 1982; Fortuniak, 2003). Schwarz i in. (2012), stosując to samo kryterium termiczne, zidentyfikowali wyspę ciepła obejmującą 11,2% powierzchni Lipska (Niemcy). Jędruszkiewicz i Zieliński (2012) również posłużyli się tym samym kryterium, analizując strefy gorąca i chłodu w Łodzi. Ograniczyli się jednak do przedstawienia rozkładu przestrzennego tych zjawisk w granicach miasta, bez omówienia szczegółów dotyczących ich wielkości. W czasie fali upałów (29 lipca 2013 roku) największy był zasięg silnej (4,6%) oraz ekstremalnie silnej (1%) LCL SUHI (Rycina 10 w publikacji nr 1). Niezależnie od rozpatrywanej daty, silna i ekstremalna LCL SUHI obejmowały głównie pojedyncze zakłady przemysłowe i logistyczne, a także hałdy.

W GZM struktura przestrzenna SCI była mniej spójna. Zasięg przestrzenny SCI (12,2% - 19,4%) charakteryzował się większą zmiennością niż SUHI, w zależności od analizowanego dnia. Zasięg SCI był największy 22 czerwca 2017 roku kiedy próg LST warunkujący wystąpienie zjawiska (28,9°C) był najmniejsza, w związku z tym najwięcej obszarów zostało zidentyfikowanych jako SCI. Najmniejszy zasięg SCI zanotowano 12 czerwca 2019 roku kiedy kontrast termiczny między obszarami miejskimi i pozamiejskimi był najmniejszy (Rycina 2). Warunki meteorologiczne panujące 12 czerwca 2019 roku nie wskazywały jednoznacznie na przyczynę najmniejszego zasięgu SCI w tym dniu, dlatego sprawdzono warunki meteorologiczne panujące w poprzednich dniach. Stwierdzono, że w dniu bezpośrednio poprzedzającym rejestrację obrazu (11 czerwca 2019 roku) wystąpił opad atmosferyczny, który najprawdopodobniej spowodował wzrost parowania, szczególnie na terenach miejskich, co doprowadziło do małego zróżnicowania LST pomiędzy obszarami miejskimi i pozamiejskimi. W związku z tym, że różnica LST pomiędzy wspomnianymi obszarami była niewielka, mniej terenów roślinnych zostało zidentyfikowanych jako SCI.

Kompozycja SHI i SCI

Ponad 40% powierzchni SHI zawsze znajdowało się w obszarze zabudowy miejskiej luźnej, natomiast tereny przemysłowe i handlowe stanowiły około 28% jej powierzchni. Trzeci pod względem wielkości odsetek SHI (około 4% każdego dnia) stanowiły hałdy i zwałowiska. Istotną część SHI stanowiły także tereny rolne, w tym głównie nienawadniane gruntu orne oraz łąki i pastwiska, które łącznie obejmowały od 9% do 15,2% powierzchni SHI w zależności od dnia.

SCI w GZM obejmuje głównie tereny leśne (48,5% do 85,9%, w zależności od dnia). 12 czerwca 2019 roku udział lasów iglastych w powierzchni SCI (7,4% SCI) był kilka razy mniejszy niż udział pozostałych typów lasów. Jednocześnie udział terenów rolnych w SCI tego dnia (12 czerwca 2019) był nadzwyczaj wysoki (40,5% SCI), ponieważ w innych dniach udział rolnych typów zagospodarowania nie przekraczał 16% SCI. Duży udział terenów rolnych w SCI 12 czerwca 2019 roku wynika z obecności roślinności na terenach uprawnych mających niższą LST niż nieporośnięte grunty. Zbiorniki wodne stanowiły od 6% do maksymalnie 11% powierzchni SCI, w zależności od dnia. Ich obecność w SCI była zdecydowanie mniejsza niż roślinności co wynikało z ich niewielkiej powierzchni w obrębie GZM (1,7%). W Krakowie wykazano, że 32,3% powierzchni wszystkich lasów oraz 41% powierzchni wszystkich wód w tym mieście

pokrywa stabilna strefa chłodu (Walawender i in., 2014). Natomiast, w Barcelonie (Hiszpania) zidentyfikowano strefę chłodu w obrębie obszarów leśnych, miejskich terenów zielonych i upraw we wszystkich sezonach (Lemus-Canovas i in., 2020).

Lasy iglaste w GZM generalnie wyróżniały się wyższą średnią LST od pozostałych formacji leśnych (od 0,3 do 0,8°C, w zależności od dnia). Taką sytuację odnotowali również Imhoff i in. (2010), Ward i in. (2016) oraz Majkowska i in. (2017). Do osłabienia efektywności chłodzącej lasów iglastych 12 czerwca 2019 najprawdopodobniej przyczynił się opad, który wystąpił w godzinach wieczornych 11 czerwca 2019 roku. Większość opadu zatrzymuje się na powierzchni korony drzew. Lasy liściaste, dzięki dużej powierzchni liści, zatrzymują większą część opadu, który następnie podlega ewapotranspiracji na poziomie korony drzew.

Zasięg przestrzenny permanentnej SHI i SCI

Permanentna SHI, obejmowała 9% powierzchni GZM i była dwa razy większa niż permanentna SCI, która zajęła jedynie 3,6% GZM. Permanentna SHI występowała w każdej z 41 gmin GZM i objęła ich najbardziej zurbanizowane oraz zaludnione części (Rycina 4). Potwierdza to analiza korelacji Persona, która wykazała, że największy wpływ na odsetek stałej SHI w gminach GZM miały powierzchnie sztuczne (wszystkie klasy w obrębie tego typu pokrycia terenu), a następnie powierzchnie terenów przemysłowych i handlowych oraz zabudowa miejska luźna.



Rycina 4. Rozkład przestrzenny permanentnej SHI oraz permanentnej SCI

Permanentna SCI obejmowała wszystkie duże zbiorniki wodne w GZM oraz duże kompleksy lasów liściastych i mieszanych (Rycina 4). W trzech gminach GZM (Wojkowicach, Czeladzi, Świętochłowicach) permanentna SCI w ogóle nie wystąpiła. Obszar najbardziej widocznych permanentnych SCI zlokalizowany jest w południowej części GZM, na terenie Lasów Murckowskich, znajdujących się na granicy Katowic i Tychów. Mniejszy, lecz bardziej zwarty obszar SCI to kompleks leśny w północnej części GZM, na granicy Bytomia i Tarnowskich Gór. Obszary lasów iglastych nie znalazły się w obrębie permanentnej SCI, ponieważ straciły swoją efektywność chłodzącą w jednym z analizowanych dni najprawdopodobniej w wyniku opadu. Można zatem stwierdzić, że roślinność tworząca SCI, jest zdecydowanie bardziej wrażliwa na zmienne warunki meteorologiczne niż powierzchnie sztuczne w miastach.

W 15 gminach GZM permanentna SHI stanowiła ponad 10% ich całkowitej powierzchni. Podobny odsetek permanentnej SCI (>10%) stwierdzono tylko w Katowicach i Bytomiu. W pozostałych trzynastu gminach odsetek stałej SCI nie przekroczył 2,1% ich powierzchni. Większość gmin GZM nie dysponuje wystarczającą powierzchnią efektywnej SCI, skutecznej w łagodzeniu najbardziej trwałej SHI.

Walawender i in. (2014) określili tzw. stabilną strefę gorąca, obejmującą 2,6% powierzchni Krakowa, oraz stabilną strefę chłodu, obejmującą 3,2% powierzchni miasta. W porównaniu do GZM badacze z Krakowa uzyskali odwrotną zależność, tj. większy odsetek stabilnej wyspy chłodu aniżeli wyspy ciepła oraz zbliżone wartości powierzchni jaką zajmowały te zjawiska w Krakowie. Odsetek stabilnej strefy gorąca w Krakowie był kilka razy mniejszy niż w przypadku GZM. Należy jednak zaznaczyć, że badacze wykorzystali do analizy sześć obrazów satelitarnych, które zostały zarejestrowane od marca do sierpnia w latach 2000 – 2002. Z tego powodu wyniki uzyskane przez nich nie mogą być bezpośrednio porównane z wynikami dla GZM, ponieważ obejmują nie tylko letnią, ale także wiosenną wyspę ciepła i wyspę chłodu.

Zależności powierzchni SHI i SCI od pokrycia terenu

W GZM powierzchnia SHI najsilniej skorelowana była z ogólną powierzchnią sztucznych nawierzchni (wszystkie klasy w obrębie tego typu pokrycia terenu) (korelacja >0,9), a następnie tylko z terenami przemysłowymi i handlowymi oraz luźną zabudową miejską. Z kolei powierzchnia SCI wykazywała największą korelację z ogółem terenów roślinnych (wszystkie klasy w obrębie tego typu pokrycia terenu) w GZM (korelacja >0,74), w każdym dniu z wyjątkiem 12 czerwca 2019 roku. Podobnie permanentna SCI, nie wykazała zależności z ogólną powierzchnią roślinności w GZM. Opad, który wystąpił 11 czerwca 2019 roku przyczynił się do osłabienia efektywności chłodzącej lasów iglastych, stąd brak wspomnianych wcześniej zależności (Tabela 6 w publikacji nr 1). Lasy liściaste i mieszane w przeciwieństwie do lasów iglastych przyczyniały się do wzrostu właściwości chłodzących SCI w gminach GZM. Powierzchnia zbiorników wodnych w GZM była istotnie skorelowana z powierzchnią permanentnej SCI (korelacja >0,75).

Intensywność SUHI

Intensywność miejskiej wyspy ciepła w GZM, w zależności od dnia, wynosiła od 5,6 do 6,5°C według wskaźnika SUHII (różnica LST między terenem miejskim i pozamiejskim) oraz od 7,8 do 9,4°C według wskaźnika LCL SUHII (różnica LST między LCL SUHI i SCI). Największą intensywność odnotowano 22 czerwca 2017 roku (Tabela 7, publikacja nr 1), w przypadku obu wskaźników. Mapa rozkładu LST w tym dniu przedstawia największy kontrast pomiędzy ternami miejskim i pozamiejskimi, co wpłynęło na najwyższą intensywność SUHI tego dnia. Różnica intensywności SUHI

między zastosowanymi wskaźnikami wyniosła od około 2 do 3°C. Wiele powierzchni zlokalizowanych w obrębie terenów miejskich, takich jak parki miejskie czy roślinność pomiędzy zabudową, charakteryzuje się niższą LST, co w konsekwencji obniża średnią LST dla terenów miejskich. Z kolei, liczne silnie nagrzane powierzchnie, takie jak odkryte grunty czy tereny rolnicze, podwyższają LST terenów pozamiejskich, co w efekcie prowadzi do mniejszej intensywności SUHI. W mojej opinii, różnica średniej LST między najchłodniejszymi i najcieplejszymi powierzchniami w obrębie powierzchni miejskich (LCL SUHII) jest lepszą miarą intensywności SUHI. Do podobnych wniosków doszła Alexander (2020), która zauważyła istotny wpływ terenów rolnych na LST pozamiejskiej strefy Arhus (Dania). Badaczka oceniła, że różnica LST między terenami miejskimi i pozamiejskimi wynosi 3,9°C, a między terenami najcieplejszymi i najchłodniejszymi osiąga 13,3°C. W Barcelonie (Hiszpania) również oceniono różnice LST pomiędzy strefą ciepła i chłodu, wynoszącą latem 9,1°C (Lemus-Canovas i in., 2020). Należy jednak zaznaczy, że w opracowaniu tym zastosowano inną metodykę wyznaczania stref ciepła i chłodu bazująca na analizie głównych składowych (PCA) (Lemus-Canovas i in., 2020).

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.

W publikacji nr 2 zamieszczono wyniki badań nad realizacją drugiego celu cząstkowego rozprawy doktorskiej, dotyczącego określenia wieloletniej zmienności letniej powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła w latach 1986 – 2021 oraz oceny zmian w zagospodarowaniu terenu GZM w latach 1990 – 2018.

Stopień rozwoju roślinności, który zmienia się każdego dnia w trakcie trwania sezonu wegetacyjnego (Martin i in., 2015) silnie wpływa na LST, zwłaszcza po żniwach. Ponadto, LST jest również silnie zależna od warunków meteorologicznych panujących w dniu rejestracji oraz w dniach poprzedzających rejestrację obrazu. W związku z tym, aby zminimalizować ryzyko wynikające z wpływu cyklu wegetacyjnego oraz zmiennych warunków meteorologicznych na wieloletnią zmienność LST, analizie poddano obrazy satelitarne zarejestrowane w podobnych terminach i podczas podobnych warunków meteorologicznych. W ten sposób wyselekcjonowano sześć obrazów satelitarnych, reprezentujących każdy miesiąc sezonu letniego oraz początek i koniec badanego wielolecia: 17 czerwca 1986 roku i 17 czerwca 2021 roku (odległość czasowa 35 lat), 25 lipca 1994 roku i 29 lipca 2013 roku (19 lat), 31 sierpnia 1990 roku i 31 sierpnia 2019 roku (29 lat). W lipcu obrazy satelitarne zostały zarejestrowane w trakcie fali upałów.

W niniejszej publikacji zasięg miejskiej wyspy ciepła analizowano w oparciu o trzy wskaźniki, tj. powierzchniową wyspę ciepła (SHI), powierzchniową miejską wyspą ciepła (LCL SUHI) oraz powierzchniową miejską wyspę ciepła nie uwzględniającą terenów rolnych (SUHI_{WA}).

Wieloletnia zmienność zasięgu oraz LST różnych form porycia terenu w GZM

Biorąc pod uwagę fakt, że sposób zagospodarowania terenu obszarów miejskich determinuje powstawanie SUHI (Han i in., 2022; Xi i in., 2024), w pierwszej kolejności zbadano, jak w latach 1990 – 2018 zmieniło się zagospodarowanie terenu GZM. Zmiany zagospodarowania terenu zostały zbadane w oparciu o przeorganizowaną klasyfikacje CLC. W analizowanym wieloleciu powierzchnia obszaru miejskiego wzrosła z 26,9%

w 1990 roku do 30,6% w 2018 roku, a obszar pokryty powierzchniami nieprzepuszczalnymi zwiększył się o 4,8% (116,3 km²). Największy ubytek powierzchni odnotowano w przypadku terenów rolnych – 3,7% GZM (125,6 km²). Mapa przedstawiająca wzrost i ubytek różnych rodzajów powierzchni w 2018 roku w stosunku 5) wyraźnie pokazuje, do 1990 roku (Rycina że wzrost powierzchni nieprzepuszczalnych następował najczęściej kosztem terenów rolnych. Podobne zmiany zagospodarowania terenu zauważyli badacze z Hiszpanii (Hidalgo-Garcia i Arco-Diaz, 2022) oraz Bangladeszu (Roy i in., 2020), którzy odnotowali wzrost powierzchni obszarów miejskich/obszarów zabudowanych o 7% w okresie od 1985 – 2020 w mieście Granada oraz o 13,6% w latach 1990 – 2018 w obszarze metropolitalnym Chattogram (CMA). Zmiany zagospodarowania we wspomnianych miastach były większe niż w GZM, co może wynikać z faktu, iż już w latach 90 tych GZM była regionem silnie rozwiniętym gospodarczo.



Rycina 5. Zmiany w rozkładzie zagospodarowanie terenu GZM w 2018 roku w stosunku do 1990 roku

W rozpatrywanym wieloleciu wzrosła temperatura wszystkich typów pokrycia terenu, włączając odkryte grunty oraz tereny rolne, których powierzchnia zmniejszyła się w okresie 1990 – 2018. Przyczyną stwierdzonego wzrostu LST wszystkich wyróżnionych powierzchni gruntu w GZM najprawdopodobniej jest zmiana klimatu. Największą tendencję LST od 2,3°C (tereny rolne, pomiędzy 1990 a 2018) do 4,3°C (powierzchnie nieprzepuszczalne, pomiędzy 1990 a 2018), stwierdzono w lipcu podczas trwania fal upałów. Największy wzrost LST stwierdzony w tym miesiącu może świadczyć o zwiększeniu intensywności fal upałów w związku z globalnym ociepleniem.

Wieloletnia zmienność rozkładu przestrzennego LST i SUHI

W wybranym okresie badawczym średnia LST w GZM wzrosła o 2,0°C w czerwcu, 3,4°C w lipcu i 1,3°C w sierpniu. Ocieplenie jest szczególnie widoczne w obrębie terenów pozamiejskich (Rycina 6), zwłaszcza terenów rolnych zmagających się z suszą rolniczą od 1988. Susza najprawdopodobniej doprowadziła do pogorszenia struktury bilansu wodnego powierzchni rolnych (Wójcik i in., 2019) współtworzących obszary pozamiejskie w GZM. W GZM wzrostowi LST w badanym wieloleciu towarzyszyła ekspansja miejskiej wyspy ciepła, co było wynikiem zarówno wzrostu powierzchni sztucznych, jak i ubytku powierzchni naturalnych, a także zmiany klimatu. Udział miejskiej wyspy ciepła w powierzchni GZM wzrósł od 0,6 do 1,7% powierzchni GZM dla SHI, od 0,6 do 1,2% dla SUHI_{WA} i od 0,6 do 4,3% dla LCL SUHI. Według wskaźnika SHI i SUHI_{WA} największą ekspansję miejskiej wyspy ciepła stwierdzono w czerwcu, natomiast według LCL SUHI – w lipcu. Zmiany konfiguracji przestrzennej LCL SUHI były w dużej mierze związane z rozrostem istniejących już w latach 90 tych obszarów zurbanizowanych, zlokalizowanych w środkowej części metropolii. Duża ekspansję LCL SUHI stwierdzono również w południowej części GZM, w okolicy Tychów i Bierunia, co wynika z intensywnego rozwoju tych obszarów w latach 1990 - 2018 (rycina 6). Ponadto, w efekcie suburbanizacji SUHI rozwinęła się w nowych, dotychczas nie zajmowanych przez nią obszarach (np. w rejonie gminy Bobrowniki). Niemniej jednak, specyficzna struktura LCL SUHI w formie archipelagu w środkowej części GZM pozostała niezmieniona. W efekcie postępującej urbanizacji i zmiany klimatu, analogiczne tendencje w rozwoju powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła również obserwowane są w innych miastach. W obszarze metropolitalnym Chattogram (CMA; Bangladesz) ekspansja SUHI wyniosła około 10% w latach 1990 – 2018 (Roy i in., 2020). W mieście Granada (Hiszpania), w latach 1985 – 2020 wzrost SUHI siegał nawet 22% (Hidalgo-Garcia i Arco-Diaz, 2022).



Rycina. 6. Rozkład przestrzenny LST (A i B) oraz SHI i LCL SUHI (C i D) w GZM 25 lipca 1994 oraz 29 lipca 2013 roku Wyjaśnienia: Białe plamy oznaczają usunięte zachmurzenie

Kompozycja SUHI

Analizie poddałam również czasowe zmiany kompozycji każdej z wyznaczonych powierzchniowych miejskich wysp ciepła (za pomocą każdego z rozpatrywanych wskaźników). Udział powierzchni nieprzepuszczalnych w obrębie SHI, SUHI_{WA} i LCL SUHI wzrósł w analizowanym wieloleciu o 0,5% w czerwcu (z 76,6% w 1986 roku do 77,1% w 2021 roku), o 29% w lipcu (z 49,5% w 1994 roku do 7,5% w 2013 roku), oraz o 19,1% w sierpniu (z 23,9% w 1990 roku do 43% w 2019 roku) (Rycina 7). Zmiany te były skutkiem wzrostu udziału powierzchni nieprzepuszczalnych w granicach GZM między 1990 a 2018 rokiem.





Aby wyjaśnić zmiany kompozycji powierzchniowej wyspy ciepła należy zaznaczyć, że udział poszczególnych typów pokrycia terenu w miejskiej wyspy ciepła może zależeć zarówno od zmian powierzchni zajmowanych przez te typy jak również od temperatury gruntów rolnych. Wysokie wartość LST dla obszarów rolniczych zwykle skutkują małą różnicą LST pomiędzy obszarami zurbanizowanymi a otoczeniem i w efekcie sporym udziałem powierzchni rolnych w obrębie SHI. W czerwcu zarówno w 1986 jak i 2021 LST powierzchni nieprzepuszczalnych była wyraźnie wyższa niż LST terenów rolnych (odpowiednio 5,0°C i 4,2°C). Stąd udział terenów rolnych w SHI tym miesiącu był najmniejszy. Natomiast, tereny rolne stanowiły większość część SHI w 2021(16,9%) roku niż w 1986 roku (8%) z uwagi na mniejszą różnicę LST między terenami rolnymi i nieprzepuszczalnymi w 2021 (4,2°C). W lipcu i sierpniu wspomniana różnica miedzy LST obszarów powierzchni sztucznych i terenów rolnych była mniejsza (lipiec:1.8°C w 1994 roku i 3.9°C w 2013 roku; sierpień: -0,5°C w 1990 roku i 0,8°C w 2019 roku). Pozbawione upraw tereny rolne (żniwa) odznaczały się wysoką LST stąd udział terenów rolnych w powierzchni SHI był wyraźnie większy w lipcu 1990 roku (35,5%) porównaniu z 2013 rokiem (14,1%). W sierpniu 1990 tereny rolne były cieplejsze niż powierzchnie sztuczne stąd ich udział w SHI wynosił prawie 70% (Rycina 7).

Wskaźniki LCL SUHI i SUHI_{WA}, które eliminują tereny rolne w badaniach zasięgu wyspy ciepła, wykazały wzrost udziału powierzchni sztucznych w obszarach identyfikowanych jako miejska wyspa ciepła między 1986 a 2021 rokiem; w czerwcu maksymalnie o 9,4%, w lipcu o 14,1%, a w sierpniu o 12,4% (Rycina 7). Udział odkrytych gruntów w obrębie LCL SUHI i SUHI_{WA} zmniejszył się z 12,4% do 5,6%,

w efekcie zmian typu zagospodarowania tych terenów w analizowanym okresie w zależności od rozważanego wskaźnika i miesiąca. Przykładem tego typu zmian jest przekształcenie terenu eksploatacji odkrywkowej w Dąbrowie Górniczej w zbiornik retencyjny Pogoria. Obecność roślinności oraz zbiorników wodnych w obrębie miejskiej wyspy ciepła jest wynikiem błędnej interpretacji CLC niektórych form pokrycia terenu. Na przykład hałdy (mające wysoką LST) klasyfikowane były jako zbiorniki wodne, przez co zostały zidentyfikowane jako wyspa ciepła. Jak wspomniano w metodycznej części rozprawy doktorskiej klasyfikacja została poddana ręcznej korekcie, jednak tylko w takich przypadkach kiedy błędy były bardzo wyraźne.

Permanentna SHI

Na podstawie analizy dziewięciu niezachmurzonych obrazów satelitarnych wyznaczono permanentną SHI, obejmującą obszary stanowiące SHI nieprzerwanie od 1985 roku. Permanentna SHI stanowiła niespełna 1% całkowitej powierzchni GZM i lokowała się na terenie 30 z 41 gmin metropolii, przy czym 20% tej powierzchni leżało na terenie Katowic. Powierzchnie zidentyfikowane jako permanentna SHI to m.in. Huta Katowice w Dąbrowie Górniczej, Spodek w Katowicach, centrum Katowic z zabudową starych kamienic, fabryka Fiata w Tychach, hałda w Kobiórze, a także obszary magazynowe i przemysłowe w Gliwicach i Świętochłowicach.

Intensywność SUHI

W publikacji nr 2 intensywność SUHI (SUHII) została obliczona jako różnica między średnią LST miejskiej wyspy ciepła (LCL SUHI) i obszarów stanowiących wyspę chłodu (SCI). W rozpatrywanym wieloleciu intensywność SUHI w ciągu badanego okresu zmniejszyła się o 0,7°C w czerwcu, 1,4°C w lipcu i 3,4°C w sierpniu pomimo, iż średnia LST w obrębie LCL SUHI wzrosła o 0,2°C do 3,2°C (Rycina 8). Spadkowa tendencja intensywności SUHI wynikała z tempa wzrostu LST w obrębie SCI, które było znacznie większe niż w obrębie LCL SUHI (2,2°C do 4,6°C) co doprowadziło do spadku intensywności SUHI. Wzrost LST w obrębie SCI najprawdopodobniej związany był z suszą rolną trwającą w Polsce od lat 90 tych (1988) (Wójcik i in., 2019), która doprowadziła do zmian struktury bilansu wodnego, kondycji roślinności i w rezultacie osłabienia jej chłodzącego efektu. Największy wzrost LST w obrębie SCI zaobserwowano w lipcu, w czasie fali upałów. Podobny proces stwierdzono w kilku

europejskich miastach, w których kondycja roślinności miejskiej i słabo zalesionych terenów pogorszyła się w wyniku fali upałów, co spowodowało osłabienie, a nawet, jak stwierdzają autorzy, odwrócenie efektu chłodzenia powierzchni roślinnych (Ward i in., 2016).



Rycina. 8. Różnica średniej LST pomiędzy SHI, SUHIWA i LCL SUHI w wybranych do porównania czasowej zmienności datach (A) oraz intensywność SUHI (B)

Wpływ wskaźników demograficznych na SUHI

Zależności pomiędzy liczbą mieszkańców, gestością zaludnienia i powierzchnią LCL SUHI w gminach GZM były istotne statystycznie w każdym z analizowanych dni. Ponadto zależności te były wyraźnie silniejsze w przypadku liczby mieszkańców (współczynnik korelacji Pearsona: 0,83 – 0,98) niż gęstości zaludnienia (współczynnik korelacji Pearsona: 0,39 – 0,58). Zależności pomiędzy średnią LST gminy a wspomnianymi wskaźnikami demograficznymi kształtowały się odmiennie. Korelacja średniej LST gminy z gęstością zaludnienia (korelacja: 0,54 – 0,81) była znacząco silniejsza niż z liczbą mieszkańców (korelacja: 0,34 – 0,42). Wspomniane korelacje w zdecydowanej większości przypadków były istotne statystycznie, z wyjatkiem dwóch przypadków z końca sierpnia. W azjatyckich miastach również stwierdzono silną korelację pomiędzy zasięgiem SUHI a gęstością zaludnienia (współczynnik korelacji Pearsona: 0,94) (Zhang i Wang, 2008) oraz liczbą mieszkańców (współczynnik korelacji Pearsona: 0,87) (Hung i in., 2006). Z kolei Dushi i Berila (2022) stwierdzili istotną zależność pomiędzy średnią LST a gęstością zaludnienia w Kosowie. Wzrost populacji determinuje rozwój miasta, w tym rozwój jego infrastruktury technicznej oraz zabudowy, a zatem powierzchni, które przyczyniają się do rozwoju SUHI.

5.3. Publikacja 3: Sezonowa zmienność miejskiej i pozamiejskiej powierzchniowej wyspy chłodu

Renc, A., Łupikasza, E., 2024. Permanent and Seasonally Specific Surface Heat Island in urban and non-urban areas in mid-latitude polycentric agglomeration based on Landsat images. Ecological Indicators, 169, 112871.

Publikacja nr 3 realizuje trzeci cel cząstkowy rozprawy doktorskiej, którym było rozpoznanie sezonowej zmienności powierzchniowej wyspy ciepła występującej w obrębie terenów miejskich i pozamiejskich GZM. Ponadto, w publikacji dokonano oceny form pokrycia terenu pod względem ich potencjału do kształtowania wyspy ciepła.

W przeciwieństwie do publikacji nr 1 i nr 2, w których analizowano LST w każdym z rozpatrywanych dni, w publikacji nr 3 podstawą badań była średnia LST obliczona na podstawie wszystkich obrazów zrejestrowanych w tym samym sezonie meteorologicznym. W ten sposób dla każdego sezonu uzyskano jeden obraz przedstawiający średnią sezonową LST. Jedynie w zimie zasięg powierzchniowej wyspy ciepła (SHI) został wyznaczony oddzielnie dla każdego obrazu satelitarnego ze względu na zróżnicowany stopień pokrycia gruntu przez śnieg (dwa obrazy bez pokrywy śnieżnej).

Sezonowa zmienność LST w GZM

Średnia sezonowa LST w GZM zmieniała się w zakresie od -0,6°C (zima) do 30,6°C (lato). Zakres zmienności LST w tych sezonach również był wyraźnie zróżnicowany. Latem 50% wartości LST mieściło się pomiędzy 27,9°C i 32,6°C (rozstęp międzykwartylowy), a zimą pomiędzy 1,2°C i -0,1°C. Sezonowa zmienność LST jest bezpośrednim skutkiem długości trwania dnia, a zatem czasu napływu promieniowania słonecznego do powierzchni Ziemi (Lima-Alves, 2016; Lemus-Canovas i in., 2020). W obu sezonach przejściowych średnia LST przekraczała 20°C (wiosna 20,2°C, jesień 21,2°C). Pomijając zimę, rozkład przestrzenny LST w GZM był podobny. Najgorętsze punkty na mapie metropolii zlokalizowane były w jej środkowej części. Kontrast termiczny miedzy ternami miejskimi i pozamiejskimi różnił się znacząco między zimą i wiosną a latem i jesienią (Rycina 5 w publikacji nr 3). Wiosną różnica LST między obszarami miejskimi i pozamiejskimi była niewielka na skutek silnie nagrzanych gruntów podczas rozpoczynającego się sezonu wegetacyjnego. Odkryty grunt posiada niższe albedo oraz charakteryzuje się zmiejszonym przepływem ciepła utajonego

w porównaniu do gruntu pokrytego roślinnością (Geletič i in., 2016). Latem i jesienią kontrast termiczny pomiędzy terenami miejskimi i pozamiejskimi był wyraźny z uwagi na szczyt sezonu wegetacyjnego. Przy czym jesienią temperaturę obszarów pozamiejskich podnosiły silnie nagrzane powierzchnie terenów rolnych po żniwach. Rozkład przestrzenny LST zimą był wyraźnie związany z rozmieszczeniem pokrywy śnieżnej w GZM. Najmniej pokrywy śnieżnej obserwowano w najcieplejszym rejonie GZM w okolicach rzeki Kłodnicy w zachodniej części metropolii. Pomijając determinujący sezonowość czynnik astronomiczny jakim jest długość trwania dnia, **sezonowa zmienność LST w GZM wynikała przede wszystkim z rocznego cyklu rozwoju roślinności oraz obecności pokrywy śnieżnej zimą,** co jest zgodne z badaniami Liu i Wanga, (2008), Stewarta i Okea (2012), Wanga i Huanga (2015), Geletiča i in. (2019) oraz Yanga i in. (2020).

Rola różnych typów pokrycia terenu w kształtowaniu sezonowej zmienności LST

W celu identyfikacji form pokrycia terenu posiadających największy wpływ na kształtowanie LST, a tym samym rozwój SHI, analizie poddano odchylenie LST obliczone dla poszczególnych klas pokrycia terenu od średniej sezonowej LST (dalej nazwane odchyleniem). Takie podejście pozwoliło również określić sezonowe zróżnicowanie wpływu omawianych powierzchni na LST, a zatem rozwój lub zanik miejskiej wyspy ciepła. Obliczenia przeprowadzono zarówno na podstawie klasyfikacji CLC, jak i LCZ. Stwierdzono, że w przypadku obu klasyfikacji większość klas przypisanych do obszarów miejskich w GZM, charakteryzowała się dodatnimi odchyleniami LST od średniej w ciągu całego roku (Rycina 9). Największy, lub prawie największy (w przypadku zimy) wpływ na wzrost LST posiadała zabudowa miejska zwarta (CLC111) oraz jej odpowiednik LCZ2. Odchylenie LST od średniej sezonowej dla wspomnianych klas było największe latem (CLC: 7,4°C, LCZ: 7,5°C), a następnie wiosną (CLC: 4,1°C, LCZ: 4,4°C), jesienią (CLC: 3,0°C, LCZ: 3,3°C) i zimą (CLC: 1,0°C, LCZ: 0,9°C). W zimie największym odchyleniem odznaczała się klasa obszarów portowych (+1,1°C, CLC123), obejmująca niewielki teren zlokalizowany w Gliwicach, składający się zarówno z terenów wodnych (Kanał Gliwicki) jak i infrastruktury technicznej.



Rycina. 9. Odchylenia średniej LST klas pokrycia terenu CLC 2018 i LCZ od średniej sezonowej LST (zima – -0,6°C, wiosna – 20,2°C, lato – 30,6°C, jesień – 21,2°C) Wyjaśnienia: szare obszary oznaczają klasy, które mają zmienny wkład w rozwój SUHI w zależności od sezonu; klasy pokrycia terenu CLC: 111 – Continuous urban fabric, 112 – Discontinuous urban fabric, 121 – Industrial or commercial units, 122 – Road and rail networks and associated land, 123 – Port areas, 124 – Airports, 131 – Mineral extraction sites, 132 – Dump sites, 133 – Construction sites, 141 – Green urban areas, 142 – Sport and leisure facilities, 211 – Nonirrigated arable land, 231 – Pastures, 242 – Complex cultivation patterns, 243 – Land principally occupied by agricultural,311 – Broad-leaved forest, 312 – Coniferous forest, 313 – Mixed forest, 324 – Transitional woodland-shrub, 512 – Water bodies; klasy pokrycia terenu LCZ: 2 – Compact midrise, 5 – Open midrise, 6 – Open low-rise, 8 – Large low-rise, 9 – Sparsely built, E – Bare rock or paved, A – Dense trees, B – Scattered trees, D – Low plants, F – Bare soil or sand, G – Water

Zbiorniki wodne (CLC512 i LCZG) oraz lasy (CLC311-313 i LCZA) odznaczały się znaczącym ujemnym odchyleniem LST od średniej w każdym sezonie. W przypadku zbiorników wodnych odchylenie to było największe wiosną (CLC i LCZ: -7,2°C), a najmniejsze zimą (Rycina 9). Maksymalne negatywne odchylenie LST wiosną najprawdopodobniej związane było z dużą pojemnością cieplną wody. W związku z tym, wychłodzone w czasie sezonu zimowego zbiorniki wodne pozostawały chłodniejsze od nagrzanej wiosennym słońcem powierzchni gruntu.

Właściwości chłodzące lasów zależały od ich składu gatunkowego. Lasy liściaste i mieszane (CLC311 i 313) posiadały największa zdolność chłodzącą latem, w szczycie okresu wegetacyjnego kiedy powierzchnia ich liści oraz korony drzew były największe (DeWalle i McGuire, 1973; Lukeŝ i in., 2013). W pozostałych sezonach, największy

potencjał w obniżaniu LST miały lasy iglaste i lasy mieszane, w których w GZM dominuje wiecznie zielona sosna.

Sezonowa zmienność możliwości chłodzących/ocieplających poszczególnych klas pokrycia terenu zależała od udziału roślinności (głównie niskiej) w ich obrębie. Wśród takich powierzchni znalazły się miejsca eksploatacji odkrywkowej (CLC131) oraz zabudowa rozproszona (LCZ9) mające niewielką predyspozycję do obniżania LST zimą. W pozostałych sezonach powierzchnie te posiadały właściwości ogrzewające (odchylenie od 1,3 do 2,9°C dla CLC131 i od 0,3 do 0,6°C dla LCZ9). Odchylenie LST dla miejskich terenów zielonych (CLC141) oraz terenów sportowych i rekreacyjnych (CLC142) było sezonowo zmienne w odniesieniu do kierunku (dodatni/ujemny) i niewielkie. Obszary rolne, z wyjątkiem nienawadnianych gruntów rolnych (CLC211) stanowiacych najpowszechniejszy sposób uprawy gruntów w GZM, również odznaczały się sezonową zmiennością kierunku odchylenia LST (od -0,5°C do +0,8°C). Uzyskane wyniki wskazują, że cykl wegetacyjny roślinności oraz jej udział w obrębie klas użytkowania gruntów najsilniej wpływają na zmienność sezonową LST w GZM. W przypadku terenów rolnych zmienność LST może wynikać również z różnorodności składu gatunkowego roślinności w ich obrębie oraz z innych czynników antropogenicznych wpływających na rozwój danej powierzchni, takich jak nawożenie, nawodnienie czy wypalanie. Czynności te wpływają na albedo oraz zawartość wilgoci w glebie, co z kolei oddziałuje na zmienność LST.

Odchylenie LST dla klas wyróżnionych w rozpatrywanych klasyfikacjach dała podobne wyniki. Niemniej jednak klasyfikacja LCZ w przypadku miejskich klas pokrycia terenu (LCZ2-9 i E) zwykle charakteryzowała się wyższymi wartościami LST niż CLC (nawet o ok. 0,9°C). Analiza przeprowadzona na podstawie klasyfikacji CLC uwypukla sezonową zmienność LST różnych klas pokrycia terenu, szczególnie w odniesieniu do terenów leśnych i rolniczych. Klasyfikacja CLC oferuje większą różnorodność klas zagospodarowania gruntu, w tym m.in. trzy klasy lasów, podczas gdy klasyfikacja LCZ wyróżnia tylko jedną.

Sezonowa zmienność zasięgu i kompozycji SHI

Zgodnie z sezonowym rozkładem przestrzennym LST, podążającym za rocznym cyklem zmienności roślinności, miejska SHI (za wyjątkiem zimy) była zlokalizowana w najbardziej zurbanizowanej części GZM obejmując największy jej odsetek latem – 11,4% oraz wiosną – 9%. Jesienią i zimą miejska SHI zajmowała najmniejszy odsetek GZM – odpowiednio 6,8% i 7%. Pozamiejska SHI była najrozleglejsza zimą – 8,2%, a najmniejsza latem – 2,6%. Zimą zarówno miejska, jak i pozamiejska SHI były skoncentrowane głównie w zachodniej, najniżej położonej części GZM, która ze względu na brak pokrywy śnieżnej, wyróżniała się wyższą LST w porównaniu do pozostałej części metropolii (Rycina 10).



Rycina. 10. Rozkład miejskiej i pozamiejskiej SHI w każdym z sezonów w GZM

Co ciekawe, zachodnia, najniżej położona część metropolii wyróżniała się znacznie wyższą LST również w tych dniach kiedy pokrywa śnieżna występowała równomiernie w całym GZM (29 stycznia 2017 roku i 26 grudnia 2021 roku). W dniach zimowych bez pokrywy śnieżnej (12 stycznia 2005 roku i 25 lutego 2021 roku), topografia nie miała wpływu na kształtowanie rozkładu przestrzennego LST (Rycina 8A w publikacji nr 3). Należy jednak zaznaczyć, że warunki meteorologiczne podczas dni z pokrywą i bez pokrywy śnieżnej znacząco różniły się pod względem temperatury powietrza. W związku z powyższym lokalna topografia miała wpływ na strukturę SHI tylko w warunkach występowania pokrywy śnieżnej. Wyraźny wpływ topografii na SUHI został zaobserwowany w miastach położonych w topograficznie zróżnicowanych

obszarach (Pongrácz i in., 2010; Sfîcâ i in., 2023; Portela i in., 2020). W zimie, za sprawą górskiego otoczenia Mediolanu (Włochy) powstająca tam SUHI była bardziej intensywna nocą niż w ciągu dnia (Pongrácz i in., 2010). W Iași (Rumunia) topografia odgrywała istotną rolę w kształtowaniu zimowej SUHI, z uwagi na występujące tam inwersje termiczne (Sfîcâ i in., 2023). W São José dos Campos (Brazylia) stwierdzono, że rzeźba terenu może mieć większy wpływ na SUHI w cieplejszym sezonie niż w chłodniejszym (Portela i in., 2020).

Zimą i jesienią pozamiejska SHI obejmowała większą o około 1% powierzchnie GZM w porównaniu do miejskiej SHI. Jesienią zasięg pozamiejskiej SHI był większy ze względu na duże powierzchnie silnie nagrzanych gruntów rolnych po żniwach. Zimą znaczenie miał niski próg termiczny definiujący SHI wynikający z małej zmienności LST w obrębie GZM. W związku z tym LST na terenach pozamiejskich zlokalizowanych w zachodniej, zdecydowanie cieplejszej części GZM była zbliżona do LST na terenach miejskich.

Kompozycja SHI

W celu oceny kompozycji miejskiej i pozamiejskiej SHI analizie poddano odsetek powierzchni SHI zajmowany przez występujące w jej obrębie klasy pokrycia terenu. Uzyskany w ten sposób wskaźnik informuje o rzeczywistym udziale każdej z rozpatrywanych klas w powierzchni SHI. Ponadto, obliczono procent pokrycia każdej klasy zagospodarowania terenu przez SHI, który informuje o potencjale (zdolności) poszczególnych klasy do intensyfikacji SHI, niezależnie od jej całkowitej powierzchni w obrębię obszaru badań.

Kompozycja miejskiej SHI

<u>Udział klas pokrycia terenu w obrębie miejskiej SHI</u>. Zimą i latem przeważająca część, bo aż 80% miejskiej SHI stanowiły dwie klasy – klasa zabudowy miejskiej luźnej (CLC112; ponad 50%), a następnie klasa terenów przemysłowych i handlowych (CLC121; powyżej 30%). Wiosną i jesienią miejską SHI niemal w połowie tworzyły tereny przemysłowe i handlowe (ok. 45%) oraz tereny zabudowy miejskiej luźnej (ok. 39%) (Rycina 9 w publikacji nr 3). Sezonowa zmienność udziału tych klas w powierzchni miejskiej SHI jest wynikiem współdziałania sezonowo zmiennych czynników astronomicznych, właściwości fizycznych materiałów tkanki miejskiej oraz tak zwanego
metabolizmu miejskiego. Podniesienie temperatury materiałów budujących tkankę miejską (beton kamień, cegła) wymaga dużej ilości energii ze względu na ich znaczną masę termiczną (Golański, 2011). Dlatego w przejściowych porach roku obszary zabudowane nagrzewają się słabiej niż latem ze względu na mniejszą ilość energii docierającej do jednostkowej powierzchni podłoża. Z kolei w zimie znaczny udział zabudowy miejskiej w obrębie miejskiej SHI mógł być związany z emisją ciepła antropogenicznego. Dodatkowo, mniejszy udział terenów przemysłowych i handlowych w miejskiej SHI latem, w porównaniu do sezonów przejściowych, wynikał z większego udziału roślinności rozprzestrzenionej wokół obiektów przemysłowych i handlowych, która na skutek ewapotranspiracji przyczyniła się do obniżenia LST wokół tych obszarów.

Potencjał klas pokrycia terenu do intensyfikacji SHI. Największym potencjałem do rozwoju miejskiej SHI charakteryzowała się klasa zabudowy zwartej (CLC111), której powierzchnia od 60% (zimą) do prawie 100% (latem) była pokryta przez SHI. Tereny przemysłowe i handlowe (CLC121) oraz hałdy (CLC132) stanowiły kolejne klasy, których potencjał w intensyfikowaniu miejskiej SHI był największy niezależnie od sezonu. Pomimo, że udział zabudowy zwartej i hałd w powierzchni SHI był niewielki (łącznie ok. 1,1%) to ich potencjał do intensyfikowania SHI jest bardzo duży. W związku z tym, tego typu powierzchnie powinny być eliminowane lub modyfikowane poprzez wprowadzenie w ich obrębie roślinności aby zmniejszyć ich wpływ na rozwój miejskiej SHI latem. Klasa pokrycia terenu, która w największym stopniu była pokryta przez SHI zimą to tereny portowe (CLC123), które jednak zajmują na tyle małą powierzchnie SHI, że ich wpływ na intensywność SHI jest znikomy.

Kompozycja pozamiejskiej SHI

<u>Udział klas pokrycia terenu w obrębie pozamiejskiej SHI.</u> Zaledwie cztery klasy należące do terenów rolnych (CLC211, 231, 242, 243) stanowiły od 67% (zimą) do 97% (jesienią) pozamiejskiej SHI przez cały rok (Rycina 10 w publikacji nr 3). Dominujący udział przypadł na nienawadniane grunty orne (CLC211), które stanowiły od 57,5 do 85,8% pozamiejskiej SHI w zależności od pory roku. Nieliczne powierzchnie pozostałych klas pokrycia terenu nagrzewały się wystarczająco mocno, aby znaleźć się w obrębie pozamiejskiej SHI.

Potencjał klas pokrycia terenu do intensyfikacji pozamiejskiej SHI. Największym potencjałem do kształtowania pozamiejskiej SHI wyróżniały się grunty orne, które w maksymalnie w 27% (jesienią) pokryte były przez SHI. W przypadku wszystkich pozostałych klas, stopień pokrycia terenu przez pozamiejską SHI był mniejszy niż 15%. Sezonowa zmienność potencjału powierzchni naturalnych w intensyfikowaniu pozamiejskiej SHI wynika z zmian właściwości gruntu w trakcie trwania sezonu wegetacyjnego (Geletič i in., 2016) oraz działalności rolniczej w ciągu roku (wypalanie, nawożenie, zbiory) (Yang i in., 2020). Zimą, w przeciwieństwie do innych sezonów, duża powierzchnia lasów (łącznie 29%) oraz zbiorników wodnych (14,7%) była pokryta pozamiejską SHI. Niektóre zbiorniki wodne (niezamarznięte) charakteryzowały się znacząco wyższą LST, co tłumaczy obecność pozamiejskiej SHI w ich obrębie. Podobna sytuacja miała miejsce na terenach leśnych, gdzie obecność śniegu była zdecydowanie mniejsza niż na odkrytych gruntach.

Sezonowo specyficzna i permanentna miejska SHI

Terminem permanentna SHI określono tereny, w których SHI pojawiała się w każdym z rozpatrywanych sezonów. Sezonowo specyficzna SHI wyznacza takie obszary, w których SHI pojawiała się tylko i wyłącznie w jednym sezonie. Zarówno permanentną, jak i sezon specyficzną SHI wyznaczono osobno w obszarach miejskich oraz pozamiejskich. Powierzchnia sezonowo specyficznej SHI jest obliczona jako odsetek całkowitej powierzchni sezonowej SHI. Największy zasięg sezonowo specyficznej miejskiej SHI odnotowano zimą (2,3% powierzchni GZM) oraz latem (2,2% powierzchni GZM). Sezonowo specyficzna miejska SHI występująca zimą stanowiła około 32% miejskiej SHI, a latem około 20% miejskiej SHI. Kluczowym czynnikiem wpływającym na rozkład sezonowo specyficznej miejskiej SHI zimą była pokrywa śnieżna. Latem, zabudowa miejska luźna stanowiła ponad 78% letniej sezonowo specyficznej miejskiej SHI. Wiosną i jesienią sezonowo specyficzna miejska SHI stanowiła mniej niż 1% całkowitej powierzchni GZM. Permanentna miejska SHI obejmowała większą część GZM (3%) niż sezonowo specyficzna miejska SHI w poszczególnych sezonach. Pokrywała przede wszystkim najbardziej zurbanizowane części miast metropolii, głównie tereny przemysłowe i handlowe (48,4%), zabudowę miejską luźną (37,9%) oraz hałdy (7,1%).



Rycina. 11. Rozkład permanentnej i sezonowo specyficznej miejskiej SHI w GZM Wyjaśnienia: W nawiasach przedstawiono udział wskaźników w powierzchni GZM

Sezonowo specyficzna i permanentna pozamiejska SHI

Sezonowo specyficzna pozamiejska SHI była większa od miejskiej SHI we wszystkich sezonach, z wyjątkiem lata. Zimą obejmowała 5,3% powierzchni GZM, co stanowiło aż 64,5% pozamiejskiej SHI. Ponownie, jej rozkład był związany z rozmieszczeniem pokryw śnieżnej, której było najmniej w zachodniej części metropolii. Jesienia i wiosną sezonowo specyficzna pozamiejska SHI obejmowała odpowiednio 2,8% i 1,7% GZM, co stanowiło ok. 35% pozamiejskiej SHI występujących w tych sezonach. Zjawisko to było związane z silnie nagrzanymi gruntami, które jeszcze (wiosna) lub już (jesień) nie były porośniętymi roślinnością, a ich temperatura często dorównywała powierzchniom Sezonowo specyficzna pozamiejska SHI wiosną była najbardziej miejskim. skoncentrowana w północno-wschodniej i wschodniej części metropolii, podczas gdy ta występująca jesienią rozprzestrzeniona była w obrębie całego GZM. Tego rodzaju pozamiejskiej SHI praktycznie nie obserwuje się latem (0,1%). Permanentna SHI również zajmuje niewielki obszar, zaledwie 0,4% powierzchni GZM, w związku z czym można stwierdzić, że pozamiejska SHI jest zjawiskiem występującym głównie zimą, oraz wiosną i jesienią. Zarówno permanentną jak i sezonowo specyficzną pozamiejską

SHI pokrywają przede wszystkim tereny rolne (od 66,4% do 96%), z czego w największym stopniu nienawodnione grunty orne, których w GZM jest najwięcej.



Rycina. 12. Rozkład permanentnej i sezonowo specyficznej pozamiejskiej SHI w GZM Wyjaśnienia: W nawiasach przedstawiono udział wskaźników w powierzchni GZM

Zgodnie z moją wiedzą, przeprowadzone badania nad sezonowo specyficzną i permanentną SHI nie były dotychczas prezentowane w literaturze. Prezentowane wyniki badań nad sezonowo specyficzną i permanentną SHI stanowią nowe podejście, zastosowane dotychczas jedynie w odniesieniu do GZM.

6. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej rozprawie doktorskiej zaprezentowałam wyniki moich badań, które, według mojej opinii, są najważniejsze w kontekście analizy struktury przestrzennej powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła, a także powierzchniowej wyspy chłodu w Górnośląsko–Zagłębiowskiej Metropolii (GZM), przeprowadzonej na podstawie obrazów satelitarnych Landsat.

Przeprowadzone badania wykazały, że powierzchniowa miejska wyspa ciepła (SUHI) w GZM posiada strukturę archipelagu niezmiennie od 1986 roku i w każdym sezonie. Jest to bezpośredni skutek policentrycznej struktury urbanistycznej metropolii, która już w latach 90 tych stanowiła silnie rozwinięty ośrodek miejski.

Miejska wyspa chłodu (SCI) zidentyfikowana w GZM, wyłącznie latem posiada mniej spójną strukturę. SCI w GZM stanowi głównie roślinność, która jest bardziej podatna na zmienne warunki meteorologiczne niż powierzchnie miejskie. Potwierdza to fakt, że opad występujący przed rejestracją jednego z obrazów satelitarnych przyczynił się do osłabienia zdolność chłodzącej roślinności, zwłaszcza w przypadku lasów iglastych. W efekcie zmienność zasięgu przestrzennego SCI (12-19%) w GZM była większa niż w przypadku SUHI.

Zasięg SUHI ograniczonej przez typ pokrycia terenu (LCL SUHI) w GZM nie zmieniał się znacząco w czasie obejmując około 13 - 14% powierzchni GZM latem w okresie 2013 – 2019. W kolejnych sezonach zasięg LCL SUHI był mniejszy osiągając 9% wiosną oraz 7% zimą i jesienią. Sezonowa zmienność SUHI była wynikiem współdziałania kilku czynników, głównie czynnika astronomicznego (długość dnia warunkująca czas dopływu promieniowania słonecznego do powierzchni gruntu), oraz rocznego cyklu rozwoju roślinności, który znacząco wpływał na rozkład LST w każdym z sezonów. Jednakże, struktura SUHI zimą zależała przede wszystkim od rozkładu pokrywy śnieżnej, który był związany z topografią GZM.

Nawet do 2.9% powierzchni letniej SHI w GZM stanowiły silnie nagrzane grunty zlokalizowane poza obszarem miejskim. Kolejne przeprowadzone badania (publikacja nr 2), w szczególności analizy kompozycji SHI wykazały, że tereny rolne stanowiły od 8 do 17% SHI w czerwcu oraz od 14 do 36% SHI w lipcu. W sierpniu tereny rolne stanowiły nawet 69% powierzchni SHI, ze względu na silnie nagrzane grunty orne po żniwach, których temperatura przewyższała temperaturę obszarów miejskich. Powyższe

wnioski zmotywowały mnie do analizy sezonowej zmienności SHI zarówno w obszarach miejskich, jak i pozamiejskich (publikacja nr 3). Wyniki pokazały, że **jesienią i zimą pozamiejska SHI była większa o około 1% od miejskiej SHI**. Przeprowadzone analizy pokazują, że zastosowanie jedynie kryterium termicznego do wydzielenia miejskiej wyspy ciepła nie jest wystarczające i może prowadzić do przeszacowania jej powierzchni w mieście na skutek włączenia terenów rolnych, których LST bywa porównywalna z LST powierzchni nieprzepuszczalnych. Tereny rolne nie powinny być utożsamiane z miejską wyspą ciepła dlatego przeprowadzone badania potwierdziły zasadność wprowadzenia wskaźnika LCL SUHI.

Analiza kompozycji miejskiej SHI wykazała, że ponad 80% jej powierzchni w każdym sezonie stanowiła zabudowa miejska luźna oraz tereny przemysłowe i handlowe. Natomiast proporcje udziału tych powierzchni w miejskiej SHI zmieniały się sezonowo w ślad za rozwijającą się roślinnością oraz nawiązując do funkcjonowania miejskiego metabolizmu. **Mimo, że udział zabudowy zwartej i hałd w powierzchni GZM był niewielki (wspólnie około 1,1%) to ich potencjał do rozwoju SHI był bardzo wysoki.** Tereny rolne stanowiły od 67% (zimą) do 97% (jesienią) pozamiejskiej SHI przez cały rok, a **nienawadniane grunty orne stanowiły formę pokrycia terenu, która w największym stopniu kształtowała zasięg przestrzenny pozamiejskiej SHI.**

W niniejszej pracy raz pierwszy zaproponowano wskaźnik po przedstawiający zasięg sezonowo specyficznej SHI, która występuje tylko i wyłącznie w danym sezonie. Sezonowo specyficzna miejska SHI w GZM była największa zimą i latem (ok. 2% GZM), natomiast wiosną i jesienią stanowiła mniej niż 1% powierzchni GZM. Powyżej 47% jej powierzchni zlokalizowane było w obrębie zabudowy miejskiej luźnej w każdym sezonie. Z kolei sezonowo specyficzna pozamiejska SHI pojawiała się głównie zima, wiosną oraz jesienia, a ponad połowe jej powierzchni zawsze pokrywały nienawadniane grunty orne. SUHI jest uznawana za zjawisko negatywne w skali lokalnej dla mieszkańców miast jedynie w sezonie letnim, natomiast zimą jej wpływ na warunki życia w mieście jest oceniany pozytywnie. Należy jednak pamiętać, że w świetle współczesnego ocieplenia negatywne skutki SUHI mogą w przyszłości występować również wiosną i jesienią, ponieważ już obecnie obserwuje się występowanie dni upalnych w sezonach przejściowych (Wibig, 2020; Twardosz i in., 2021). Z perspektywy mieszkańców miast szczególne znaczenie ma sezonowo specyficzna miejska SHI występująca latem, ponieważ w głównej mierze zlokalizowana jest na terenach zabudowy miejskiej (>78.1%). Z kolei identyfikacja sezonowo specyficznej pozamiejskiej SHI, którą w przeważającej części stanowią grunty uprawne, może być pomocna, np. przy lokalizowaniu obszarów wymagających intensywnego nawodnienia lub zastosowania innych zabiegów pielęgnacyjnych.

W pracy zaprezentowano także po raz pierwszy permanentną SHI i permanentną SCI, które uważam za szczególnie ważne w niniejszych badaniach. Wskaźniki te wyznaczają obszar permanentnie występującej SHI i SCI w GZM, niezależnie od zmiennych warunków meteorologicznych oraz zmian zagospodarowania terenu w analizowanym okresie. Permanentna SHI i SCI wyznaczona w publikacji nr 1 dla okresu 2013–2019 zajęła odpowiednio 9% i 3,6% powierzchni GZM latem, co pokazuje znaczną dysproporcję w przestrzennym zasięgu tych zjawisk. Gminy charakteryzujące się największym odsetkiem permanentnej SHI (Świętochłowice czy Chorzów) odznaczały się brakiem lub niewielkim odsetkiem permanentnej SCI, co pokazuje, że większość gmin GZM nie dysponuje odpowiednią powierzchnią stabilnej SCI, która mogłaby skutecznie łagodzić najbardziej intensywną SHI. Permanentna SHI wyznaczona na podstawie znacznie szerszego zakresu czasowego (1986–2021) objęła 0.85% powierzchni GZM latem, przy czym połowa jej powierzchni zlokalizowana była w czterech gminach stanowiących rdzeń GZM (Katowice, Dąbrowa Górnicza, Sosnowiec, Gliwice). Permanentna miejska SHI stanowiła 3% GZM i była większa od sezonowo specyficznych miejskich SHI, podczas gdy permanentna pozamiejska SHI jest zjawiskiem prawie wyłącznie sezonowym (0.4% powierzchni GZM).

Na skutek zmian zagospodarowania terenu w okresie 1990–2018 wiele naturalnych powierzchni zostało przekształconych w powierzchnie nieprzepuszczalne, które pokrywały się z terenami ekspansji **SUHI od 0,6 do 4,3% w okresie od 1986 do 2021 roku w GZM.** Wzrost LST wszystkich analizowanych typów pokrycia terenu, włączając typy, których powierzchnia uległa znacznemu zmniejszeniu w analizowanym okresie, **świadczy również o wpływie współczesnego ocieplenia na ekspansję SUHI.** Największy wzrost LST w rozpatrywanym wieloleciu zaobserwowano w lipcu podczas trwania fali upałów. **Może to świadczyć o intensyfikacji fal upałów w wyniku globalnego ocieplenia.**

Intensywność SUHI w GZM została określona wyłącznie w sezonie letnim i wyniosła od 5.6°C do 6.5°C według wskaźnika SUHII (tereny miejskie – pozamiejskie) oraz od 7.8°C do 9.4°C według wskaźnika LCL SUHI (LCL SUHI – SCI) w okresie

2013–2019. SUHII była niższa nawet o 2.9°C, ponieważ takie tereny jak parki miejskie zaniżają średnią LST obszarów miejskich a tereny rolne zawyżają średnią LST obszarów pozamiejskich. Czasową zmienność intensywności SUHI zbadano wykorzystując wskaźnik LCL SUHII. Wyniki pokazały, że intensywność SUHI zmniejszyła się nawet o 3.4°C w analizowanym wieloleciu 1986 – 2021 ze względu na większe tempo wzrostu LST na obszarach zidentyfikowanych jako najchłodniejsze (SCI) w porównaniu do obszarów najcieplejszych (SUHI). Roślinność tworząca SCI jest zdecydowanie bardziej wrażliwa na zmiany klimatyczne niż tkanka miejska. W konsekwencji efekt chłodzący roślinności uległ osłabieniu, zwłaszcza podczas dni upalnych, których liczba, zgodnie z prognozami, ma wzrosnąć.

Podsumowując, w niniejszej pracy po raz pierwszy rozpoznano strukturę przestrzenną SUHI o różnym stopniu intensywności w GZM oraz zmodyfikowano wskaźnik Hot Island Area (Zhang i Wang, 2008). Ponadto, szczegółowo rozpoznano strukturę SCI, która w kontekście globalnego ocieplenia i postępującej urbanizacji jest szczególnie istotna z punktu widzenia adaptacji miast do zmian klimatu. Warto dodać, że od czasu opublikowania wyników badań zawartych w publikacji nr 1 coraz więcej uwagi w literaturze poświęca się szczegółowej analizie wysp chłodu, które coraz częściej definiowane są na wzór SCI opublikowanej w tym artykule (prace cytujące publikację nr 1: Qiu i in., 2023; Liu i in., 2024; Rezaei i in., 2024). Określono wieloletnie zmiany zasięgu i kompozycji SUHI w GZM oraz wykazano jej ekspansje w okresie 1986-2021 na skutek wzrostu powierzchni nieprzepuszczalnych w GZM. Co więcej, stwierdzono spadek intensywności SUHI, do którego przyczyniła się susza rolna trwająca od lat 90 tych (Wójcik i in., 2019). Wspomniana susza doprowadziła do osłabienia efektywności chłodzącej wyspy chłodu w analizowanym okresie. Po raz pierwszy zbadano sezonową zmienność struktury zarówno miejskiej jak i pozamiejskiej SHI. Dodatkowo, po raz pierwszy w badaniach związanych z powierzchniową wyspą ciepła wyznaczono zasięg sezonowo specyficznej miejskiej i pozamiejskiej wyspy ciepła, a także permanentnej tzn. niezmiennie występującej przez cały rok w tych samych lokalizacjach.

7. Spis rycin i tabel

Rycina 1. Rodzaj gmin (A) oraz ukształtowanie terenu (B) Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (GZM) na tle województwa śląskiego i Polski

Rycina 2. Rozkład przestrzenny LST w GZM

Rycina 3. Rozkład przestrzenny SHI, LCL SUHI oraz SCI

Rycina 4. Rozkład przestrzenny permanentnej SHI oraz permanentnej SCI

Rycina 5. Zmiany w rozkładzie zagospodarowanie terenu GZM w 2018 roku w stosunku do 1990 roku

Rycina. 6. Rozkład przestrzenny LST (A i B) oraz SHI i LCL SUHI (C i D) w GZM 25 lipca 1994 oraz 29 lipca 2013 roku.

Rycina. 7. Zmiany typu pokrycia terenu w obrębie SHI, SUHIWA i LCL SUHI w rozpatrywanym okresie badawczym.

Rycina. 8. Różnica średniej LST pomiędzy SHI, SUHIWA i LCL SUHI w wybranych do porównania czasowej zmienności datach (A) oraz intensywność SUHI (B)

Rycina. 9. Odchylenia średniej LST klas pokrycia terenu CLC 2018 i LCZ od średniej sezonowej LST (zima – -0,6°C, wiosna – 20,2°C, lato – 30,6°C, jesień – 21,2°C)

Rycina. 10. Rozkład miejskiej i pozamiejskiej SHI w każdym z sezonów w GZM

Rycina. 11. Rozkład permanentnej i sezonowo specyficznej miejskiej SHI w GZM

Rycina. 12. Rozkład permanentnej i sezonowo specyficznej pozamiejskiej SHI w GZM

Tabela 1. Charakterystyka czujników satelitarnych LANDSAT

Tabela 2. Wskaźniki dot. zasięgu wyspy ciepła i wyspy chłodu wykorzystane w poszczególnych publikacjach

8. Bibliografia

Abramowska-Kmon, 2023. Referendalna gra wiekiem emerytalnym – jak odpowiedzieć na wyzwania starzenia się ludności w Polsce. Fundacja im. Stefana Batorego, Warszawa.

Alexander, C., 2020. Normalised difference spectral indices and urban land cover as indicators of land surface temperature (LST). Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 86, 102013.

Alexander C., 2021. Influence of the proportion, height and proximity of vegetation and buildings on urban land surface temperature. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 95, 102265.

Amiri, R., Weng, Q., Alimohammadi, A., Alavipanah, S., 2009. Spatial–Temporal Dynamics of Land Surface Temperature in Relation to Fractional Vegetation Cover and Land Use/Cover in the Tabriz Urban Area, Iran. Remote Sensing of Environment 113 (12): 2606–17.

Angot, M. A., 1896. Résumé des observations météorologiques faites au Bureau Central et a la Tour Eiffel pendant les cinq années 1890–1894 (Summary of meteorological observations made at the central office and the Eiffel Tower during the five years 1890 1894). In Annales du Bureau Central Météorologique du France. Mémoires. 1896. Paris: Gauthier-Villars et Fils.

Artis, D.A., Carnahan, W.H., 1982. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. Remote Sensing of Environment, 12(4), 313–329.

Avdan, U., Jovanovska, G., 2016. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. J. Sens., 1480307.

Azevedo, J., Chapman, I., Muller, C., 2016. Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK: A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature Observations. Remote Sens. 8, 153.

Barsi, J., Schott, J., Palluconi F., Hook, S., 2005. Validation of a Web-Based Atmospheric Correction Tool for Single Thermal Band Instruments. Proceedings of SPIE, vol. 5882.

Basara, J.B., Basara, H.G., Illston, B.G., Crawford, K.C., 2010. The impact of the urban heat island during an intense heat wave in Oklahoma City. Adv. Meteorol.

Baścik, J., Zgud, K. 1984. Ocena warunków klimatycznych zespołu mieszkaniowego na przykładzie osiedla XXX-lecia PRL w Krakowie. Biuletyn Instytutu Kształtowania Środowiska 3-4.

Bednorz, E., Tomczyk, A., 2024. Impact of Euroatlantic blockings on the occurrence of heat waves and cold spells in Poland. Theor. Appl. Climatol., 156:50.

Błażejczyk, A., Błażejczyk, K., Baranowski, J., Kuchcik, M., 2018. Heat stress mortality and desired adaptation responses of healthcare system in Poland. Int. J. Biometeorol., 62, 307–318.

Blażejczyk, K., 2014. Miejska wyspa ciepła w Warszawie: uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne. Warszawa: Wydawnictwo Akademickie Sedno.

Błażejczyk, K., Baranowski, J., Błażejczyk, A., 2015. Wpływ Klimatu Na Stan Zdrowia W Polsce: Stan Aktualny Oraz Prognoza Do 2100 Roku. Wyd, Akademickie SEDNO.

Bokwa, A., Wypych, A., Hajto, M.J., 2018. Role of fog in urban heat island modification in Kraków, Poland. Aerosol and Air Quality Research 18, 178–187.

Buyantuyev, A., Wu, J., 2009. Urban heat islands and landscape heterogeneity: Linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. Landsc. Ecol. 25, 17–33.

Campbell, S., Remenyi, T., White, C., Johnston, F., 2018. Heatwave and health impact research: A global review. Health and Place, 53, 210-218.

Carnahan, W. H., Larson, R. C., 1990. An analysis of an urban heat sink. Remote Sensing of Environment, 33, 65–71.

Chandler, T.J., 1965. The Climate of London, Hutchinson, London, 292 pp.

Crawford, C.J., Roy, D.P., Arab, S., Barnes, C., Vermote, E., Hulley, G., Gerace, A., Choate, M., Engebretson, C., Micijejevic, E., Schmidt, G., Anderson, C., Anderson, M., Bouchard, M., Cook, B., Dittmeier, R., Howard, D., Jenkerson, Kim, M., Kleyians, T., Zahn, S., 2023. The 50-Year Landsat Collection 2 Archive. Science of Remote Sensing, vo. 8, 100103.

Daanen H, Bose-O'Reilly S, Brearley M, Andreas Flouris D, Gerrett NM, Huynen M et al. 2020. COVID-19 and thermoregulation-related problems: practical recommendations. Temperature.1–11. doi:10.1080/23 328940.2020.1790971.

Demuzere, M., Kittner, J., Bechtel, B., 2021. LCZ Generator: a web application to create Local Climate Zone maps. Frontiers in Environmental Science 9:637455.

DeWalle, D.R., McGuire, S.G., 1973. Albedo Variations of an Oak Forest in Pennsylvania. Agricultural Meteorology 11:107–13.

Dousset, B., Gourmelon, F., Laaidi, K., Zeghnoun, A., Giraudet, E., Bretin, P., et al. 2011. Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area. International Journal of Climatology, 31, 313–323.

Duan, S. B., Li, Z. L., Zhao, W., Wu, P., Huang, C., Han, X. J., Gao, M., Leng, G., Shang, G., 2021. Validation of Landsat land surface temperature product in the conterminous United States using in situ measurements from SURFRAD, ARM, and NDBC sites. International Journal of Digital Earth, 14(5), 640-660.

Dushi, M., Berila, A. 2022. Determining the influence of population density on the land surface temperature based on remote sensing data and GIS techniques: application to Prizren, Kosovo. Sci. Rev. Eng. Env. Sci., 31 (1), 47–62.

EEA, 2017 – European Environmental Agency 2017: CLC2018 Technical Guidelines (pdf, data dostępu: 21.10.2021)

EROS, 2017 – Earth Resources Observation and Science Center. Landsat 4-5 Thematic Mapper Level-1, Collection 1 [dataset]. U.S. Geological Survey. (pdf, data dostępu: 15.12.2024)

Estoque, Ronald C., Yuji Murayama, i Soe W. Myint. 2017. Effects of Landscape Composition and Pattern on Land Surface Temperature: An Urban Heat Island Study in the Megacities of Southeast Asia. Science of The Total Environment 577:349–59.

Fastl, C., Arnberger, A., Gallistl, V., Stein, V.K., Dorner, T.E., 2024. Heat vulnerability: health impacts of heat on older people in urban and rural areas in Europe. Wien Klin Wochenschr 136, 507–514.

Fortuniak, K., 2003. Miejska wyspa ciepła: podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne. Łódź: Wydaw. UŁ.

Fortuniak, K., 2019. Badania klimatu miast w Polsce. Prz. Geogr. 1-2, 72–106.

Fortuniak, K., Kłysik, K. 2008. Osobliwości klimatu miast na przykładzie Łodzi. W: K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.) Klimat i bioklimat miast. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 477-488.

Gawuć, L., 2014. Diurnal Variability of Surface Urban Heat Island during a Heat Wave in Selected Cities in Poland in August 2013 by Means of Satellite Imagery. Prace Naukowe PW. Inżynieria Środowiska. 68, 19–34.

Gawuć, 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 J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Rem. Sens. 13, 2716–2728. JSTARS.2020.2989071.

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 Sens., 8, 374.

Geletič, J., Lehnert, M., Dobrovolny, P., 2016. Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities. Remote Sesn., *8*, 788.

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. Build Environ. 156, 21–32.

GUS – Główny Urząd Statystyczny, Bank Danych Lokalnych (dostęp 10.12.2024r.)

GUS, 2024 – Główny Urząd Statystyczny. Polska w liczbach, GUS, Warszawa.

GUS, 2024 – **Główny Urząd Statystyczny**. Sytuacja osób starszych w Polsce w 2023 roku. GUS, Warszawa, Białystok.

Golański, M., 2011. Materiały budowlane jako masa termiczna w budynkach. Przegląd budowlany, 12, s. 88-93.

Gorczyński, W., Kosińska, S., 1916. O temperaturze powietrza w Polsce (z mapami izoterm), Pamiętnik Fizjograficzny, 23.

Goward, S. N., 1981. The thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island. Physical Geography, 2, 19–33.

Guha, S., Govil, H., Dey, A., Gill, N., 2018. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city. Eur. J. Remote. Sens. 51 (1), 667–678

Guo, Y., Gasparrini, A., Armstrong, B., Li, S., Tawatsupa, B., Tobias, A., 2014. Global variation in the effects of ambient temperature on mortality: a systematic evaluation. Epidemiology 25.

Gwozsdz, K., Sobala-Gwozsdz, A., Czakon, P., 2022. Current economic development in the GZ Metropolitan Area: trends and mechanisms. Institute of Urban and Regional Development, Warsaw – Krakow, s. 11 - 29.

Hajto, M., 2009. Badanie czasowo-przestrzennej struktury warunków termicznych terenów miejskich i pozamiejskich na podstawie danych satelitarnych. Prace Geograficzne, 122, 71-79.

Hajto, M., Walawender, J., Struzik, P., 2013. Night-time surface urban heat island in the city of Krakow (Poland) determined with the use of NOAA/AVHRR data. Conference: 2013 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Vienna, Austria.

Han, S., Li, W., , Kwan, M., Miao, C., Sun, B., 2022. Do polycentric structures reduce surface urban heat island intensity? Appl. Geogr. 146, 102766.

Hann, J., 1885. Über den Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land [On the temperature difference between town and country]. Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie, Zeitschrift, 20, 457–462.

Henry, J. A., Dicks, S. E., Wetterqvist, O. F., & Roguski, S. J., 1989. Comparison of satellite, ground-based, and modeling techniques for analyzing the urban heat island. Photographic Engineering of Remote Sensing, 55, 69–76.

Hidalgo-Garcia, D., Arco-Diaz, 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 Soc., 87, 104166.

Howard, L., 1818. The Climate of London, Vol.1, London.

Huang, Q., Huang, J., Yang, X., Fang, Ch., Liang, Y., 2019. Quantifying the seasonal contribution of coupling urban land use types on Urban Heat Island using Land Contribution Index: A case study in Wuhan, China. Sustainable Cities Soc., 44, 666-675.

Hung, T., Uchihama, D., Ochi, S., Yasuoka, Y., 2006. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 8, 34-48.

Imhoff, M.L., Zhang, P., Wolfe, R.E., Bounoua, L., 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. Remote Sens. Environ. 114, 504–513.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32.

Janků, Z., Geletič, J., Lehnert, M., Dobrovolný, P., 2024. The Increase in Urban Heat Due to Global Warming Can be Significantly Affected by the Structure of the Land Use and Land Cover. International Journal of Climatology, 0:1-17.

Jarzyna, K., 2024. Miejska wyspa ciepła w Kielcach w świetle pomiarów naziemnych i zobrazowań satelitarnych. Acta Geographica Lodziensia, 117: 7-18.

Jędruszkiewicz, J., Wibig, J., Piotrowski, P., 2024. Heat waves in Poland: The relations to atmospheric circulation and Arctic warming. Int. J. Climatol., 1-18.

Jędruszkiewicz, J., Zieliński, M., 2012. Land Surface temperature in Lódź obtained from LANDSAT 5TM. Contemporary Trends in Geoscience. 1:1, 21-29.

Klok, L., Zwart, S., Verhagen, H., Mauri, E., 2012. The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. Resour Conserv Recycl. 64, 23–29.

Kłysik, K., 1998b. Struktura przestrzenna miejskiej wyspy ciepła w Łodzi, [w:] Kłysik K. (red.), Klimat i bioklimat miast, Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica, 3, Łódź, s. 385–391.

Kłysik, K., Fortuniak K. 1998. Dobowy i roczny cykl występowania miejskiej wyspy ciepła w Łodzi. Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica 3: 23-32.

Kłysik, K., Fortuniak K., 1999. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland, Atmospheric Environment, 33, s. 3885–3895.

Koczorowska, R., Farat, R. 2006. Specyfika warunków termicznych i wiatrowych aglomeracji poznańskiej (The specificity of thermal and wind condition of Poznań agglomeration). IMGW, Poznań.

Kossowska, U. 1970. Osobliwości klimatu wielkomiejskiego na przykładzie Warszawy. Maszynopis pracy doktorskiej wykonanej w Zakładzie Klimatologii UW; skrót pracy: 1973. Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW 12, Klimatologia 7: 141-185.

Kovats, R., Hajat, S., 2008. Heat stress and public health: A critical review. Annu. Rev. Public Health, 29, 41–55.

Krzysztofik, R., 2014. Encyklopedia województwa śląskiego, t.1. http://ibrbs.pl/mediawiki/index.php/Konurbacja_katowicka (data access 29.12.2022).

Kuchcik, M., Baranowski, J., Adamczyk, A.B., Błażejczyk, K. 2008. The network of atmospheric measures in Warsaw agglomeration. W: K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.) Klimat i bioklimat miast. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 123-128.

Kuchcik, M., Czarnecka, K., Błażejczyk, K., 2024. Urban heat island in Warsaw (Poland): Current development and projections for 2050. Urban Climate, vol. 55, 101901.

Kuchcik, M., Degórski, M., 2009. Heat- and cold-related mortality in the north-east of Poland as an example of the socio-economic effects of extreme hydrometeorological events in the polish lowland. Geogr. P., Vol. 82, No. 1.

Kuchcik, M., Milewski, P., 2016. Miejska wyspa ciepła w Warszawie – próba oceny z wykorzystaniem Local Climate Zones. Acta Geographica Lo-dziensia 104: 21-33.

Landsat Science Team, 2014. USGS-NASA Landsat Science Team Statement on Landsat Continuity: Priorities for a Future Land Imaging Architecture for Sustained Landsat Observations. (pdf, data dostępu 01.01.2025)

Lemus-Canovas, M., Martin-Vide, J., Moreno-Garcia, M., Lopez-Bustins, J., 2020. Estimating Barcelona's metropolitan daytime hot and cold poles using Landsat-8 Land Surface Temperature. Sci. Total Environ., 699, 134307.

Lewińska, J., 1984. Struktura termiczna powietrza nad Krakowem. Biuletyn Instytutu Kształtowania Środowiska 3-4: 46-52.

Lewińska, J., Bartosik, J., Baścik, J., Czerwienie, M., Zgud, K. 1982. Wpływ miasta na klimat lokalny (na przykładzie aglomeracji krakowskiej). Instytut Kształtowania Środowiska, Warszawa: 1-162.

Lewińska, J., Zgud, K., 1980. Wyspa ciepła na tle zespo-łów urbanistycznych Krakowa. Przegląd Geo-fizyczny XXV (XXXIII), 3-4: 283-294.

Li, L., Tan, Y., Ying, S., Yu, Z., Li, Z., Lan, H., 2014. Impact of land cover and population density on land surface temperature: case study in Wuhan, China. J. Appl. Remote Sens., vol. 8, 084993-1.

Lima-Alves, E., 2016. Seasonal and Spatial Variation of Surface Urban Heat Island Intensity in a Small Urban Agglomerate in Brazil. Climate, 4, 61. Liu, F., Liu, J., Zhang, Hong, S., Fu, W., Wang, M., Dong, J., 2024. Construction of a cold island network for the urban heat island effect mitigation. Sci. Total Environ., 915, 169950.

Liu, H., He, B., Gao, S., Zhan, Q., Yang, C., 2023. Influence of non-urban reference delineation on trend estimate of surface urban heat island intensity: A comparison of seven methods. Remote Sensing of Environment, 296, 113735.

Liu, H., Wang, Q., 2008. Seasonal variations in the relationship between landscape pattern and land surface temperature in Indianapolis, USA. Environ. Monit. Assess., 144:199–219.

Liu, K., Su, H., Zhang, L., Yang, H., Zhang, R., Li, X., 2015. Analysis of the Urban Heat Island Effect in Shijiazhuang, China Using Satellite and Airborne Data. Remote Sens., 7, 4804-4833.

Lowry, W.P., 1977. Empirical estimation of urban effects on climate – problem analysis. JApMe 16, 129–135.

Lukeŝ, P., Stenberg, P., Rautiainen, M., Mottus, M., Vanhatalo, K., 2013. Optical properties of leaves and needles for boreal tree species in Europe. Remote Sens. Lett. 4 (7), 667–676.

Ma, W., Zeng, W., Zhou, M., Wang, L., Rutherford, S., Lin, H., Liu, T., Zhang, Y., Xiao, J., Zhang, Y., Wang, X., Gu, X., Chu, C., 2015. The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: an analysis from 66 communities. Environ. Int. 75, 103–109.

Ma, Y., Kuang, Y., Huang, N., 2010. Coupling urbanization analyses for studying urban thermal environment and its interplay with biophysical parameters based on TM/ETM+ imagery. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 12, 110-118.

Macintyre, H., Heaviside, C., Cai, X., Phalkey, R., 2021. The winter urban heat island: Impacts on cold-related mortality in a highly urbanized European region for present and future climate. Environ. Int. 154, 106530.

Majkowska, A., Kolendowicz, L., Półrolniczak, M., Hauke, J., Czarnecki, B., 2017. The urban heat island in the city Poznań as derived from Landsat 5 TM. Theor. Appl. Climatol. 128 (3-4), 769-783.

Majkowska-Juskowiak, A., 2018. Estymacja wpływu pokrycia terenu na rozkład temperatury powierzchni czynnej i powietrza w Poznaniu na podstawie danych satelitarnych Landsat oraz danych pomiarowych. Rozprawa doktorska – manuskrypt, WNGiG, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań.

Martin, P., Baudouin, Y., Gachon, P., 2015. An alternative method to characterize the surface urban heat island. Int. J. Biometeorol., 59, 849–861.

Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., Voogt, J., 2020. Urban Climates and Climate Change. Annu. Rev. Environ. Resour. 2020. 45:411–44.

Matuszek, T., Nowacki, A., Bielecka, M., Jagła, R., 2024. Ocena sezonowej zmienności temperatury powierzchni terenu na obszarze Poznania i powiatu poznańskiego [w:] Kostrzewski, A., (red.), Geoprzestrzeń 8, Wybrane metody badań środowiska geograficznego Polski, Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, s. 37–53.

Mirzaei, M., Verrelst, J., Arbabi, M., Shaklabadi, Z., Lotfizadeh, M., 2020. Urban Heat Island Monitoring and Impacts on Citizen's General Health Status in Isfahan Metropolis: A Remote Sensing and Field Survey Approach. Remote Sens., 12, 1350

MPA, 2018 – Miejski Plan Adaptacji. Plan adaptacji do zmian klimatu 44 miast Polski, 2018, Ministerstwo Środowiska.

Muras, A., 2018. Wpływ zmiany klimatu na zdrowie. Polski Klub Ekologiczny Okręg Mazowiecki, Warszawa.

Nadudvari, A., 2021. The localization of urban heat island in the Katowice conurbation (Poland) using the combination of land surface temperature, normalized difference vegetation index and normalized difference built-up index. Geogr. Pol. 94 (1), 111–130

Oke, T.R., 1973: City size and the urban heat island. Atmospheric Environment, 7, 769–779.

Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. Quarterly journal of the royal meteorological society 108 (455): 1–24.

Oke, T.R., 1995. The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In: Wind Climate in Cities. Cermak, J.E., Davenport, A.G., Plate, E.J. and Viegas, D.X., (eds.), Kluwer Academic, 81–102.

Oke, T.R., 2006. Instruments and observing methods: report no. 81: initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. World Meteorological Organization, WMO/TD, 1250.

Oke, T.R., East, C., 1971. The urban boundary layer in Montréal. Boundary-Layer Meteorology, 1, 411–437.

Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J. A., 2017. Urban Climates. 1. wyd. Cambridge University Press.

Okoniewska, M., 2020. Zagrożenie organizmu człowieka stresem cieplnym występujące w godzinach okołopołudniowych w czasie dni upalnych. Przegląd Geograficzny, 92, 3, 361-376.

Osińska-Skotak, K., Madany, A., 1998. Wykorzystanie danych satelitarnych Landsat TM do określenia warszawskiej wyspy ciepła. Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej - Inżynieria Środowiska, 26, 6-33.

Outcalt, S. I., 1972. A reconnaissance experiment in mapping and modeling the effect of land use on urban thermal regimes. Journal of Applied Meteorology, 11, 1369–1373.

Pongrácz, R., Bartholy, J., Dezső, Z., 2010. Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. Phys. Chem. Earth., 35, 95-99.

Portela, C., Massi, K., Rodrigues, T., Alcantara, E., 2020. Impact of urban and industrial features on land surface temperature: Evidences from satellite thermal indices. Sustainable Cities Soc., 56, 102100.

Półrolniczak, M., Kolendowicz, L., Majkowska, A., Czernecki, B., 2017. The influence of atmospheric circulation on the intensity of urban heat island and urban cold island in Poznań, Poland. Theoretical and Applied Climatology 127, 3-4: 611-125.

Qiu, J., Li, X., Qian, W., 2023. Optimizing the spatial pattern of the cold island to mitigate the urban heat island effect. Ecol. Indic., 154, 110550.

Rakoto, P., Deilami, K., Hurley, J., Amati, M., Sun, Q., 2021. Revisiting the cooling effects of urban greening: Planning implications of vegetation types and spatial configuration. Urban For. Urban Greening, 64, 127266.

Rao, P. K., 1972. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. Bulletin of the American Meteorological Society, 53, 647–648. **Rasul**, A., Balzter, H., Smith, C., 2015. Spatial variation of daytime Surface Urban Cool Island during the season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8. Urban Clim. 14, 176-186.

Reinhart, V., Fonte, C., Hoffmann, P., Bechtel, B., Rechid, D., Boehner, J., 2021. Comparison of ESA climate change initiative land cover to CORINE land cover over Eastern Europe and the Baltic States from a regional climate modeling perspective. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 94, 102221.

Renard, F., Alonso, L., Fitts, Y., Hadjiosif, A., Comby, J., 2019. Evaluation of the Effect of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Islands. Remote Sens. 11, 299.

Renc, A., 2023. WUDAPT Level 0 training data for Katowice-GZM (Poland, Republic of), submitted to the LCZ Generator. This dataset is licensed under CC BY-NC-SA, and more information is available at https://lcz-generator.rub.de/factsheets/8bd3908ac4b0f4dcd52c78d299b1b6561f1a2c0e/8bd3908a c4b0f4dcd52c78d299b1b6561f1a2c0e_factsheet.html

Renou, E., 1868. Différences de température entre la ville et la campagne [Temperature differences between town and country]. Annuaire, Société Météorologique de France, 16, 83–97.

Rezaei, T., Shen, X., Chaiyarat, R., Pumijumnong, N., 2024. Effective cooling networks: Optimizing corridors for Urban Heat Island mitigation. Remote Sens. Appl. Soc. Environ., 36, 101372.

Robine, J., Cheung, S., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J., Herrmann, F., 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. C.R. Biol. 331 (2), 171–U175.

Roth, M., Oke, T.R., Emery, W.J., 1989. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. Int. J. Remote Sens., 10, 1699–1720.

Roxon, J., Ulm, F., Pellenq, R., 2019. Urban Heat Island Impact on State Residential Energy Cost and CO2 Emissions in the United States. Urban Clim. 31, 100546.

Roy, S., Pandit, S., Eva, E., Bagmar, M., Papia, M., Banik, L., Dube, T., Rahman, F., Razi, M., 2020. Examining the nexus between land surface temperature and urban growth in Chattogram Metropolitan Area of Bangladesh using long term Landsat series data. Urban Clim. 32, 100593.

Runnalls, K.E., Oke, T.R., 2000. Dynamics and controls of the near-surface heat island of Vancouver, British Columbia. PhGeo 21, 283–304.

Rysiak, A., Czarnecka, B., 2018. The urban heat island and the features of the flora in the Lublin City area, SE Poland. Acta Agrobotanica, 71(2):1736.

Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., Großmann, K., 2012. Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heatisland indicators an application for the city of Leipzig (Germany). Ecol. Indic. 18, 693–704.

Sfîcâ, L., Crețu, C., Ichim, P., Hrițac, R., 2023. Surface urban heat island of Iași city (Romania) and its differences from in situ screen-level air temperature measurements. Sustain. Cities Soc., 94, 104568.

Shepherd, M., Andersen, T., Strother, C., Horst, A., Bounoua, L., Mitra, C., 2013. Urban Climate Archipelagos: A New Framework for Urban Impacts on Climate. IEEE Earthzine. https://earthzine.org/urban-climate-archipelagos-a-new-framework-forurban-impacts-on-climate/ (dostęp 29.12.2024) **Stathopoulou**, M., Cartalis, C., 2007. Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: an application to major cities in Greece. Sol. Energy. 81 (3), 358–368.

Sobrino, J., Raissouni, N., 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. Int. J. Remote Sens. 21 (2), 353-366.

Sobrino, J., Jimenez-Munoz, J., Soria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., 2008. Land Surface Emissivity Retrieval from different VNIR and TIR sensor. IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 46:2.

Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. Bull. Am. Meteorol. Soc., 93, 1879–1900.

Stewart, I. D., Krayenhoff, E. S., Voogt, J. A., Lachapelle, J. A., Allen, M. A., Broadbent, A. M., 2021. Time evolution of the surface urban heat island. Earth's Future, 9, e2021EF002178.

Sundborg, A., 1950. Local climatological studies of the temperature conditions in an urban area. Tellus, 2, 222–231.

Sypniewska, L., Szyga-Pluta, K., 2018. Zmienność czasowa i zróżnicowanie przestrzenne zachmurzenia w Polsce w latach 2001–2016. Badania Fizjograficzne, r. IX - seria A – geografia Fizyczna (A69), s. 193-213.

Szymanowski, M., 2003. Spatial structure of the urban heat island in Wroclaw, Poland. Proceedings Fifth International Conference on Urban Climate, 1, 151-154.

Szymanowski, M., 2004. Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2690, Studia Geograficzne 77: 1-229.

Szymanowski, M., Kryza, M., 2011. Application of geo-graphically weighted regression for modelling the spatial structure of urban heat island in the city of Wroclaw (SW Poland). Procedia Envi-ronmental Sciences 3: 87-92.

Takahashi, M., 1959. Relation between the air temperature distribution and the density of houses in small cities of Japan. Geographical Review of Japan, 32, 305–313.

Tardy, B., Rivalland, V., Huc, M., Hagolle, O., Marcq, S., Boulet, G., 2016. A software tool for atmospheric correction and surface temperature estimation of Landsat infrared thermal data. Remote Sensing, 8(9), 696.

Terjung, W. H., Louie, S., 1973. Solar radiation and urban heat islands. Annals of the Association of American Geographers, 63, 181–207.

Tsuzuki, K., 2023. Effects of heat exposure on the thermoregulatory responses of young children. J. Therm. Biol., 113, 103507.

Twardosz, R., Walanus, A., Guzik, I., 2021. Warming in Europe: Recent Trends in Annual and Seasonal temperatures. Pure Appl. Geophys. 178, 4021–4032.

USGS, 2019 – United States Geological Survey: Landsat 8 Data Users Handbook. Department of the Interior U.S. Geological Survey, version 5.0. (pdf, data dostępu 27.12.2022).

USGS, 2024 – United States Geological Survey: Landsat 7 Data Users Handbook. Department of the Interior U.S. Geological Survey, version 3.0. (pdf, data dostępu 10.12.2024).

Vatani, L., Hosseini, S., Sarjaz, M., Alavi, S., Shamsi, S., Ghodsi, M., 2019. Tree species effects on canopy albedo in temperate forest plantations: comparing conifers and broadleaf trees. J. Sol. Energy, Vol. 4, No. 3, 188-199.

Voogt, J.A., Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sens. Environ. 8, 370–384.

Walawender, J., 2009. Application of LANDSAT Satellite Data and GIS Techniques for Estimation of Thermal Conditions in Urban Area (Using an Example of Kraków Agglomeration). Prace Geograficzne, IGiGG. 122, 81–98.

Walawender, J., Hajto, M., Iwaniuk, P., 2011. Application of single-channel algorithm for mapping land surface temperature based on Landsat satellite data. Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej. Annals of Geomatics 9 (4), 139–150.

Walawender, J., Szymanowski, M., Hajto, M., Bokwa, A., 2014. Land Surface Temperature Patterns in the Urban Agglomeration of Krakow (Poland) Derived from Landsat-7/ETM+ Data. Pure Appl. Geophys. 171, 913–940.

Walczewski, J., 2005. Meteorologiczne i klimatyczne warunki rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza. Przegląd Geofizyczny. 50 (3-4), 177-193.

Wang, C., Ren, Z., Chang, X., Chang, X., Wang, G., Hong, X., Dong, Y., Guo, Y., Zhang, M., Wang, W., 2023. Understanding the cooling capacity and its potential drivers in urban forests at the single tree and cluster scales. Sustain. Cities Soc., 93, 104531.

Wang, J., Huang, B., 2015. Future urban climatic map development based on spatiotemporal image fusion for monitoring the seasonal response of urban heat islands to land use/cover, The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning, first ed., Routledge, New York, NY, USA.

Ward, K., Lauf, S., Kleinschmit, B., Endlicher, W., 2016. Heat waves and urban islands in Europe: A review of relevant drivers. Sci. Total Environ. 569–570, 527–539.

Wawer, J., 1995. Wpływ warunków pogodowych na intensywność miejskiej wyspy ciepła w Warszawie. W: K. Kłysik (red.) Klimat i bioklimat miast. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 71-78.

Wawer, J., 1997. Miejska wyspa ciepła w Warszawie. Prace i Studia Geograficzne 20: 145-197.

Weng, Q., Lu, D., Schubring, J., 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sens. Environ. 89:4, 467-483.

Wibig, J., 2020. Współczesne zmiany klimatu - obserwacje, przyczyny, prognozy. In Burchard-Dziubińska, M., Prandecki, K., (Eds.), Zmiana klimatu - skutki dla polskiego społeczeństwa i gospodarki, Warsaw, Polska Akademia Nauk, pp.14-36.

Wójcik, G., Marciniak K., 1984. Zróżnicowanie stosunków termicznych na obszarze Torunia. Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji nt. Klimat i bioklimat miast, Łódź, 22-24 listopada 1984 r. Uniwersytet Łódzki, Łódź: 100-106.

Wójcik, I., Doroszewski, A., Wróblewska, E., Koza, P., 2019. Susza rolnicza w uprawie zbóż jarych w Polsce w latach 2006-2017. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 19, 77-95.

Wu, X., Zhang, L., Zang, S., 2019. Examining seasonal effect of urban heat island in a coastal city. PLoS ONE. 14 (6), e0217850.

Xi, Y., Wang, S., Zou, Y., Zhou, X., Zhang, Y., 2024. Seasonal surface urban heat island analysis based on local climate zones. Ecol. Indic., 159, 111669.

Yang, C., Yan, F., Lei, X., Ding, X., Zheng, Y., Liu, L., Zhang, S., 2020. Investigating Seasonal Effects of Dominant Driving Factors on Urban Land Surface Temperature in a Snow-Climate City in China. Remote Sens., 12, 3006.

Yao, R., Wang, L., Huang, X., Gong, W., Xia, X., 2019. Greening in rural areas increases the surface urban heat island intensity. Geophys. Res. Lett. 46, 2204–2212.

Yu Q., Acheampong M., Pu R., Landry S.M., Ji W., Dahigamuwa T., 2018. Assessing effects of urban vegetation height on land surface temperature in the City of Tampa, Florida, USA. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 73, 712–7.

Zhang, H., Qi, Z. F., Ye, X. Y., Cai, Y. B., Ma, W. C., Chen, M. N., 2013. Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China. Applied Geography, 44, 121–133.

Zhang, J.Q., Wang, Y.P., 2008. Study of the relationships between the spatial extent of surface urban heat islands and urban characteristic factors based on Landsat ETM plus data. Sensors 8. 7453–7468.

Zhang, Y., Yu, T., Gu, X., Zhang, Y., Chen, L., 2006. Land surface temperature retrieval from CBERS-02 IRMSS thermal infrared data and its applications in quantitative analysis of urban heat island elect. Journal of Remote Sensing-Beijing, 10(5), 789.

Ziter, C.D., Pedersen, E.J., Kucharik, C.J., Turner, M.G., 2019. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 116, 7575.

III. Publikacje wchodzące w skład rozprawy doktorskiej

Ecological Indicators 142 (2022) 109181



Original Articles

Spatial structure of the surface heat and cold islands in summer based on Landsat 8 imagery in southern Poland



Aleksandra Renc, Ewa Łupikasza^{*}, Małgorzata Błaszczyk

Faculty of Natural Sciences, Institute of Earth Sciences, University of Silesia in Katowice, Będzińska 60, Sosnowiec 41-200, Poland

ARTICLE INFO

Keywords: SUHI Surface cold island Radiative temperature Land cover Remote sensing

ABSTRACT

The intense development of cities and related replacement of vegetated areas with impervious surfaces contributed to the intensification of the urban heat island effect, which is a hazardous phenomenon for humans. In this study, the spatial structure of the surface heat and cold island (SHI and SCI, respectively) in the Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis (GZM), the most urbanized and populated area in Poland, is investigated using four Landsat 8 satellite images recorded in the summers between 2015 and 2019. The satellite images processed to the land surface temperature (LST) and the Corine Land Cover 2018 (CLC 2018) classification were used to calculate indicators of the spatial extent and intensity of SHI and SCI. Their spatial extents in the GZM ranged from 15.4 to 16.4% and 12.2-19.4%, respectively, depending on the analyzed days with a large percentage of the agricultural areas within the SHI boundaries. Therefore, an original approach to delineate the surface urban heat island (SUHI) is proposed. This approach reduced the extent of the GZM SHI by 2.9 to 2.0%, depending on the day. In the GZM, more than 70% of the SHI consisted of discontinuous urban fabric and industrial or commercial units. Heat island indices recognized the spatial structure of SUHI as an archipelago. Vegetation and crops constituted 90% of the SCI, and these land cover types explained most of the SCI variability over time compared to the SHI. The vegetation expanded, and its characteristics continually changed during the summer season. Moreover, vegetation was more sensitive to changes in meteorological conditions than impervious surfaces. The LST was most strongly correlated with the percentage share of artificial areas in the GZM districts. In turn, the correlations between LST and forest and semi natural areas were much weaker when precipitation occurred before the recording of satellite images. The intensity of SUHI in the GZM ranged from approximately 5 to 9 °C depending on the date and the method of identifying urban and nonurban areas.

1. Introduction

Currently, more than half of the global population lives in cities, and it is predicted that by 2050, as much as 68% of the population will live in urban areas (United Nations, 2019). Urbanization will further increase city infrastructure and thus the area of impervious surfaces, mostly at the expense of vegetation areas (Amiri et al., 2009), which provide evapotranspiration cooling and shading (Ibrahim, 2017; Renard et al., 2019). The materials used to design urban surfaces have a low albedor and high heat capacity (Oke, 1982); therefore, they heat much faster than most natural surfaces. This effect is particularly hazardous in summer during the occurrence of heat waves. Due to climate change, extreme heat waves will become more frequent and further strengthen the urban heat island (UHI) effect in cities (Alexander, 2020; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). The negative consequences of UHI occurrence include a reduction in labor productivity and increased hospitalization and mortality (Klok et al., 2012), particularly in combination with heatwaves due to air temperature-sensitive diseases (Shahmohamadi et al., 2011). In France, a 0.5 °C increase in surface urban heat island (SUHI) intensity could double the mortality rate (Dousset et al. 2011). Moreover, the increase in temperature in the city results in an increase in costs for municipal authorities and in CO₂

 \ast Corresponding author.

https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109181

Received 17 February 2022; Received in revised form 11 July 2022; Accepted 15 July 2022 Available online 29 July 2022

Abbreviations: GZM, Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis; CLC, Corine Land Cover; L8, Landsat 8; LST, Land surface temperature; NDVI, normalized difference vegetation index; UHI, urban heat island; SUHI, surface urban heat island; SHI, surface heat island; SCI, surface cold island; SUHII, surface urban heat island intensity; LCL SUHI, land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, strong land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, extreme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, extreme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, extreme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, extreme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, extreme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, extreme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI₂, streme land cover limited surface urban heat island; LCL SUHI

E-mail address: ewa.lupikasza@us.edu.pl (E. Łupikasza).

¹⁴⁷⁰⁻¹⁶⁰X/© 2022 The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Ecological Indicators 142 (2022) 109181



Fig. 1. Location of the GZM (A) on the background of the Silesian voivodeship and country (B).

emissions due to increased electricity consumption for air conditioning (Akbari et al., 1997; Renard et al., 2019).

Two basic types of urban heat island are distinguished: atmospheric (UHI) and surface (SUHI) urban heat island. UHI is determined by the air temperature, while SUHI is identified based on the land surface temperature (LST) obtained from remote sensing sensors (Voogt and Oke, 2003). A satellite sensor measures surface temperature by recording the radiation emitted by the surface in its instantaneous field of view (IFOV) (Stathopoulou and Cartalis, 2007). Air temperature and LST are two different indicators; however, since LST affects the air temperature in the near-ground layer of the atmosphere (Walczewski, 2005), studies on SUHI are a valuable source of information about UHI (Voogt and Oke, 2003; Weng et al., 2004; Walawender, 2009). Satellite thermal images can deliver LST data, unlike point data from traditional instrumental measurements, thus allowing the phenomenon to be studied from a spatial perspective (Walawender et al., 2011). Moreover, remote sensing data allow the accurate and more detailed identification of heat islands within a dense urban structure compared to instrumental data (Schwarz et al., 2012).

The majority of studies focusing on the spatial structure and intensity of SUHIs have indicated that the highest LSTs are located in densely built-up and industrial areas, while the lowest LSTs are located in vegetation and water areas (Majkowska et al., 2017; Guha et al., 2018; Geletic et al., 2019; Alexander, 2020). Of all land cover classes, impervious surfaces (such as roofs, concrete and mixed asphalt) were recognized to have the most significant impact on SUHI development (Liu et al., 2015). The contributions of the tree and building areas accounted for as much as 68% of LST variability (Alexander, 2020). This result indicates it is possible to regulate urban LST by modifying these land cover types even though the heating effect of artificial surfaces is always stronger than the cooling effect of vegetation (Liu et al., 2021). Yao et al. (2017) proved that the decreasing vegetation coverage contributed to the increasing intensity of SUHI in Chinese cities on summer days. However, research on factors mitigating the consequences of SUHI in the city has been inconclusive. Li et al. (2011) suggested that urban greenery scattered between different land cover types has a stronger SUHI mitigation effect than does compacted greenery. In contrast, Geletic et al. (2019) indicated that a large patch of green has a stronger cooling effect than do several smaller patches.

A few studies have focused on cold islands extending across city boundaries to determine how vegetation reduces LST and mitigates the effects of SUHIs (Geletic et al., 2019; Alexander 2021; Liu et al.; 2021). The difference between hot and cold zones in Arhus city (Denmark) was found to provide a better estimate of SUHI intensity than the difference between urban and nonurban areas, especially when agricultural areas with LST similar to that in the city largely contribute to nonurban areas. Jędruszkiewicz and Zieliński (2012) also found hot spots in the outskirts (airport areas) of Łódź (Poland), while forests and forest parks usually constituted cold spots. The highest LST in nonurban areas was also found in Erbil (Iraq) (Rasul et al., 2015). However, in semiarid cities, in contrast to the towns with subtropical and temperate climates, surface urban cold island is located in cities, especially in the dry season.

Although the UHI in Polish cities has been frequently studied (Ktysik and Fortuniak, 1999; Bokwa, 2010; Półrolniczak et al., 2017), only a few studies are based on satellite data (Hajto et al., 2006; Walawender et al., 2014; Gawuć 2014; Majkowska et al.; 2017, Nadudvari, 2021). These studies indicated that in Polish cities, the intensity of SUHI varies between 0.8 °C and 2.4 °C (Gawuć, 2014); however, in extreme cases, the differences between coldest and warmest LST may exceed 6 °C (Hajto et al. 2006, Majkowska et al., 2017).

This study aimed to determine the spatial structure of surface heat island (SHI), SUHI and the surface cold island (SCI) in the Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis (GZM) and to identify the areas most exposed to intense SUHI using Landsat 8 (L8) satellite images. To explain the

Table 1 Basic information about the L8 images used in this study.

Date	Time (UTC)	Path/Row	Sun Elevation	Sun Azimuth	Cloud cover (%)	Clear pixels within GZM
29/07/2013	09:40:37	189/25	55.25	148.96	0.88	2,837,089
03/07/2015	09:38:03	189/25	59.24	145.94	3.14	2,837,089
22/06/2017	09:38:22	189/25	59.88	146.62	3.37	2,837,089
12/06/2019	09:38:26	189/25	59.81	147.78	3.16	2,808,448

distribution of the LST, SHI and SCI in the GZM, their relationship to land cover type using the Corine Land Cover 2018 (CLC 2018) classification was also investigated. Moreover, the study proposes an original approach to calculate the intensity of SUHI. Even though the GZM is one of the most urbanized areas in Poland, the UHI has not been addressed here thus far, while the SUHI was discussed only for four GZM cities (Nadudvari, 2021). The GZM is a particularly interesting area with respect to SUHI research due to its structure, with cities located in the immediate vicinity and little or no peripheral areas. Such a spatial structure distinguishes the GZM from other monocentric cities in Poland.

2. Materials and methods

2.1. Study area and data

The GZM is located in southern Poland in the central part of the Silesian voivodeship (Fig. 1). The GZM covers approximately 2,533 km² and was inhabited by 2,230,000 people in 2020. This means that almost half of the inhabitants of Silesia voivodeship (49.4%) live in the GZM, which occupies only 20.7% of the voivodeship area. The population density is 863 people/km² (https://infogzm.metropoliagzm.pl/). The GZM consists of 41 districts, 26 of which are urban districts located in the immediate vicinity with weak or non-existing peripheral areas. GZM is a polycentric agglomeration with economic and infrastructural interconnectedness with the country's highest urbanization rate of 76.5% for the Silesian voivodeship versus 60% for Poland (Statistics Poland, 2021).

The central part of the GZM is mostly covered by impervious surfaces such as discontinuous urban fabric and industrial or commercial units. Additionally, in the center of the GZM, there is little greenery and few water bodies. According to the CLC classification in GZM, anthropogenic areas increased by approximately 4% between 1990 and 2018. The altitude of the GZM varies between approximately 180 m above sea level (a.s.l.) in the south and southwest to approximately 400 m a.s.l. in its northeastern part. According to the Köppen-Geiger classification (Peel et al., 2007), the climate of the research area is classified as humid continental (Dfb) with warm summers and precipitation year round. The average annual air temperature reaches approximately 7.9 °C (1961–1990 Katowice – Muchowice station), with the maximum in July (17.9 °C) and the minimum in January (-2.7 °C). The average annual

Т	able	2	
			60.01

precipitation amounts to approximately 724 mm.

This study uses L8 satellite images (Landsat Collection 1 Level-1) that were obtained from the United States Geological Survey (USGS) (<u>https://earthexplorer.usgs.gov/</u>). It was possible to select 4 images with no clouds or low cloud cover (<5%) over the GZM for the summer months (June or July) between 2013 and 2020 (Table 1). The size of the L8 scene is 185×180 km, and its revisit time is 16 days. L8 is equipped with an Operational Land Imager (OLI) and a Thermal Infrared Sensor (TIRS). The OLI sensor records images in 8 spectral bands with a spatial resolution of 30 m and one panchromatic band with a spatial resolution of 15 m (https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8).

The TIRS sensor records images of the land surface in two thermal bands with a spatial resolution of 100 m but is provided to users with a spatial resolution of 30 m (<u>https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-oli-operational-land-imager-and</u>). The processed images were already geographically referenced using the WGS1984, 34 N UTM projection. Pixels with low cloudiness found in the southern and western parts of the GZM in the image from 12/06/2019 were manually removed.

To describe the weather conditions on days when satellite images were recorded, we used meteorological data from the Katowice – Muchowice synoptic station (50.24° N; 19.03° E) located in the central part of Katowice (Fig. 1). The data included air temperature, sea level pressure, wind speed and direction, cloudiness, and precipitation. The synoptic situation on the analyzed days was described based on weather maps available at https://www1.wetter3.de/.

The data on land cover, created based on Sentinel 2 and L8, were downloaded from the Copernicus Land Monitoring Service website (https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018? tab=download). The minimum mapping unit (MMU) is 25 ha (250 000 m2), and the minimum feature width is 100 m, with the accuracy of an RMS error below 25 m. Moreover, CLC mapping is done with the participation of local experts (EEA, 2017).

2.2. Land surface temperature

The accurate estimation of the LST requires implementing atmospheric correction and emissivity of various surfaces. The atmosphere affects the thermal radiation received by satellite sensors, making the precise measurement of the LST difficult (Renard et al., 2019). Further, ignoring the differences in emissivity of various land covers leads to

Full name	Abbreviation	Definition	Description
Surface Cold Island	SCI	$LST < \mu\text{-}1\delta$	Standard indicator used in the literature. Consists of all areas colder than the defined threshold regardless of land cover type.
Surface Heat Island	SHI	$LST > \mu + 1\delta$	Standard indicator used in literature. Covers all areas warmer than the defined threshold regardless of land cover type.
Surface Urban Heat Island Intensity	SUHII	LST _{urban} – LST nonurban	Calculated as difference between average LST for the entire area within the borders of an urban area regardless of LST threshold and average LST calculated for nonurban areas. This method is widely used in a literature.
Land Cover Limited Surface Urban Heat Island	LCL SUHI ₁ LCL SUHI ₂ LCL SUHI ₃	$\begin{split} LST > \mu + 1\delta \\ LST > \mu + 2\delta \\ LST > \mu + 3 \ \delta \end{split}$	LCL SUHI includes only artificial areas according to CLC 2018. Lower cases in symbols indicate the strength of heat island and hereafter are called: 1 – LCL SUHI, 2 – strong LCL SUHI, 3 – extreme LCL SUHI
Land Cover Limited Surface Urban Heat Island Intensity	LCL SUHII	LST _{LCL SUHI} – LST _{non-LCL SUHI}	Calculated as difference between average LST for LCL SUHI1 and average LST for non-LCL SUHI1 also located within the borders of urban areas

Explanation: μ – mean of LST, δ – standard deviation of LST.

Ecological Indicators 142 (2022) 109181



Fig. 2. Spatial distribution of LST in the GZM. The white spots in the image on 12/06/19, indicate removed pixels that were covered by cloud cover.

errors in actual LST (Stathopoulou and Cartalis, 2007).

To assess the LST, the brightness temperature in Kelvin was calculated using PCI Geomatica software and the ATCOR module, accounting for atmospheric correction. Then, based on the normalized difference vegetation index (NDVI) calculated, the emissivity of the different land surface was estimated (Sobrino et al., 2008; Wang et al., 2015):

$$NDVI = \frac{NIR(band 5) - RED(band 4)}{NIR(band 5) + RED(band 4)}$$
(1)

where NIR represents the near-infrared spectral band (band 5 for L8), and RED represents the red spectral band (band 4 for L8). The fractional vegetation (F_V) needed to estimate the emissivity, was calculated:

$$F_{V} = \left(\frac{NDVI - NDVI_{s}}{NDVI_{v} - NDVI_{s}}\right)^{2}$$
(2)

where NDVIs and NDVIv represent the NDVI values for soil (NDVIs = 0.2) and healthy vegetation (NDVIv = 0.5), respectively. The adopted NDVI values were proposed by Sobrino and Raissouni (2000) and have been commonly used in many studies (e.g., Majkowska et al., 2017; Guha et al., 2018; Alexander, 2021).

The emissivity values of 0.99, 0.96 and 0.99 were attributed to the pixels with NDVI < 0, between 0.0 and 0.2, and >0.5, respectively. To properly distinguish pixels composed of different types of land cover (mixed pixels, $0.2 \le NDVI \le 0.5$), we used Formula (3) after Sobrino et al. (2008), which is a simplified version of Formula (4) (Sobrino and Raissouni, 2000; Sobrino et al., 2008):

$$\varepsilon = 0.986 + 0.004 * F_v,$$
 (3)

$$\varepsilon = \varepsilon_{\rm v} F_{\rm v} + \varepsilon_{\rm s} (1 - F_{\rm v}) + C_{\lambda} \tag{4}$$

where ε_v and ε_s are the vegetation emissivity and soil emissivity, respectively; F_v is fractional vegetation; and *C* represents the surface roughness taking a constant value of 0.005 (for flat surfaces, it is 0). Estimating the emissivity based on NDVI thresholds (Sobrino and Raissouni, 2000) is a widely used method of the emissivity of Landsat images due to its applicability and simplicity of estimation (Roy et al., 2020), even for urban LST estimation. Compared to other methods, it does not require a thermal band or a night-time image (Walawender et al., 2014). The emissivity values for bare land/soil/impervious surfaces (i.e., for pixels with NDVI values of 0.0–0.2) are set at 0.96. The urban areas (in this study above 70% pixels with NDVI values of 0.2–0.5) are not a

Table 3 Descriptive statistics of LST(°C) for the GZM

been prive statistics of 161 (6) for the 62.44.							
Data	Min	Q1	Median	Q3	Max	Range	$Mean\pm 1\delta$
29/07/2013	27.9	36.8	39.0	42.0	72.6	44.7	39.7 (±4.1)
03/07/2015	18.8	31.0	33.9	37.0	84.9	66.1	34.6 (±4.1)
22/06/2017	17.9	29.7	32.9	36.9	61.4	43.5	33.5 (±4.7)
12/06/2019	22.8	32.9	35.7	38.9	63.4	40.6	36.1 (±4.4)

Explanation: Min – minimum, Q1 – first quartile, Q3 – third quartile, Max – maximum, range – different between maximum and minimum, δ – standard deviation. The highest values are bolded.

Table 4

Meteorological parameters of the study days at the Katowice - Muchowiec station at 9:00 and 10:00 UTC.

0 1							
Data H	Hour (UTC)	Ν	V (m/s)	D	T (°C)	P (hPa)	R (mm)
29/07/2013	9:00	0	2	SSE	31.9	1011.5	-
1	10:00	0	3	SE	32.9	1011.1	-
03/07/2015	9:00	0	4	Е	25.3	1027.8	-
1	10:00	1	4	ESE	25.7	1027.8	-
22/06/2017	9:00	3	2	W	23.9	1014.9	-
1	10:00	3	4	WSW	24.8	1014.6	-
12/06/2019	9:00	2	3	SE	27.9	1012.2	-
1	10:00	2	4	SE	29.0	1011.8	-

Explanation: N-overall cloud cover, V-wind speed, D-wind direction, T-temperature, P-atmospheric pressure, R-rainfall, E-east, W-west, SE-southeast, SSE-south-southeast, ESE-east-southeast, WSW-west-southeast.

homogeneous surfaces which justify the use of a simplified version of formula 4 (formula 3) to assign them emissivity.

Next, the LST in Kelvin (LST) was calculated following (Stathopoulou and Cartalis, 2007; Weng et al., 2004):

$$LST = \frac{BT}{\left\{1 + \left[\left(\frac{\lambda BT}{\frac{h}{2}}\right)\ln\varepsilon\right]\right\}}$$
(5)

2.3. Corine land cover data processing (5)

temperature in K to degrees Celsius.

where BT is the brightness temperature in Kelvin, λ is the wavelength of emitted radiance (taken as 10.8 μ for band 10 in L8), h is Planck's constant (6.626 $\times 10^{-34}$ J s), c is the velocity of light (2.998 $\times 10^8$ m/s), σ is

The CLC 2018 is a 3-level hierarchical classification system that includes five main categories of land cover types, including artificial surfaces, agricultural areas, forest and semi natural areas, wetlands, and water bodies, which are finally divided into 44 land cover classes (EEA, 2017). Twenty-two of them were identified within the GZM area. The

the Boltzmann constant (1.38×10⁻²³ J/K), and ϵ is the surface emis-

sivity. To obtain the final LST product, we transformed the surface



Fig. 3. Land cover map for the GZM according to the CLC 2018 classification. The map shows three LST profiles designated as A-A', B-B' and C-C'.



Fig. 4. Boxplot of LST for land cover class according to the CLC 2018 classification for analyzed term in chronological order (07/29/2013; 07/03/2015; 06/22/2017; 06/12/2019). The black lines and gray lines represent median and mean values, respectively. The boxes represent the 25th to the 75th percentile, and the whiskers correspond to the minimum and maximum values.

term "type" refers to five main groups of land cover types (e.g., artificial areas), which include specific land cover "classes" (e.g., industrial or commercial units). To analyze the LCL SUHI (land cover limited surface urban heat island, defined in subsection 2.4) within the boundary of

urban areas, all classes of artificial surface areas were separated. The remaining land cover types, such as agricultural areas, forest and semi natural areas, and water bodies, were combined into a layer of nonurban areas. The beaches, dunes and sand class in forest and semi natural areas



Fig. 5. Percentage of the area occupied by land cover class within SHI (A) and SCI (B) or by artificial land cover classes only within SCI (C) for analyzed term in chronological order (07/29/2013; 07/03/2015; 06/22/2017; 06/12/2019).







Fig. 7. Scatter plots showing the relationship between LST and artificial areas or forest and semi natural areas in each district.

Table 5

Pearson correlation coefficient between the mean district LST and the percentage share of selected land cover types calculated based on data from 41 GZM districts.
Type of land cover [%]
Data

Type of faile cover [70]	Dutu							
	29/07/2013	03/07/2015	22/06/2017	12/06/2019				
Artificial areas	0.86	0.62	0.75	0.65				
Agricultural areas	0.19	-0.15	0.09	-0.13				
Forest and semi natural areas	-0.67	-0.38	-0.52	-0.17				
Water bodies	-0.30	-0.28	-0.28	-0.30				
Water bodies ¹	-0.44	-0.50	-0.45	-0.49				

Explanation: ¹ –correlation only for districts where the analyzed land cover type occurred (26 districts for water bodies), **bold**-statistically significant $\alpha = <0.05$, **bold**-statistically significant $\alpha = <0.01$.

Table 6

Pearson correlation coefficient between the percentage of SHI and SCI and selected land cover types or classes.

Type of land cover [%] SHI	29/07/2013	03/07/2015	22/06/2017	12/06/2019	Permanent
Agricultural area	<u>-0.56</u>	<u>-0.61</u>	<u>-0.43</u>	<u>-0.56</u>	<u>-0.64</u>
Artificial areas	<u>0.94</u>	<u>0.94</u>	<u>0.91</u>	<u>0.90</u>	<u>0.94</u>
Discontinuous urban fabric	<u>0.83</u>	<u>0.84</u>	0.79	0.76	<u>0.79</u>
Industrial or commercial units	<u>0.87</u>	<u>0.89</u>	<u>0.87</u>	<u>0.89</u>	<u>0.92</u>
Industrial or commercial units ¹	<u>0.85</u>	0.88	<u>0.85</u>	<u>0.88</u>	<u>0.90</u>
SCI	29/07/2013	03/07/2015	22/06/2017	12/06/2019	Permanent
Forest and semi-natural areas	0.74	0.84	0.78	0.16	0.23
Broad-leaved and mixed forests	0.55	0.49	0.71	0.31	0.33
Coniferous forests	0.54	0.77	0.46	0.00	0.06
Coniferous forests ¹	0.50	0.73	0.36	-0.10	-0.01
Water bodies	0.19	0.34	0.23	0.38	<u>0.77</u>
Water bodies ¹	0.12	0.29	0.40	0.44	<u>0.75</u>

Explanation: ¹ –correlation only for districts where the analyzed land cover type occurred (30 districts for coniferous forests, 26 districts for water bodies, 35 districts for industrial or commercial units), **bold**- statistically significant $\alpha = <0.05$, <u>**bold**</u> – statistically significant $\alpha = <0.01$.



Fig. 8. Spatial extent of SHI, LCL SUHI1 and SCI in the GZM. The white spots in the image on 12/06/19, indicate removed pixels that were covered by cloud cover.

Ecological Indicators 142 (2022) 109181



Fig. 9. Composite image of the spatial extent of SHI and SCI based on all analyzed dates in the GZM.

Table 7			
Threshold LST for the identification of heat and cold islands	their spatial extent and mean	LST for SHL LCL SI	IHL and SCI in the GZM

Data	Indicator	LST threshold (°C)	Extent		MeanLST (°C)
			(%)	(km ²)	
29/07/2013	SHI	43.8	16.2	413.1	46.7 (±2.8)
	LCL SUHI1	43.8	13.6	346.3	47.0 (±2.9)
	LCL SUHI ₂	47.9	4.6	116.4	50.3 (±2.5)
	LCL SUHI ₃	52.0	1.0	24.5	54.2 (±2.5)
	SCI	35.6	12.4	316.5	34.3 (±1.1)
03/07/2015	SHI	38.7	16.4	418.6	41 4 (+2 8)
03/07/2013	LCL SUHL	38.7	14.4	367.4	$41.4(\pm 2.8)$
	LCL SUHI2	42.8	43	108.8	45.2 (+2.5)
	LCL SUHI ₂	46.9	0.9	21.8	49.2 (+2.6)
	SCI	30.5	14.5	371.1	29.3 (±1.0)
22/07/2017	CUI	20.2	15.4	204.1	41 5 (+2 7)
22/07/2017	I CL SUHL	38.2	12.8	326.4	$41.3(\pm 2.7)$
		42.9	3.9	99.7	$45.1(\pm 2.7)$
	LCL SUHI2	47.6	0.5	11.6	$50.4(\pm 2.6)$
	SCI	28.9	19.4	495.1	27.9 (±0.8)
12/06/2019	SHI	40.5	15.9	401.8	43.6 (±2.7)
	LCL SUHI ₁	40.5	13.0	327.4	43.8 (±2.8)
	LCL SUHI ₂	44.8	4.2	105.4	47.2 (±2.3)
	LCL SUHI ₃	49.2	0.8	21.3	50.8 (±2.1)
	SCI	31.8	12.2	307.6	30.5 (±1.1)

Explanation: The highest values are bolded.

A. Renc et al.

Ecological Indicators 142 (2022) 109181



Fig. 10. The spatial distribution of LCL SUHI of different severities in the GZM. The white spots in the image on 12/06/19 indicate removed pixels that were covered by cloud cover.

constituted only one pixel within the GZM and were therefore excluded from the analysis. In this study, we used the original CLC codes for each land cover class.

(Table 2).

2.5. LST, SHI and SCI, and type of land cover

2.4. SHI, LCL SUHI and SCI indicators

Adapting the hot island area (HIA) indicator by Zhang and Wang (2008) defined based on the mean LST and its standard deviation, we calculated five indicators describing the spatial extent, intensity and strength of SHI and the spatial extent of SCI. The indicators are defined and described in Table 2. Commonly used in the literature, SHI and SCI are defined based on only LST regardless of land cover type. Thus, the SHI covers all areas with surface temperatures higher than the mean LST for an image plus one standard deviation. In turn, the areas with surface temperatures below the mean LST minus one standard deviation formed the SCI. The distribution of SHI and SCI slightly differed between the images, so that the permanent SHI and SCI were delineated as the intersections of SHI and SCI in all analyzed images.

We propose an original approach to delineate the SUHI by limiting SHI to the urban land cover (Land Cover Limited Surface Urban Heat Island – LCL SUHI) and excluding strongly heated nonurban agricultural areas from its borders. Three degrees of LCL SUHI strength were defined to delineate areas most exposed to SUHI (Table 2). It should be stressed that in this study, the strength of SUHI was determined based on the LST and its standard deviation, while the intensity of SUHI was determined based on differences in the LST between urban and nonurban areas (please see Description in Table 2 for detailed explanation). We used two approaches to calculate the SUHI intensity – one commonly used in the literature to compare our results with other studies (SUHII) and our original approach (LCL SUHII), which, in our opinion, provides a more reliable measure of SUHI intensity in the area of its appearance

Several characteristics of LST were calculated for all land cover classes, including extremes (maximum and minimum), mean, range of variability, and standard deviation. Moreover, Pearson correlation coefficients were calculated between the mean LST and the percentage of land cover types for each of the 41 districts in the GZM, including artificial areas, agricultural areas, forest and semi natural areas, and water bodies. Analogous correlation analysis was performed between the percentage of area covered by land cover type and class and the percentage of area covered by SHI and SCI and by permanent SHI and SCI within the administrative boundaries of each of the GZM districts. The correlations were investigated for those land cover types and classes that accounted for the largest part of SHI and SCI.

Not all land cover classes existed in each district; therefore, the correlation was calculated in two ways: using all districts and attributing 0 non-existing classes and using only those districts where a given land cover existed. Statistical significance was checked with Student's *t* test, and $\alpha < 0.05$ was adopted for significant cases.

3. Results and discussion

3.1. Spatial distribution of LST and weather conditions

The spatial distributions of LST in the GZM for each of the satellite images recorded in June or July between 2013 and 2019 are presented in Fig. 2. The surface of the GZM was warmest on 29/07/2013 (39.7 °C), followed by 12/06/19 (36.1 °C) (Table 3). Such a high LST resulted from the anticyclonic weather and high air temperatures (32.9 °C at 10:00

Ecological Indicators 142 (2022) 109181



Fig. 11. The spatial extent of permanent SHI and permanent SCI occurring in the same places on all analyzed dates.

UTC and 29.0 °C at 10:00 UTC, respectively) during image acquisition (Table 4). Anticyclonic conditions are often accompanied by descending air and result in low cloudiness that did not exceed 2/8 octants on those days. The high LST was also related to low wind speeds that reached a maximum of 4 m/s (Table 4).

The spatial distribution of the LST did not substantially differ between the images/terms and was related to the type of land cover, particularly the distribution of urban (hottest) and nonurban (coldest) areas (Fig. 3). Nonurban areas were coldest on 22/06/2017 when the mean LST reached 33.5 °C.

Generally, during the research period, the LST ranged between approximately 41 °C and 45 °C, with the exception of the LST on 03/07/2015, when extremely high LSTs of 66.4 °C-84.9 °C were found for single pixels located at the Katowice Smeltery. The high-resolution (minimum 1 m) World Imagery base map available in ArcMap 10.7.1 indicated that these extreme LSTs were characteristic of temporal objects that resembled landfill or building materials and were not identified in any of the other images.

3.2. Relationship between LST and land cover

The LST strongly depends on land cover (Voogt, 2004); therefore, in this section, the diversity of LST depending on land cover types or classes in the GZM is discussed. Fig. 3 presents the CLC 2018 distribution in the GZM. The artificial surfaces and forest and semi natural areas occupied comparable percentages of the metropolis (30.3% and 33.2%, respectively). The most and least common types of land cover in the GZM were agricultural areas (37.8%) and water bodies (1.7%).

The average LST (gray lines) and its range of variability (whiskers)

USA (Imhoff et al., 2010), Poland (Majkowska et al., 2017) and Western Europe (Ward et al., 2016) also confirmed that broad-leaved and mixed forests have better cooling ability than coniferous forests. These differences arise from the higher albedo of broad-leaved forests than that of coniferous forests (Lukeš et al., 2013) due to the larger leaf area and denser tree canopy. However, Geletic et al. (2019) found no significant differences between LSTs of different forest types in cities of the Czech Republic and Serbia. Within the class of forest and semi

for the pixels within particular land cover classes are presented in Fig. 4. The warmest areas included continuous urban fabric (from 43.9 °C to

50.0 °C, depending on date) and industrial or commercial units (from

40.3 $^{\circ}C$ to 46.0 $^{\circ}C). The dump sites had the third-highest mean LST (from 40.2 <math display="inline">^{\circ}C$ to 45.2 $^{\circ}C$, depending on day), except on 22/06/2017,

when the third position was airports (40.1 °C). Water bodies most often

had the lowest mean LST, varying between 27.7 °C and 32.9 °C, similar

to forest and semi natural areas, fruit trees and berry plantations (Fig. 4).

The highest mean LST for continuous urban fabric and industrial or

commercial units was also found in Cracow and Poznań (Poland) based

on two satellite images (Walawender, 2011) and a composite of 15

satellite images (Majkowska et al., 2017). Walawender (2011) found the

lowest mean LST for forest areas and water bodies, while Majkowska

et al. (2017) for broad-leaved, mixed and coniferous forests. The tem-

perature of vegetated areas was lower than that of impervious surfaces

due to the evapotranspiration process during the day (Paschalis et al.,

2021), as this process draws energy from the environment and thus

lowers the temperature. In the GZM, the difference between the mean LST for broad-leaved and mixed forests was minor, reaching 0.1 °C. The mean LST for coniferous forests was higher by 0.3 to 0.8 °C, depending

on the date, compared to broad-leaved forests. Several studies in the

A. Renc et al.



Fig. 12. Distribution of permanent SHI and permanent SCI in the GZM districts: A – the percentage of SHI in the GZM districts, B – the percentage of SCI in the GZM districts, C – the percentage of the particular district area covered by the SHI and SCI.

natural areas, the greatest differences in LST (difference of 1.6 to 2.1 $^\circ$ C) were observed in broad-leaved forests and transitional woodland-shrub.

The extreme LSTs for particular pixels were recorded in the Katowice Smeltery in Dąbrowa Górnicza (61.4 °C to 84.9 °C depending on date) and in the 'Bory 1' Plant in Sarnów, Psary (17.9 °C to 27.9°), whose area also falls within the class of the industrial or commercial unit. 'Bory 1' is a farm where vegetables and fruits are produced in greenhouses, with low emissivity surface, hence their low LST. Industrial or commercial units and discontinuous urban fabric were characteristic of the highest range of LST variability. These land cover classes include a great deal of so-called mixed pixels characterized by different types of land surfaces (Walawender, 2009) and resulting in great variability in LST.

The percentages of SHI and SCI occupied by various land cover classes are presented in Fig. 5. The discontinuous urban fabric class covered 43.4 to 50.1% of the SHI depending on the date (Fig. 5A). Industrial or commercial units constituted approximately 28% of SHI independently of the date. The aforementioned classes jointly occupied

approximately 75% of the SHI. Other anthropogenic classes of land cover occupied no more than 5.3% of the GZM; therefore, their contribution to the SHI area was also small (Fig. 5). The SHI also included non-irrigated arable land (6.3% to 11.9%) and pastures (2.7 to 3.4%).

The SCI was mostly comprised of forested areas (Fig. 5B), which together with the semi natural areas constituted between 48.5% and 85.9% of the SCI, depending on the date. The coniferous forests covered 18 to 26% of the SCI depending on the date; only on 12/06/2019 was their share in the SCI area two or even three times lower (7.4%). On 12/06/2019, the SCI area included an extraordinarily high percentage of agricultural areas (40.5%), with a domination of non-irrigated and arable land (35% of the SCI). In June, before harvesting, the agricultural areas were still covered by vegetation; thus, their LST was lower than that of the harvested areas. In the warm season, the extended vegetation area varied continuously from week to week as farmers redesign the landscape, which impacts the surface energy exchange (Martin et al., 2015).

Ecological Indicators 142 (2022) 109181

Table 8

Comparison o	f SUHI	intensity	for two	different	approaches
Comparison 0	1 30111	michisity	101 1000	unicient	approacties.

Data	LCL SUHII (°C)	SUHII (°C)	Difference (°C)
29/07/2013	8.4	5.6	2.9
03/07/2015	8.3	5.8	2.4
22/06/2017	9.4	6.5	2.9
12/06/2019	7.8	5.9	2.0

However, in the GZM, an exceptional situation occurred on 12/06/2019, when the percentage share of coniferous forests in the SCI was the lowest. To explain such a loss of the cooling effect by vegetation, we checked the weather conditions on the days preceding the image registration. A rainstorm passed through the GZM area on 11/06/2019 between 16:00 and 18:00 UTC, which increased evaporation, particularly in impervious areas, thus generally diminishing the differences in LST. The high share of agricultural areas in the SCI on that day could have also resulted from the occurrence of precipitation and the resulting gathering of water available for intensified evaporation from the soil in addition to evaportanspiration.

The definitions of SCI and SHI are based only on threshold surface temperature and do not incorporate a land cover class. As a result, strongly heated surfaces of agricultural lands or exposed soils were interpreted as urban heat island that distort the SUHI extent. Moreover, the SHI included a small percentage of forest area, which could have been a result of the existence of green areas among buildings or vectorization errors in the CLC 2018 database. However, urban or industrial units (Fig. 5C) appeared within the SCI. The mentioned discrepancies could have also resulted from the intense transformation of the GZM land cover between 2015 and 2018. The CLC classification used in this study was created in 2018; hence, for example, a forest area in the photo from 2013 could have been transformed into a built-up area by 2018. Moreover, the emissivity calculation method may not adequately represent some urban areas, such as the aforementioned very low emissivity greenhouse production facility.

Selected horizontal profiles of LST that represent as many land cover classes as possible and various parts of the GZM are presented in Fig. 6. To simplify the color pattern on the horizontal axis and increase its readability, some land cover classes were integrated.

The LST profile patterns did not change substantially depending on date. LST was most variable within urban fabric and industrial or commercial units, while variability was small within dense forest areas such as the Murckowskie Forests and Kozłowa Góra water bodies on profile A-A'. The profiles also indicated that even small forest areas had a profound role in weakening the SHI. For example, the LST of small forests located between impervious surfaces, e.g., Górnik park in Siemianowice Śląskie, the Valley of the Three Pounds park in Katowice and the park of Capitan Witold Pilecki in Zabrze, was approximately 10 °C lower than their surroundings. Attention should also be paid to the cooling effect of sport and leisure facilities class that included the 'Hope' allotment gardens in the center of Gliwice, 'Leisure' in Będzin and the Silesian Legendia funfair in Chorzów (29 km B-B' profile). These results are in agreement with the findings by Majkowska et al. (2017) based on two profiles across Poznan in Poland.

To assess how much variance in the LST was explained by land cover types, we calculated the Pearson correlation coefficient between the mean district LST (arithmetical mean from all pixels within the borders of the districts) and the percentage of area occupied by selected land cover types within the 41 districts of the GZM. The LST was most strongly correlated with artificial areas that explained 37 to 71% of the LST variance (Fig. 7). The regression analysis showed that a 10% increase in the percentage of artificial areas increased the LST by 0.4 to 0.7 °C. Other studies showed that the contribution of buildings to the urban structure explained 28 to 51% of the variance in the LST, and a 10% increase in that land cover type increased the LST by as much as 1.7 °C (Alexander, 2020, Arhus Denmark). According to Estoque et al.

(2017), impervious surface density explained 61% (Bangkok), 82% (Manila), and 91% (Jakarta) of the LST variance, and a 10% change caused a 0.4 to 0.6 °C change in LST. The LST was significantly and negatively correlated with the percentage of forest and semi natural areas (Table 5); however, the percentage of explained variance in LST was lower (15 to 45%) (Fig. 7) than that in other cities, such as Arhus in Denmark (46 to 56% for tree cover, 20 to 39% for overall vegetation) or Asian cities (60 to 86% for green space density) (Alexander, 2020; Estoque et al., 2017). In the GZM, the cooling effect of a 10% increase in this land cover type reached 0.2 to 0.6 °C and was smaller than that in other cities, such as 1.3 °C for tree cover and 0.9 °C for overall vegetation cover in Arhus and 0.6 to 1.2 °C for green space density in Asian cities.

In the GZM, the variance explained by artificial surfaces was always greater than that explained by vegetation areas. The percentage of water bodies was significantly correlated with LST, providing that districts without water bodies were excluded from calculations. Additionally, studies in Rotterdam by Klok et al. (2012) showed no correlation between LST and water bodies.

We also studied the relations between the percentage of SHI and SCI within each district and the percentage of district area occupied by selected land cover type or class (Table 6). The SHI percentage was significantly correlated with all considered land cover types and classes, mostly at $\alpha < 0.01$. Again, the strongest relationship was between areas occupied by artificial areas representing all anthropogenic land cover classes in the districts (r between 0.90 and 0.94). Both the percentage of SHI and the permanent SHI indicated a strong negative correlation with the percentage of agricultural areas, although the LST was not correlated with this land cover type (Table 5). The percentage of SCI was significantly correlated with vegetation areas, particularly with the percentage of forest and semi natural areas (r between 0.74 and 0.84) (Table 6). These results confirmed the potential of vegetation to lower the LST and create the SCI area.

The only exception was on 12/06/2019, when the percentage of SCI was significantly correlated only with the percentage of broad-leaved and mixed forests; however, the correlation was the lowest of all terms, probably due to precipitation on the preceding day. The relationship between the percentage of SCI and water bodies varied depending on the day and calculation method. The percentage of permanent SCI was most strongly correlated with water bodies, followed by broad-leaved and mixed areas (Table 6).

3.3. The spatial extents of SHI, LCL SUHI, and SCI

3.3.1. Surface urban heat island

In the GZM, SHI and LCL SUHI have a structure resembling an 'archipelago' more than an 'island' (Fig. 8), due to a functionally and communicatively related polycentric agglomeration. Shepherd et al. (2013) argue that such "city chains" exert a different type and scale of impact on the climate system, presumably higher than one city. A similar spatial structure of SUHI was found in Phoenix (USA) (Buyantuev and Wu, 2009) and Arhus (Denmark) (Alexander, 2020). Both the SHI and the LCL SUHI formed the widest and most coherent areas in the central part of the GZM. In the northern (Tarnowskie Góry, Pyrzowice, Siewierz), southern (Tychy, Mikołów), and western (Knurów) parts of the metropolis, heat islands (both indices) occurred as isolated locations. The largest spatial extent of both SHI and LCL SUHI was found on 03/

07/15. Depending on the date, the SHI covered 15.4 to 16.4% of the GZM area, with a mean LST between 41.4 °C and 46.7 °C. The LCL SUHI covered a slightly smaller percentage of the GZM - between 12.8 and 14.4%, with a mean LST ranging of 41.6 $^\circ C$ to 47.0 $^\circ C.$ Both indicators revealed a small amount of temporal variability of heat island extents due to similar meteorological conditions prevailing during the recording of satellite images including anticyclonic situations, low cloudiness and low wind speed which are conducive to forming a UHI (Oke, 1982; Fortuniak, 2019) and influence SUHI, although at different times of day. Generally, the LCL SUHI distributions did not vary over time, with the exception of 12/06/2019, when the LCL SUHI had a lower extent in the southern part of the metropolis (Fig. 9). However, there was a slight haze in this part of the image on that day that could have caused an LST decrease due to the evaporation of atmospheric water vapor. The hottest areas within nonurban areas were located in the northern part of the GZM (Fig. 8) and accounted for approximately 2.0% to 2.9% of the SHI depending on the day. These locations included agricultural areas, whose surface temperature strongly depends on vegetation. A UHI occurring outside of built-up land and wasteland was also found in Naples and Florence (Guha et al., 2018).

The criterion for determining a hot or cold island is often based on the mean LST and its standard deviation. However, the multiplication of the standard deviation varies depending on the author. Zhang and Wang (2008) used LST + 1 δ to determine the SUHI extent. This method was also used by Schwarz et al. (2012) and (Jędruszkiewicz and Zieliński, 2012). Using this criterion, Schwarz et al. (2012) found that in Leipzig (Germany), in the morning in the second half of September, the SUHI reached 84 km², occupying 11.2% of a research area. Guha et al. (2018), based on the criterion of LST + 0.5 δ , determined that SUHI occupied 35.9% of Florence and 35.8% of Naples. Alexander (2020) defined two LST thresholds to identify the cold and heat zones of varying intensity in Arhus (Denmark), including LST $\pm 2\delta$ and 3δ .

3.3.2. Surface cold island

The LST thresholds for SCI identification on the analyzed dates varied between 35.6 °C and 28.9 °C (Table 7). The SCI was largest (19.4% of the GZM) on 22/06/17 when the mean LST was lowest (27.9 °C). The smallest SCI extent (12.2% of GZM) occurred on 12/06/ 19 when the mean LST for SCI reached 30.5 °C and rainfall occurred on the day preceding the recorded image. Precipitation may have narrowed the temperature distribution relative to drier conditions on other days. On this day, the smaller contrast in LST between urban and nonurban areas was noted (Fig. 2), which resulted in a high mean LST and thus low extent of SCI. On all dates, the SCI covered similar types of land cover, i. e., vegetation, agricultural and water areas, and its extent significantly varied, depending on the date. However, the June images showed an additional share of the agricultural areas within the SCI, resulting from developed vegetation that was harvested on later dates. Therefore, the SCI extent was the largest in June and then gradually decreased in later months. Although the weather conditions in June were similar, the SCI extents were clearly different. On 22/06/2017, when the SCI was significantly largest, the LST of nonurban areas was noticeably lower than that on other days (Fig. 2) due to the lowest air temperature (23.9 $^\circ\text{C}$ at 9:00 UTC). In the case of Arhus (Denmark), the cold zone occupied only 2.16 km² due to the high contribution of agricultural land (70% of Arhus), whose LST was close to the LST of impervious surfaces (Alexander, 2020).

3.3.3. Strong and extreme urban heat

A strong LCL SUHI (with LST \geq 42.8 °C) covered 3.9%-4.3% of the GZM depending on date (Table 7); it usually overlapped LCL SUHI₁ and covered continuous urban fabric and residential areas with small trees in their vicinity (Fig. 10). The mean LST for LCL SUHI₂ ranged from 45.1 to 50.3 °C. The extreme LCL SUHI₃ accounted for only 0.5% to 1% of the GZM (Table 7); additionally, the lowest LST threshold of its occurrence equaled 46.9 °C on 03/07/15, while the mean LST for LCL SUHI₃ was

49.2 °C. The extreme LCL SUHI included single industrial sites, logistics and manufacturing centers, or coal dumps (Fig. 10). Similar results regarding the land cover type contributing to the most intense SUHI in four GZM cities were found by Nadudvari (2021) based on the NDVI and NDBL

3.4. Permanent SHI and SCI

The permanent SHI and SCI were identified based on all studied satellite images presented in Fig. 11. The ranking of the GZM districts according to the percentage of permanent SHI (upper graph) and permanent SCI (middle graph) is presented in Fig. 12. This ranking strongly depended on the district's area; therefore, we also calculated the percentage of particular districts covered by permanent SHI or SCI (lowest graph), which is a more reliable measure of SHI risk. The permanent SHI occurred within each district and overall covered 9% of the GZM, involving the most concentrated urban tissue (Fig. 11). The largest part of the permanent SHI was found in densely populated urban areas of districts located in the middle part of the GZM (Fig. 12A), which proves the findings by Nadudvari (2021) in four GZM cities (Katowice, Sosnowiec, Bytom, and Gliwice). The area of permanent SCI was more than two times smaller than the SHI. Although the permanent SCI covered only 3.6% of the GZM, it occurred in most districts, except for Świętochłowice, Wojkowice and Czeladź (Fig. 12B). The location of the permanent SCI was related to large water bodies and vegetated areas.

Importantly, the largest areas of permanent SCI occurred within forests located in administrative boundaries of the densely populated metropolitan cites. The largest of these areas was located in the forest in the southern part of the GZM (borderline of Katowice and Tychy). A smaller but still compact SCI zone was found within the forest in the northwest (border of Bytom and Tarnowskie Góry) and west (Zbrosławice) parts of the GZM. The largest cold spots in Łódź (Poland) also included the largest parks in the city (Jędruszkiewicz and Zieliński, 2012). The permanent SCI did not appear in the coniferous forest areas. A study of Cracow (Poland) showed that over 16% of the city's surface is always warmer, while <16% is always cooler (Walawender et al., 2014).

Out of 15 districts most affected by the permanent SHI (above 10% of the city's area), in 13 the permanent SCI occupied <2.1% of their area and in two of them (Katowice and Bytom) the SCI covered as much as 11.8% and 10.6% of the their area (Fig. 12C). In Świętochłowice and Chorzów, where the permanent SHI occupied 36.9% and 35.3% of the districts, respectively, the permanent SCI did not develop (Świętochłowice) or occupied <2% of its area (Chorzów). Such a small area of SCI in the cities most exposed to SHI is a threat to their habitants, as the intensity and frequency of heatwaves is predicted to increase in the city (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021), and some studies show that Northern European cities are more vulnerable to heatwaves than Southern European cities (Ward et al., 2016).

3.5. SUHI intensity

The intensity of the heat island, as described in detail in the methods, was investigated separately for the SUHII and LCL SUHII. The intensity of the phenomenon ranged from 7.8 °C to 9.4 °C for the LCL SUHII (Table 7) and from 5.6 °C to 6.5 °C for the SUHII. The differences between the intensities reached approximately 2 to almost 3 °C. The higher mean LST for the LCL SUHII is a result of the exclusion of the artificial areas located within the urban areas that did not meet the LST critteria for heat island. In our opinion, this result proves that the LCL SUHII approach more reliably reflects the intensity of a heat island and is a better measure to assess the impact of heat on comfort. Regardless of the approach, the most intense SUHI occurred on 22/06/2017 (Table 8) due to the lowest LST of nonurban areas.

This problem was also noticed by Alexander (2020), who found more than a 10 $^{\circ}$ C difference between the SUHI intensity measured by the difference in the mean LST between urban and nonurban areas (3.9 $^{\circ}$ C)

and between hot and cold zones (13.3 °C; LST > meanLST + 2 δ) in Arhus, Denmark. The analysis based on the difference in the UHI (LST > meanLST + 0.5 δ) and the non-UHI delivered the following intensities: 3.15 °C for Florence and 3.31 °C for Naples in Italy (Guha et al., 2018). The SUHI intensity estimated based on the difference in the mean LST in urban and nonurban areas varied from 0.9 °C to 3.3 °C for cities in Greece (Stathopoulou and Cartalis, 2007). Such large differences in SUHI intensity between the above mentioned cities result from a very different temperature threshold adopted by the authors for the determination of the SUHI/non-SUHI in these cities. However, in general, the LST of nonurban areas is closely related to soil moisture and vegetation coverage. Therefore, these factors primarily impact the intensity of SUHI due to the reference point these constitute. Some studies show that the intensity of daytime SUHI in the growing season on a global scale between 2001 and 2016 increased to 22.5% due to the greening effect of nonurban areas (Yao et al., 2019).

Some studies question the usage of nonurban areas as a reference when assessing the UHI extent. For instance, Martin et al. (2015) emphasized that nonurban areas are also modified by human activity, which may not be an appropriate thermal reference for a 'typically rural' area. (Bechtel et al., 2019) suggests using a Local Climate Zone (LCZ) as a better alternative for detailed description of the local surface that allows for a comprehensive analysis of SUHI in cities of various sizes and the surrounding macroclimate.

3.6. Limitations

The study has some limitations. The first concerns the CLC 2018 classification used for analyzing all images (2013–2019). Between 2013 and 2018, some land cover types like agricultural or forestry land, could be built-up areas which may have caused errors. In addition, some types of land cover have been insufficiently verified and inadequately classified. For example, water bodies within built-up areas or dump sites within forest areas. Manual verification and corrections should be made to achieve the best possible results.

The second limitation is low availability of cloudless Landsat images for such large area as GZM and various meteorological conditions on the acquisition date. The problems related to various dates for which cloudless images are available make it impossible to study trends in the development of SUHI in a traditional statistical way. During summer the SUHI strongly depends on the state of vegetation which enhances the differences in SUHI intensity and extent even in short time spans. The study clearly showed that SUHI and SCI depend on both vegetation and meteorological conditions.

4. Summary and conclusions

Due to progressive urbanization and global warming, which pose many threats to city inhabitants, identifying urban heat and cold islands in the summer season is essential for human health and life quality. Based on four L8 satellite images recorded in summer between 2013 and 2019, the structure of the SHI in the GZM was recognized for the first time. Except for well-known indices used to determine the spatial extent and intensity of SUHI, a new index based on the HIA and the CLC 2018 classification was proposed, which more accurately reflects the extent of SUHI by eliminating strongly heated surfaces that are not of urban character.

The conducted research showed that SUHI in the GZM has a structure similar to an archipelago. Additionally, the largest continuous areas of the heat island are located in several districts in the central part of the GZM; therefore, we paid less attention to the administrative borders within the GZM. The distributions of SHI and LCL SUHI did not substantially differ over the analyzed time, i.e., between 2013 and 2019. In the GZM, the discontinuous urban fabric and industrial or commercial units constituted more than 70% of the SHI area. It was found that SHI included a large share of strongly heated agricultural lands, which were not counted as urban land cover classes, which motivated us to limit the extent of SHI to urban areas. This approach reduced the extent of the GZM SHI by 2.9 to 2.0% depending on the day and, in our opinion, is a more reliable measure of the SUHI.

Our study also analyzed the cold island in a city with a temperate zone, which has rarely been discussed in the literature. Existing studies have limited research to the identification of cold island with no attention to land cover types (Alexander, 2020) or to the extent of cold island (Jędruszkiewicz and Zieliński, 2012). SCI in GZM consist of single isolated islands within larger forest complexes. SCI extent in GZM was much more variable in time than that of the SHI mainly due to changing properties of agricultural areas (before vs. after harvesting) and variable weather conditions (occurrence of precipitation); however, the last problem needs further investigation. We also found that broad-leaved and mixed forests had the most persistent cooling effect independent of meteorological conditions.

The highest average LST was characteristic of the discontinuous urban fabric and industrial or commercial units. Water and vegetation areas had the lowest average LST; however, among all classes of forest and semi natural areas, broad-leaved and mixed forests were characterized by the lowest average LST.

In the GZM, dump and mineral extraction sites that are usually located in peripheral areas are the original bare ground type with low albedo and thus high surface temperature. These land cover types, specific to the GZM, disturb the standard structure of the SHI, with the maximum temperatures in its central part decreasing toward the suburbs. As they are functionally connected to an industrial area, they were included in the SUHI, which may be debatable.

Our research revealed a large disproportion between the permanent SHI and SCI in the GZM (9% of SHI and 3.6% of SCI, respectively). Moreover, districts most exposed to the permanent SHI included small surfaces occupied by permanent SCI, which was a result of the insufficient amount of vegetation, especially forest in these areas. Because of their significant cooling effects, vegetation should be incorporated into urban space as a crucial measure of climate change adaptation, particularly in northern European cities, which are more exposed to heatwaves than are south-European cities (Ward et al., 2016).

CRediT authorship contribution statement

Aleksandra Renc: Conceptualization, Methodology, Data curation, Formal analysis, Visualization. Ewa Łupikasza: Visualization, Writing – review & editing, Supervision. Małgorzata Błaszczyk: Methodology, Writing – review & editing.

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

Data will be made available on request.

References

- Alexander, C., 2020. Normalised difference spectral indices and urban land cover as indicators of land surface temperature (LST). Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 86, 102013 https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102013.
- Alexander, C., 2021. Influence of the proportion, height and proximity of vegetation and buildings on urban land surface temperature. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 95, 102265 https://doi.org/10.1016/j.jac.2020.102265.
- Akbari, H., Kurn, D.M., Bretz, S.E., Hanford, J.W., 1997. Peak power and cooling energy savings of shade trees. Energy Build. 25, 139–148. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01003-1.
- Amiri, R., Weng, Q., Alimohammadi, A., Alavipanah, S.K., 2009. Spatial-temporal dynamics of land surface temperature in relation to fractional vegetation cover and
A. Renc et al.

land use/cover in the Tabriz urban area. Iran. Remote Sens. Environ. 113 (12), 2606–2617. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.07.021. Bechtel, B., Demuzere, M., Mills, G., Zhan, W., Sismanidis, P., Small, C., Voogt, J., 2019.

- SUHI analysis using Local Climate Zones—A comparison of 50 cities. Urban Clim. 28, 100451 https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.01.005.
 Bokwa, A., 2010. Wieloletnie zmiany struktury mezoklimatu miasta na przykładzie Krakowa. IGiGP UJ, Kraków 258 [37].
- Buyantuev, A., Wu, J., 2009. Urban heat islands and landscape heterogeneity: Linking spatiotemporal variations in surface temperatures to land-cover and socioeconomic patterns. Landsc. Ecol. 25, 17–33. https://doi.org/10.1007/s10980-009-9402-4.
- Dousset, B., Gourmelon, F., Laaidi, K., Zeghnoun, A., Giraudet, E., Bretin, P., Mauri, E., Vandentorren, S., 2011. Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area. Int. J. Climatol. 31 (2), 313-323. https://doi.org/10.1002/
- Estoque, R., Murayama, Y., Myint, S., 2017. Effects of landscape composition pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. Sci. Total Environ. 577, 349-359. https://doi.org/10.1016/j scitotenv.2016.10.195.
- European Environmental Agency 2017: CLC2018 Technical Guidelines. Fortuniak, K., 2019. Studies on Urban Climate in Poland. Prz. Geogr. 1-2, 72-106.
- https://doi.org/10.32045/PG-2019-003. Gawuć, L., 2014. Diurnal Variability of Surface Urban Heat Island during a Heat Wave in Selected Cities in Poland in August 2013 by Means of Satellite Imagery. Prace Naukowe PW. Inżynieria Środowiska. 68, 19–34.
- Geletic, J., Lehnert, M., Savic, S., Milosevic, D., 2019. Inter-/intra-zonal seasonal variability of the surface urban heat island based on local climate zones in three central European cities. Build Environ. 156, 21–32. https://doi.org/10.1016/j 2019.04.011.
- Guha, S., Govil, H., Dey, A., Gill, N., 2018. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city. Eur. J. Remote. Sens. 51 (1), 667–678. https://doi.org/10.1080/ 22797254 2018 1474494
- Z2171 Z31.2010.17(17)77 Hajto, M., Struzik, P., Rozwoda, W., 2006. Applying AVHRR/NOAA satellite images in urban heat island analysis (Cracow example). Ann. UMCS sec. B 41, 190.
- Ibrahim, G., 2017. Urban Land Use Cover Changes and Their Effect on Land Surface Temperature: Case Study Using Dohuk City in the Kurdistan Region of Iraq. Climate. 5 (13), 1-18. https://doi.org/10.3390/cli5010013.
- ergovernmental Panel on Climate Change, 2021. Summary for Policymakers. Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press
- Imhoff, M.L., Zhang, P., Wolfe, R.E., Bounoua, L., 2010. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. Remote Sens. Environ. 114,
- 504–513. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008. Jędruszkiewicz, J., Zieliński, M., 2012. Land Surface temperature in Lódź obtained from LANDSAT 5TM. Contemporary Trends in Geoscience. 1 (1), 21-29.
- Klok, L., Zwart, S., Verhagen, H., Mauri, E., 2012. The surface heat island of Rotterdam and its relationship with urban surface characteristics. Resour Conserv Recycl. 64, 23-29. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.009.
- Kłysik, K., Fortuniak, K., 1999. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź. Poland. Atmospheric Environ. 33 (24-25), 3885-3895. https://doi. 10.1016/S1352-2310(99)00131
- Li, J., Song, c., Cao, L., Zhu, F., Meng, X., Wu, J., 2011. Impacts of landscape structure on sur-face urban heat islands: a case study of Shanghai. China. Remote Sens. Environ. 115 (12), 3249-3263, https://doi.org/10.1016/ e 2011 07 008
- Liu, K., Su, H., Zhang, L., Yang, H., Zhang, R., Li, X., 2015. Analysis of the Urban Heat Island Effect in Shijiazhuang, China Using Satellite and Airborne Data. Remote Sens. 7, 4804–4833. https://doi.org/10.3390/rs70404804.
- Liu, Y., Huang, X., Yang, Q., Cao, Y., 2021. The turning point between urban vegetation and artificial surfaces for their competitive effect on land surface temperature.
- J. Clean. Prod. 292, 126034 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126034. Lukeš, P., Stenberg, P., Rautiainen, M., Mottus, M., Vanhatalo, K., 2013. Optical properties of leaves and needles for boreal tree species in Europe. Remote Sens. Lett.
- 4 (7), 667-676. https://doi.org/10.1080/2150704X.2013.782112 Majkowska, A., Kolendowicz, L., Półrolniczak, M., Hauke, J., Czarnecki, B., 2017. The
- urban heat island in the city Poznań as derived from Landsat 5 TM. Theor. Appl. Climatol. 128 (3-4), 769-783. https://doi.org/10.1007/s00704-016-1737-6. Martin, P., Baudouin, Y., Gachon, P., 2015. An alternative method to characterize the
- surface urban heat island. Int. J. Biometeorol. 59, 849-861. https:// 10.1007/s00484-014-0902
- Nadudvari, A., 2021. The localization of urban heat island in the Katowice conurbation (Poland) using the combination of land surface temperature, normalized difference vegetation index and normalized difference built-up index. Geogr. Pol. 94 (1), 111-130. https://doi.org/10.7163/GPol.0196
- Oke, T.R., 1982. The energetic basis of the urban heat island, O. J. R. Meteorol, Soc. 108. 1-24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502.

- Paschalis, A., Chakraborty, T.C., Fatichi, S., Meili, N., Manoli, G., 2021. Urban Forests as Main Regulator of the Evaporative Cooling Effect in Cities. Earth and Space Sci. 2 (2), 1-14. https://doi.org/10.1029/2
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., Mcmahon, T., 2007. Updated Köppen-Geiger Climate Map of the World. Hyrdol. Earth Syst. Sci. 11, 1633–1644. https://doi.or
- Półrolniczak, M., Kolendowicz, L., Majkowska, A., Czernecki, B., 2017. The influence of atmospheric circulation on the intensity of urban heat island and urban cold island in Poznań. Poland. Theor. Appl. Climatol. 127 (3-4), 611-625. https://doi.org/
- Rasul, A., Balzter, H., Smith, C., 2015. Spatial variation of daytime Surface Urban Cool Island during the season in Erbil, Iraqi Kurdistan, from Landsat 8. Urban Clim. 14, 176-186, https //doi.org/10.1016/i lim.2015.09.001
- Renard, F., Alonso, L., Fitts, Y., Hadjiosif, A., Comby, J., 2019. Evaluation of the Effect of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Islands. Remote Sens. 11, 299. https:// doi.org/10.3390/rs11030299.
- Roy, S., Pandit, S., Eva, E., Bagmar, M., Papia, M., Banik, L., Dube, T., Rahman, F., Razi, M., 2020. Examining the nexus between land surface temperature and urban growth in Chattogram Metropolitan Area of Bangladesh using long term Landsat series data. Urban Clim. 32, 100593 https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100593.
- Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., Großmann, K., 2012. Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heatisland indicators-an application for the city of Leipzig (Germany). Ecol. Indic. 18, 693–704. http loi.org/10.1016/j.ecolind.201 .01.001
- Shahmohamadi, P., Che-Ani, A.I., Etessam, I., Maulud, K.N.A., Tawil, N.M., 2011. Healthy environment: the need to mitigate urban heat island effects on human health. Procedia Eng. 20, 61–70. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.13
- Shepherd, M., Andersen, T., Strother, C., Horst, A., Bounoua, L., Mitra, C., 2013. Urban Climate Archipelagos: A New Framework for Urban Impacts on Climate. IEEE Earthzine. https://earthzine.org/urban-climate-archipelagos-a-new-frame ork-fc npacts-on-climate
- Sobrino, J., Raissouni, N., 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. Int. J. Remote Sens. 21 (2), 353-366. https:// 0/014311600210876
- Sobrino, J., Jimenez-Munoz, J., Soria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Moreno, J., 2008. Land Surface Emissivity Retrieval from different VNIR and TIR sensor. IEEE Trans. Geosci, and Remote Sens. 46, 2. https://doi.org/10.1109/TGRS.2007
- Stathopoulou, M., Cartalis, C., 2007. Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: an application to major cities in Greece. Sol. Energy. 81 (3),
- 358–368. https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.014.
 United Nations, 2019. World Population Prospects: The 2018 Revision. United Nation Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- Voogt, J.A., 2004. Urban Heat Island: Hotter Cities. Action Bioscience, North Port. http: ce.org/environment/voogt.html. (Accessed June 2016).
- Voogt, J.A., Oke, T.R., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sens. Environ. 8, 370–384. https://doi.org/10.1016/S00344257(03)00079-8.
 Walawender, J., 2009. Application of LANDSAT Satellite Data and GIS Techniques for Estimation of Thermal Conditions in Urban Area (Using an Example of Kraków
- Agglomeration). Prace Geograficzne, IGiGG. 122, 81–98. Walawender, J., Hajto, M., Iwaniuk, P., 2011. Application of single-channel algorithm for mapping land surface temperature based on Landsat satellite data. Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej. Annals of Geomatics 9 (4), 139–150.
- Walawender, J., Szymanowski, M., Hajto, M., Bokwa, A., 2014. Land Surface Temperature Patterns in the Urban Agglomeration of Krakow (Poland) Derived from Landsat-7/ETM+ Data. Pure Appl. Geophys. 171, 913-940. https://doi.org. 10.1007/s00024-013-0685-7.
- Walczewski, J., 2005. The meteorological and climatological conditions of the air pollution dispersion in the atmosphere Przeglad Geofiz 3-4 177-193 Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., Zhao, S., 2015. An improved mono-
- window algorithm for land surface temperature retrieval from landsat 8 thermal infrared sensor data. Remote Sens. 7 (4), 42. https://doi.org/10.3390/rs7040426
- Ward, K., Lauf, S., Kleinschmit, B., Endlicher, W., 2016. Heat waves and urban islands in Europe: A review of relevant drivers. Sci. Total Environ. 569–570, 527–539. https://
- Weng, Q., Lu, D., Schubring, J., 2004. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. Remote Sens. Environ. 89 (4), 467-483. https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005
- Yao, R., Wang, L., Huang, X., Gong, W., Xia, X., 2019. Greening in rural areas increases the surface urban heat island intensity. Geophys. Res. Lett. 46, 2204-2212. https://
- Yao, R., Wang, L., Huang, X., Niu, Z., Liu, F., Wang, Q., 2017. Temporal trends of surface urban heat islands and associated determinants in major Chinese cities. Sci. Total
- Environ. 609, 742–754. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.217. Zhang, J.Q., Wang, Y.P., 2008. Study of the relationships between the spatial extent of surface urban heat islands and urban characteristic factors based on Landsat ETM plus data. Sensors 8, 7453–7468. https://doi.org/10.3390/s8117453.
- Statistics Poland 2021: Area and population by voivodship in 2020. Demographic Yearbook of Poland, s. 82.

Building and Environment 247 (2024) 110997



Contents lists available at ScienceDirect

Building and Environment

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

Changes in the surface urban heat island between 1986 and 2021 in the polycentric Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis, southern Poland



Aleksandra Renc^{*}, Ewa Łupikasza

Faculty of Natural Sciences, Institute of Earth Sciences, University of Silesia in Katowice, Będzińska 60, 41-200, Sosnowiec, Poland

ARTICLE INFO	A B S T R A C T
Keywords: SUHI Land cover Remote sensing Urbanization Polycentric agglomeration	Progressing urbanization forces urban infrastructure development and leads to an increase in artificial imper- vious surfaces that directly contribute to changes in surface urban heat island (SUHI) in cities. This study dis- cusses spatial and temporal changes in the SUHI extent and intensity in the biggest Metropoly in Southern Poland in summer between 1986 and 2021. The study is based on Landsat satellite images, demographic and land cover data from 1990 to 2018 from CORINE Land Cover (CLC) classifications. The comparison of satellite images recorded in different years, on similar dates and under similar meteorological conditions revealed an increase in the SUHI extent from 0.6 to 4.3 % between 1986 and 2021 due to increase in the share of impervious areas. Moreover, regardless of changes in spatial extent, the mean land surface temperature (LST) of all types of land cover increased, which may be related to recent warming. In the research period, permanent surface heat island covere d 0.85 % of the GZM, and over 50 % of its area was located only within four cities. Although the mean LST for SUHI increased, the SUHI intensity decreased due to increased LST of the cold island. The SUHI extent was more related to the inhabitant number (correlation: 0.83 to 0.98) than population density (0.39–0.58). SUHI expansion in combination with recent warming of climate is a particularly negative effect where society is ageing, like in GZM.

1. Introduction

Continuous urbanization can result in the growth of a city or changes in its structure with respect to surface types. An increase in the share of impervious surfaces built of materials with high heat capacity and low albedo at the expense of natural landscapes [1,2] diminishes the cooling effect through shading and evapotranspiration [3]. The existence of urban heat islands (UHI) intensifies the global warming induced heatwaves in cities [4]. Thus, in summer, the UHI can be considered a hazardous phenomenon for the life and health of city inhabitants. The risk is exceptionally high for the elderly due to age-related health conditions [5]. Moreover, the mortality among the inhabitants of northern Europe is higher than in its southern part [6]. In Poland, a 19-22 % increase in mortality during heat waves was observed in large cities [7]. The deaths number during the 2006 heatwave was larger by 18 % in a small town below 10,000 inhabitants in the Malopolska region and only by 4 % in Kraków [8], indicating complicated relationships between the negative impact of weather, age, size and structure of the city. Moreover, it is estimated that in Poland the risk of death due to heat stress will increase significantly, by 137-277 %, with the highest relative increase

of 180-460 % in the Silesian Voivodship [9].

The impact of urbanization on the daily functioning, health, and life of city inhabitants could also have changed over time. The urban infrastructure development and the related changes in the spatial structure of the city, which are decisive for the expansion of surface urban heat island (SUHI) over time [10,11], result in an increased number of people living or staying under the direct SUHI impact. The associated increase in SUHI intensity manifested by a greater contrast between urban and non-urban areas increases the adverse effects of SUHI on residents by increasing heat heterogeneity [12]. Moreover, the increased number of elderly people [13] staying under an impact of SUHI, can increase hospitalization and mortality index.

The temporal variability in SUHI has been studied, among others, in Wuhan (China) for 2005–2015 [14], Chattogram Metropolitan Area (CMA) of Bangladesh for 1990–2018 [15], megacities of China for 2000–2017 [10], Yerevan (Armenia) for 1989–2018 [16], and Granada (Spain) for 1985–2020 [11]. These studies concluded that the replacement of natural forms of land cover, such as agricultural land or vegetation, by artificial surfaces contributed to the increase in LST and, consequently, the expansion and strengthening of SUHI. All kinds of artificial surfaces strongly correlate with LST due to their high thermal

* Corresponding author.

E-mail address: aleksandra.renc@us.edu.pl (A. Renc).

https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110997

Received 7 August 2023; Received in revised form 23 October 2023; Accepted 29 October 2023 Available online 17 November 2023

^{0360-1323/© 2023} The Author(s). Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Abbrevi	Abbreviation									
GZM	Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis									
LST	land surface temperature									
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index									
ETM	Enhanced Thematic Mapper									
TM	Thematic Mapper									
OLI	Operational Land Imager									
TIRS	Thermal Infrared Sensor									
CLC	CORINE Land cover									
HIA	hot island area									
UHI	urban heat island									
SHI	surface heat island									
SUHI	surface urban heat island									
SUHI _{WA}	surface urban heat island without agricultural areas									
LCL SUH	II land cover limited surface urban heat island									
SCI	surface cold island									
SUHII	surface urban heat island intensity									
PSHI	permanent surface heat island									

inertia and low albedo [12,17]. In contrast, vegetation and water, due to transpiration and higher specific heat capacity, strongly lower LST [4, 10,18], thus reducing SUHI in the city [3,19]. However, sparsely vegetated surfaces dry during heatwaves and droughts, which can stop or reverse the cooling effect of vegetation [6,20].

Modifications in urban land cover types resulted in an intensification of the SUHI in many locations. In Wuhan, China, the area occupied by extremely intense SUHI increased from 3.4 % to 8.6 % during 10 year period due to progressing urbanization [14]. The extent of the strongest SUHI was found to increase by more than 10 % over 35 years in Granada, Spain [11]. In CMA (Bangladesh) the mean LST of the urban area increased from 20.17 °C (1990) to 25.83 °C (2018) due to a substantial growth of the built-up area and impervious surfaces (3.55 km²/yr) [15]. An uninterrupted impact of city infrastructure expansion on urban LST between 2000 and 2017 was also confirmed by Wang et al. [10] for 12 megalopolises in China.

Górnoślasko-Zagłębiowska Metropolis (GZM), despite the greatest deindustrialization of the country in recent years, is one of the most populated and urbanized areas in Poland, which has been developing economically for years with changes in the dominant economic sector and population loss [21]. This region, distinguished by a unique urban structure consisting of 41 districts, has developed considerably due to suburbanization, and as a result, more areas are exposed to summer SUHI. Additionally, in GZM, there is a growing group of retired residents who can be particularly exposed to the summer SUHI. This makes the study of changes in the SUHI structure during climate warming an important task. The long-term variability in SUHI characteristics has not been studied in any urban area neither in Poland nor in other central and northern European cities, which are particularly sensitive to climate change [6]. Therefore, this study discusses long-term changes in the structure and intensity of summer SUHI in the GZM, central Europe due to changes in land cover composition and population in the period 1986-2020. This study also revealed the impact of climate change-induced events like heatwaves and drought on LST and SUHI.

2. Materials and method

2.1. Study area

Located in southern Poland, the GZM occupies 2533 km^2 (Fig. 1) and consists of 41 districts, 26 of which are of urban character. This region, next to Berlin, is the second-largest urban area in Central Europe [22]. The conurbation consists of cities with similar demographic and functional potential that directly border each other, with little or non-existent peripheral areas. GZM has significantly changed over the last three decades. The central part of GZM has undergone a considerable transformation from a strongly industrial to service and business-dominated [21]. Additionally, rural and urban-rural districts surrounding the urban core of the GZM developed remarkably due to suburbanization.

The GZM has 2,229,806 inhabitants (2020), and the population density is 873 people per km². The metropolis has lost as many as 88,476 inhabitants since 2012 [50] rather due to a decline in birth rate than the migration process, thus becoming an ageing society [13]. The population aged 65+ that is particularly exposed to high-temperature risk due



Fig. 1. The location of GórnośląskoZagłębiowska Metropolis (GZM) on the background of the Silesian voivodeship and Poland.

to cardiovascular diseases is growing. The percentage of 65+ people in 2020 was higher by 5.5 % than in 2012. Currently, in 35 out of 41 GZM districts, post-working age people constitute more than 20 % of the population, whereas in 2012, such a high share of the 65+ aged was recognized only in eight districts. Despite the constantly decreasing demographic potential, GZM is developing economically, as indicated by the GDP, which increased in that region by more than 2.5 times between 2000 and 2018. Moreover, the GZM has the second largest economic potential in Poland, right after the Warsaw capital city [21].

The altitude of GZM rises from 186.7 m in its western part to the 395.7 m a.s.l. in its northeastern part (Fig. 1). The GZM has warm summers and precipitation all year round (humid continental climate – Dfb according to the Köppen-Geiger classification). The average annual air temperature equalled 9 °C in 1991–2020 at the Katowice-Muchowiec station and was higher by 1.1 °C compared to 1961–1990. Average annual precipitation amounted to 723.2 mm. There were almost 140 cloudy days on average in the research period [51].

2.2. Data

This study uses Landsat Collection 1 Level-1 satellite imagery from the Earth Explorer website [52] of the United States Geological Survey (USGS). In total, twenty one satellite images (path 189 row 25) of Landsat 4-5, Landsat 7, and Landsat 8 were collected between 1986 and 2021 during the summer days (June-August) when the SUHI is most developed and intense due to the longest days and related amount of solar radiation absorbed by the surfaces. Most images were collected for August (ten images) followed by July (six images), and June (five images). Thirteen images were cloud-free, and eight images were clouded in less than 4 % of the image. Clouds were removed from the images. The list of all analyzed satellite images is in Appendix A. Detailed information about the Landsat satellite thermal bands used in this study is included in Table 1. The Thermal Infrared Sensor (TIRS) sensor recorded in two thermal bands, 10 and 11, but due to the high uncertainty of the calibration of band 11, the USGS recommends using band 10 for LST estimation [23].

To identify satellite images recorded on days with similar meteorological conditions we used air temperature, air humidity, cloud cover, and wind speed measured at 10 UTC at the Katowice-Muchowiec station taken from OGIMET database [54].

We used all existing CLC classifications, i.e. for 1990 (CLC90), 2000 (CLC00), 2006 (CLC06), 2012 (CLC12), and 2018 (CLC18) from Copernicus Land Monitoring Services. All classifications include 44 land cover classes with a minimum mapping unit (MMU) of 25 ha and a minimum width of 100 m for linear phenomena. The time consistency for CLC 90 classification encompasses the period 1986–1998, while for the rest of the CLC classification, it is plus/minus a year to the date in the classification name [55]. Moreover, the data on the inhabitant number and population density were collected for 1995–2020 [50].

2.3. LST processing

The diagram in Fig. 2 presents the methodological steps taken to convert satellite images, estimate the correct LST and calculate the SUHI

Table 1

Characteristics of the Landsat thermal bands.

Sensor	Band	Wavelength (µ)	Spatial resolution (m)	Date of the images used
L4-5 TM	6	10.40-12.50	120 (30)	10
L7 ETM+	6	10.40-12.50	60 (30)	5
L8 TIRS	10	10.60-11.19	100 (30)	6

Explanation: In brackets are the spatial resolution of the images delivered to users [53], TM - Thematic Mapper, ETM + - Enhanced Thematic Mapper Plus, TIRS - Thermal Infrared Sensor.

indicators. Atmospheric correction for thermal bands, necessary to eliminate the influence of the atmosphere on the recorded image [24], was performed using the ATCOR module in PCI Geomatica. The ATCOR atmospheric correction delivered the brightness temperature in Kelvin representing land's surface temperature, assuming an emissivity of 1 for a perfectly black body [25], thus needing applying the emissivity factor for different surfaces to avoid errors in the estimated LST [26,27].

Land surface emissivity (e) was estimated based on the Normalized Difference Vegetation Index Thresholds Method (NDVI^{THM}) [28]. The NDVI^{THM} is the most commonly used emissivity estimation method for Landsat images due to its simplicity [15] and allows estimating the emissivity for the mixed pixels, assuming that pixels with NDVI values in the range of 0.2–0.5 are a mosaic of both natural and artificial surfaces [29]. In GZM urban areas, approximately 70 % of NDVI pixels can be classified as mixed, thus the choice of this method is reasonable.

NDVI^{THM} is based on NDVI threshold values to distinguish between soil pixels (NDVI <0.2) and pixels representing full vegetation (NDVI >0.5). The emissivity for mixed pixels (ε) (0.2 \leq NDVI \leq 0.5) was calculated based on equation (1) [30], which is a simplification of formula (2) [29]:

$$\varepsilon = 0.986 + 0.004 * F_v,$$
 (1)

$$\varepsilon = \varepsilon_{v}F_{v} + \varepsilon_{s}(1 - F_{v}) + C_{\lambda}, \qquad (2)$$

where ε_v and ε_s are the vegetation emissivity (0.99) and soil emissivity (0.96), respectively; F_v is fractional vegetation; and C represents the surface roughness with a constant value of 0.005 (for flat surfaces, it is 0). The F_v value should be calculated as follows [31]:

$$F_{\rm V} = \left(\frac{\rm NDVI - \rm NDVI_{\rm s}}{\rm NDVI_{\rm v} - \rm NDVI_{\rm s}}\right)^2,$$
(3)

where NDVI_s and NDVI_v represent the NDVI values for soil (0.2) and full vegetation (0.5), respectively [28]. The F_{v_2} needs to calculate the NDVI, which is based on visible (RED) and near-infrared (NIR) bands [32]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$
(4)

Pixels with NDVI<0 (water areas), 0.0 <NDVI< 0.2 (impervious surfaces and soil), and NDVI>0.5 (full vegetation areas), as suggested by Sobrino et al. [33], were manually attributed with an emissivity of 0.99, 0.96, and 0.99, respectively. Finally, LST was calculated according to formula (5) [26,34,35], where BT is the brightness temperature in Kelvin, λ is the wavelength of emitted radiance (10.8 μ for band 10 in L8), h is Planck's constant (6.626 \times 10⁻³⁴ J s), c is the velocity of light (2.998 \times 10⁸ m/s), σ is the Boltzmann constant (1.38 \times 10⁻²³ J/K), and ϵ is the surface emissivity. To obtain the final LST product, we transformed the surface temperature in K to degrees Celsius.

$$LST = \frac{BT}{\left\{1 + \left[\left(\frac{\lambda BT}{\frac{bc}{\sigma}}\right)In\varepsilon\right]\right\}},$$
(5)

According to Sobrino et al. [33], equation (5) generates an error of 1 % in modeled versus measured LST. Moreover, we validated each image converted to LST against Landsat Collection 2 Level-2 Surface Temperature products estimated by the single-channel algorithm provided by the USGS, using the pixel-by-pixel method. The RMSE ranged from 0.93 to 1.39 $^{\circ}$ C.

2.4. CLC reorganization

The CLC database divides land cover into five main classes of level 1: artificial surfaces, agricultural areas, forests and semi-natural areas, wetlands, and water bodies. Each of the main classes is divided into

Building and Environment 247 (2024) 110997



Fig. 2. Methodology scheme - the procedure to calculate SUHI indicators.

more detailed subclasses at level 2 and level 3, the last including as many as 44 items [36]. The unchanged method of class identification and availability since 1990 are significant advantages of the CLC classification for the studies of long-term changes.

Because urban areas are a mosaic of different types of surfaces, all classes of artificial areas (level 1) from the original CLC classification were used in this study to delineate the border of the urban areas necessary for calculating the LCL SUHI indicator (Land Cover Limited SUHI). Next, the original CLC was modified thus the level 1 class of the artificial areas was split into the two classes of "Impervious surfaces" and "Industrial and related bare land" (hereinafter called industrial bare land), the last one consisting of the 131-133 classes. Industrial bare land was separated due to its post-industrial character, with many artificial landforms, such as mines and dumps, often located near urban areas as characteristic of Silesia. "Impervious surfaces" only consist of the 111-124 and 142 classes. The original class 141 Green urban areas (level 3) was shifted to the class of "Vegetation areas", since this class, despite anthropogenic origin, is able to mitigate the SUHI. The "Wetlands" and "Water bodies" classes were joined to form "Water areas" level of class 1. A table showing the classification of CLCs before and after the reorganization of land cover types is available in Appendix B. The original CLC classification was reorganised so that to group land cover types similar with respect to physical characteristics.

2.5. SUHI indicators

In this study, we used three indicators of spatial extent and one indicator of surface urban heat island intensity, defined in Table 2. All indicators of the spatial extent of the surface heat island used in this study are based on the hot island area (HIA) index proposed by Zhang and Wang [37] and used in several Chinese cities to determine the extent of SUHI. The HIA is defined as the area with LST above the mean plus 1

Table 2

Table 2			
The indicators	of SUHI	extent and	intensity

Indicators	Criteria	Explanation
Extent		
Surface Heat Island (SHI)	$\begin{array}{l} LST > \mu + \\ 1\delta \end{array}$	$\label{eq:mean_land_surface} \begin{array}{l} \mu - mean \mbox{ land surface temperature} \\ (LST) \mbox{ for an image} \\ \delta - \mbox{ standard deviation of LST for an } \\ mage \end{array}$
Surface Urban Heat Island without agricultural areas (SUHI _{WA})	$\begin{array}{l} LST_{WA} > \\ \mu_{WA} + 1 \delta_{WA} \end{array}$	$\begin{array}{l} \mu_{WA^-} \mbox{ mean LST for an image} \\ excluding agricultural areas \\ \delta_{WA^-} \mbox{ standard deviation of LST for} \\ an image \mbox{ excluding agricultural} \\ areas \end{array}$
Land Cover Limited Surface Urban Heat Island (LCL SUHI)	$LST > \mu + 1\delta$	$\begin{array}{l} \mu-\text{mean LST for an image} \\ \delta-\text{standard deviation of LST for an} \\ \text{image} \\ \text{LCL SUHI includes only urban areas} \\ \text{according to CLC (all classes of artificial surfaces category of land} \\ \text{cover (Fig. 2)}. \end{array}$
Intensity		
Surface Urban Heat Island Intensity (SUHII)	LST _{LCL SUHI} – LST _{SCI}	LST _{LCL SUHI} – mean LST for Land Cover Limited Surface Urban Heat Island LST _{SCI} – mean LST for Surface Cold Island (SCI; SCI = LST < μ - 18, where μ – mean LST for study areas, δ –standard deviation of LST for study

standard deviation calculated from all pixels in the study area. Thus the thermal criterium was the only one used to calculate HIA index. As a result, strongly heated surfaces, including both urban and agricultural areas or exposed soils were counted into surface heat island (hereafter SHI). The SUHI_{WA} (Table 2) index excludes the agricultural land from

the areas of GZM since the agricultural areas LST, especially in the second half of August (after harvest), strongly increases the LST threshold for delineating the SHI and LCL SUHI. The spatial extent of the SHI index limited to the borders of urban areas in the GZM (artificial areas in the original CLC) is called Land Cover Limited Surface Urban Heat Island (LCL SUHI) and for the first time was defined and described in Renc et al. [38]. The term SUHI in this study refers to the surface urban heat island phenomenon in general and is used to refer to all indices collectively.

The most common measure of SUHI intensity is the temperature difference between urban and rural areas, but generally, the LST for rural areas is closely related to soil water content and vegetation cover, which fluctuate constantly depending on meteorological conditions and other seasonal effects [39]. Therefore, Alexander [4] pointed out that the difference between hot and cold zones may provide a better estimate of SUHI intensity than the urban-rural index, especially for agricultural regions where the thermal reference of rural areas could be disturbed. Therefore, an indicator based on this approach was used to assess the intensity of the SUHI in GZM. The Surface Urban Heat Island Intensity (SUHII), is defined in Table 2.

Vegetation changes every day during the growing season [40] strongly affecting the LST of the entire study area (especially after harvest). Additionally, LST significantly depends on the meteorological conditions on the day of the satellite image acquisition [15]. Therefore, the analysis was performed separately for individual months to minimize the effects of seasonality on the extent and intensity of SUHI, particularly with respect to vegetation [41] and variations in meteorological conditions. Moreover, the long-term changes in the SUHI extent were studied by comparing images recorded on similar dates and under similar meteorological conditions but with a time gap as long as possible. The following pairs of images met these conditions: 17/06/86 and 17/06/21 (35 years interval), 25/07/94 and 29/07/13 (19 years interval; heat waves occurred on both days), 31/08/90 and 31/08/19 (29 years interval). The analysis of SUHI extent, intensity, and composition described in section 3.2 and 3.4 is presented only for the above-mentioned dates. Additionally, permanent SHI (PSHI) described in section 3.3 is defined as the areas that invariably constitute the SHI between 1986 and 2019, was also delineated based on cloudless images.

2.6. Statistical analysis

The mean and standard deviation of LST were calculated for all used satellite images, however, only statistics for the images recorded on days with similar weather conditions, i.e. selected to study long-term changes in SUHI are presented. The relationships between the population, population density, and indicators of SUHI extent were assessed using the Pearson correlation and coefficient of determination for each of the 41 GZM districts. The level of $\alpha \leq 0.05$ was adopted for statistically significant cases. Relationships between demographic data and SUHI extent were calculated only for cloud-free images.

3. Results and discussion

3.1. Land cover changes

3.1.1. Extent changes

Long-term changes in land cover composition can drive the changes in the SUHI occurrence [42]. In the GZM, the extent of urban areas increased from 26.9 % in 1990 to 30.6 % in 2018 (Fig. 3). Impervious surfaces extended the most, by 4.8 %, i.e. 116.3 km², particularly between 2006 and 2012 (by 2.3 %) (Fig. 3). The largest decrease concerned agricultural areas, by 3.7 % (125.6 km² in 2018, Fig. 4). Similar tendencies in land cover types, however of a larger rate, were found in the CMA (Bangladesh), where urban areas increased by 13.6 % [15] from 1990 to 2018, and in Granada (Spain), where the built-up areas increased by 7 % from 1985 to 2020 [11]. In each of the above locations, the impervious areas extended at the expense of the agricultural lands. Sultana et al. [43] noted that the built-up area enlarged by 9.7 % and the vegetation area decreased by almost the same percentage (8.7 %) in Chandigarh, India from 2000 to 2017.

The most significant increase in vegetated areas (by 0.94 %) occurred in the last decade of the 20th century, between 1990 and 2000. However, vegetated areas covered the largest part of GZM (32.3 %) in 2012. The industrial bare land areas that decreased by 17 km² were partly transformed into water areas that increased by 5.5 km² in the research period (Fig. 4). This transformation was related to the revitalization policy of post-mining sites accomplished in this region. One of the visible examples is the Pogoria reservoirs in Dąbrowa Górnicza, i.e., the north-eastern part of the GZM (Fig. 4), which were created by the flooding of sand excavations extracted for the nearby coal mines.



Fig. 3. Changes in the area of urban areas and land cover types between 1990 and 2018 (%) based on CLC classification in GZM.

A. Renc and E. Łupikasza

Building and Environment 247 (2024) 110997



Fig. 4. Changes in the distribution of land cover types in 2018 compared to 1990 based on the 1990 and 2018 CLC classification.

3.1.2. LST changes

The mean LST of all types of land cover increased in the research period, most probably due to current climate warming. In 1991–2020 at Katowice-Muchowice station, the average daily air temperature was higher by 1.3 in June, 1.8 in July, and 1.7 in August, compared to 1961–1990. The same tendencies were found in LST. The largest increase was found for impervious surfaces (+1.9 °C, +4.3 °C, +1.8 °C for June, July and August, respectively) (Table 3). However, despite the reduction of industrial bare land area, its LST also increased over the analyzed period (+0.8 °C for June, +2.4 °C for July, +0.3 °C for August). The tendencies were largest in July, when ranged from 2.3 to 4.3 °C comparison were recorded during heat waves. Increase in mean LST between 1994 and 2013 may result from increased intensity of heat waves due to global warming.

3.2. Changes in SUHI structure

3.2.1. Changes in LST and SUHI extent

<u>LST changes.</u> The changes in land cover, especially the rise of urban areas between 1990 and 2018, affected the LST and the extent of SUHI. The LST and meteorological conditions for days when the images were taken (09 UTC) are presented in Table 4. In the research period, the mean LST of the whole study area increased by $2 \degree C$ in June, $3.4 \degree C$ in July, and $1.3 \degree C$ in August (Table 4). The LST in rural areas was significantly higher in the latest years compared to the 90s (Fig. 5A–B, Fig. 6A–B, Fig. 7A–B). This can be explained by the agricultural drought in Poland in the period 1988–2017, connected with an increase in air

temperature and insufficient precipitation, which translated into a deterioration of the water balance structure [44], thus a weakening of the cooling effect of vegetation in rural areas [6,20]. Li et al. [2] found that industrial and residential areas that replaced arable land, were the main drivers of LST variability. In the CMA (Bangladesh), an increase in LST was also found in rural settlements, by 4.2 °C, and in urban areas, by 5.7 °C, between 1990 and 2018 [15].

SUHI changes. The SUHI extent significantly depends on weather conditions thus to study its long-term changes we selected images taken on the same or close dates and during similar meteorological conditions. Keeping these conditions we found that in the case of all indicators SUHI revealed its expansion in time. Depending on the index, SUHI extended by 0.6–1.7 % for SHI, 0.6–1.2 % for SUHI_{WA} and by 0.6–4.3 % for LCL SUHI (Table 4). Both the SHI and the SUHI_{WA} indicators showed the largest SUHI expansion in June, while LCL SUHI in July. The extend in SUHI-affected area, although studied with the use of various indices, is a world-wide observed trend, that was identified in Quebec, Canada (increase by 1.5 % or 2 % in July between 1984 and 2008, [40]), and CMA, Bangladesh (by 9.8 % in 1990-2018, [15]), and in Granada Metropolis, Spain (by 1.4 %-22 % in 1985-2020, [11]). The highest-intensity SUHI also extended in several other cities including Wuhan (China) by 5.2 % in 2015–2005 [14], and Sao Jose dos Campos (Brazil) by more than 10 % between 2010 and 2017 [45]. In contrary, Tepanosyan et al. [16] found a reduction of the strongest SUHI area by 7.8 % in Yerevan (Armenia) between 1989 and 2018.

The SUHI also exhibited temporal changes in its spatial configuration, depending on month. In June, the LCL SUHI extended the most in the southern and western parts of GZM (Fig. 5 C and D), in July in the

Table 3										
Land surface	temperatures	(LST) for	land	cover	types	and	their	temporal	tenden	cies

Land	Land June			July			August		
	17/06/86	17/06/21	D	25/07/94	29/07/13	D	31/08/90	31/08/19	D
Impervious surfaces	35.0	36.9	+1.9	39.1	43.4	+4.3	30.9	32.7	+1.8
Industrial bare land	37.1	37.9	+0.8	42.0	44.4	+2.4	32.9	33.2	+0.3
Agricultural areas	30.0	32.7	+2.7	37.3	39.5	+2.3	31.4	31.9	+0.5
Vegetation areas	29.2	30.2	+1.0	32.5	36.5	+4.0	26.9	28.8	+1.9
Water areas	26.1	26.9	+0.8	29.1	33.0	+3.9	24.6	27.4	+2.8

Explanation: D - the difference in the mean LST of various land cover types between the images selected for comparison.

Table 4

Primary information of satellite data, meteorological condition, LST, and SUHI extent for GZM.

Primary information		Acquisition date					
		June		July ^H		August	
		17/06/86 ^a	17/06/21 ^a	25/07/94 ^a	29/07/2013	31/08/90	31/08/19
Sensor		TM	OLI/TIRS	TM	OLI/TIRS	TM	OLI/TIRS
CPx	%	98	97	99	100	100	100
Weather	AT (°C)	24.4	25.7	28.2	31.9	26.0	25.7
	H (%)	48	45	40	31	47	45
	V (m/s)	5	5	1	2	1	5
	Ν	3	1	1	0	0	1
LST (°C)	mean	31.3	33.1	36.3	39.7	29.9	31.2
	SD	3.8	4.0	4.3	3.9	3.4	2.8
SHI	km ²	361.1	403.5	373.8	387.4	366.1	390.3
	%	14.1	15.8	14.6	15.2	14.3	15.3
SUHI _{WA}	km ²	235.9	264.4	241.2	263.3	223.2	237.1
	%	9.2	10.4	9.4	10.3	8.7	9.3
LCL SUHI	km ²	313.5	329.4	216.8	326.7	108.6	180.7
	%	12.3	12.9	8.5	12.8	4.3	7.1

^a images with masked cloud cover, TM – The Thematic Mapper, OLI – Operational Land Imager, TIRS – Thermal Infrared Sensor, CPx – clear pixels, AT – air temperature, H – humidity, V – wind speed, N – cloudiness, SD – standard deviation, H – images captured during a heat wave.



Fig. 5. Spatial distribution of LST (A, B), SUHI indicators (C, D) in GZM in June 17, 1986 (left panel) compared to June 17, 2021 (right panel). The white spots indicate removed pixels that had been covered with cloud.

central and southern parts (Fig. 6 C and D), and in August in the entire central part (Fig. 7 C and D). However, in all analyzed months, the location of SUHI area was the same, and it was its shrink or expand which varied depending on the month. This could be related to the interseasonal variability in the properties of various surface types constituting non-urban areas (level of soil moisture, level of coverage of agricultural area by vegetation). Unchangeably in time, SUHI had the structure of an archipelago. The impact of archipelago-shaped urban structures on local climate has variously been concluded. According to Shepherd et al. [46] chains of cities could influence climate more than a

single city while Han et al. [42] claim that the polycentric nature of the metropolis can reduce the SUHI intensity.

3.2.2. SUHI composition

Fig. 8 presents the long-term changes in the contribution of selected land cover types to the SHI, $SUHI_{WA}$ and LCL SUHI in the research period. The contribution of impervious surfaces to SHI area varied significantly depending on the month, and increased by 0.5 % in June (from 76.6 % in 1986 to 77.1 % in 2021), 29 % in July (from 49.5 % in 1994 to 78.5 % in 2013), and 19.1 % in August (from 23.9 % in 1990 to

A. Renc and E. Łupikasza

Building and Environment 247 (2024) 110997



Fig. 6. Spatial distribution of LST (A, B), SUHI indicators (C, D) in GZM in July 25, 1994 (left panel) compared to July 29, 2013 (right panel). The white spots indicate removed pixels that had been covered with cloud.

43.0 % in 2019). An increase in the percentage of impervious surfaces in SHI in June in the analyzed period was small because it resulted from only changes in the extend of this type of land cover and not from the changes in differences between the mean LST of impervious surfaces and agricultural land which was similar in the studied years, reaching 5 $^\circ\mathrm{C}$ in 1986 and 4.2 °C in 2021 (Table 3). In July, the mean LST differences between impervious surfaces and agricultural areas were significant. amounting to 1.9 °C in 1994 and 3.8 °C in 2013. Due to smaller differences in LST between impervious surfaces and agricultural areas, more agricultural areas were included in SHI in 1994. Monthly differences in the percentage of SHI covered by agricultural areas were related to changes in vegetation due to harvesting. During the entire research period, impervious surfaces that covered the largest part of SUHI and this coverage increased in time (between 1986 and 2021) from 6.3 to 9.4 % in June, 7.7-14.1 % in July, and 10-12.4 % in August, according to other indicators (LCL SUHI and SUHI_{WA}) that exclude agricultural areas from the analyzes (Fig. 8).

The second biggest change was found in the contribution of agricultural areas to SHI, that was the largest in August. However, the biggest changes in the area of SHI covered by agricultural areas were found in July (decrease by 21.4 %) followed by August (decrease by 16.6 %) and June (increase by 8.9 %). The August images were recorded at the end of month, i.e., after the harvest thus the vegetated areas were replaced by strongly heated arable lands without vegetation. Only in June the percentage of SHI covered by agricultural areas more than doubled between 1986 and 2021 (+8.9 %, Fig. 8). In 1986 these areas were greener compared to 2021 when they occupied sparsely vegetated non-irrigated arable land as identified based on the image for 2021 in colors close to natural. The deepening agricultural drought in Poland and the water deficit in the soil [44] may have contributed to the drying of non-irrigated arable land in 2021 which was not observed in 1986. A decrease in the share of industrial bare land by 2.5–5.2 % for SHI, 5.7–12.4 % for LCL SUHI and 5.6–7.3 % for SUHI_{WA} depending on the month was often associated with the revitalization of these areas – transformation into water areas.

The vegetation and water areas within the SUHI result from a misinterpretation of various types of land cover by CLC as we found when comparing CLC with newer satellite images. For example, dumps were classified as water bodies and artificial surfaces were identified as vegetation areas.

3.3. Permanent SHI

We also checked in which areas SUHI permanently occurred. The long-term permanent SHI (PSHI) was calculated as the intersection of the SHI for all satellite images analyzed in this study without cloud cover, i.e. 13 images. The areas that invariably constitute the SHI between 1986 and 2019, accounted for only 0.85 % of the GZM (Fig. 9). The ranking of the GZM districts according to the percentage of PSHI is presented in Fig. 10. The PSHI area occurred in 30 out of 41 GZM districts, with the largest share in the Katowice, 20 %. The PSHI mainly occupied districts located in the central part of the GZM - Dąbrowa Górnicza (11.9 %), Sosnowiec (9.1 %) and Gliwice (9 %) (Fig. 10) and occurred within substantial industrial and commercial facilities, parking lots, mine dumps, old tenement houses in the city centres, part of the campus of the University of Silesia and entertainment hall (Fig. 9). In Beijing (China), an indicator similar to the PSHI was determined, the socalled multi frequency urban heat islands (MFUHI), characterized by a stable location of UHI in the city for several years. The authors stated that this type of stable SUHI are more hazardous for people than overall UHIs [12].

A. Renc and E. Łupikasza

Building and Environment 247 (2024) 110997



Fig. 7. Spatial distribution of LST (A, B), SUHI indicators (C, D) in GZM in August 31, 1990 (left panel) compared to August 31, 2019 (right panel).



Fig. 8. Change in land cover type within SHI, LCL SUHI and SUHI_{WA} over time. Explanation: IS – impervious surface, IBL – industrial bare land, AA – agricultural areas, VA – Vegetation areas, WA – water areas.

3.4. SUHI intensity

In the research period, the Surface Urban Heat Island Intensity (SUHII) measured as the difference between the mean LST of the LCL SUHI and the surface cold island (SCI) decreased by 0.7 °C in June, 1.4 °C in July, and 3.4 °C in August (Fig. 11 B) regardless of the increase in LST of LCL SUHI from 1.1 to 2 °C in June, 3.2–3.8 °C in July, and from 0.2 to 1.3 °C in August, depending on the indicator (Fig. 11 A). The decrease in SUHII was associated with higher LST for the coldest areas thus a smaller difference between LCL SUHI and SCI. The mean LST for the SCI increased by 2.3 °C in June, 4.6 °C in July, and 2.8 °C in August (Fig. 11 A), which also resulted in the weakening cooling efficiency of the SCI. The agricultural drought in Poland since the 1990s [44] could

reduce water supply for plants [6,20] which constituted majority of SCI in GZM, up to 85.9 % [38], and caused a weakening of the SCI. Our results indicated that green areas considered as an essential adaptation element in the era of contemporary climate change, were more sensitive to global warming than urban areas thus worth further investigations concerning SCI. Yao et al. [47] revealed that in 42.1 % of global cities (397), the intensity of daytime SUHII increased significantly, with 22.5 % of this increase in 2001–2017 due to the increased vegetation in rural areas. However, this study used an indicator based on the difference between mean LST for urban and rural areas [47] thus is not comparable with the SUHII.

Building and Environment 247 (2024) 110997







Fig. 10. The percentage distribution of PSHI in the GZM districts.

Building and Environment 247 (2024) 110997



Fig. 11. Differences between mean LST for SHI, LCL SUHI, SUHI_{WA} and SCI for dates selected for temporal changes comparison (A) and SUHI intensity (B).

3.5. Relationship between SUHI extent and demographic data

Population is one of the driving factors of urban infrastructure growth [1,2]. In the GZM, the relationships between the LCL SUHI extent and both demographic variables were statistically significant. However, LCL SUHI was stronger correlated with inhabitant number (0.83–0.98, at α <0.01 %) than with population density (0.39–0.58). The inhabitant number explained 69–95 % of the variance in the LCL SUHI extent, and the population density explained a maximum of 33 % of the variance (Table 5). The correlation between mean LST and population density (insignificant in August on 24/08/02 and 31/08/19, after harvest) was stronger than with inhabitant number. In the second half of August, the agricultural areas greatly impacted the mean LST of districts with low population density (mean LST comparable to impervious surfaces) which explains the insignificant correlation between these variables in GZM. The correlations were stronger for June and July (>0.9 for inhabitant number, >0.49 for population density) than for August.

Similar dependencies between SUHI spatial extent and population size (correlation coefficient of 0.87, [1]) and with the population density (correlation coefficient of 0.94, [37]) were found in Asian megacities. A strongly significant correlation between LST and population density was also found in Prizren, Kosovo (correlation coefficient of 0.82, [48]).

4. Conclusion

The progressive urbanization and resultant development of urban infrastructure at the expense of the other land cover types, including green areas, proved to be the main reason of SUHI development and intensification in GZM. The extent of the urban area increased from 26.9 % (688,2 km²) in 1990 to 30.6 % (780,3 km²) in 2018. The increase in impervious surfaces by 4.8 % (122,6 km²) and decrease in agricultural areas by 3.7 % (95,5 km²) due to the transformation into impervious surfaces most contributed to these changes. As a result, the SUHI

expanded by 0.6–1.7 % in June, 0.6–4.3 % in July, and 0.6–2.8 % in August, depending on the indicator and based on the images taken on the close dates (similar vegetation level) and under similar meteorological conditions. The permanent SHI, covered 0.85 % of the GZM, but over 50 % of its area was located only within four cities, located in the central part of GZM (Katowice, Dąbrowa Górnicza, Sosnowiec, and Gliwice). Of all indicators, LCL SUHI showed the biggest temporal changes for July and August due to changes in the contribution of the agricultural areas.

The SUHII decreased by 0.7–3.4 °C depending on the month, between 1986 and 2021 due to a larger increase in LST of SCI compared to LCL SUHI which resulted in a decrease in the SUHI intensity. Thus, the decrease concerned relative intensity and did not translate to better living conditions. The SUHII revealed that the cooling effect of vegetation weakened in the research period, most probably due to the agricultural drought lasting for many years in Poland which indicate the advert impact of current climate change on the cooling potential of surface cold islands. Our study showed that facing the current global warming, the research into the role of SCI in alleviating the negative effects of the summer SUHI is justified and should be performed in other cities.

In the GZM, the SUHI extent was significantly correlated with both population density and number of inhabitants; however, it was a population density that explained much higher, up to 95 % of the variance in SUHI extent. After harvest, strongly heated agricultural areas may distort the correlation between LST and population density and inhabitant numbers. Districts with a large share of agricultural areas have a smaller inhabitant number and population density, but their mean LST was as high as in strongly deloped urban districts; however, due to strongly heated agricultural areas thus weakening the above-mendioned correlations.

The mean LST for all types of land cover increased in the research period either they extend increased or decreased. The largest increase

Table 5

Pearson correlation coefficient between the NI, PD and mean LST and LCL SUHI area for satellite images without cloudiness.

Date 1	NI and mean	NI and mean LST		1 LST	NI and LCL S	NI and LCL SUHI extent		PD and LCL SUHI extent	
	r	R ²	r	R ²	r	R ²	r	\mathbb{R}^2	
28/07/95	0.28	0.08	0.54**	0.30	0.90**	0.81	0.50**	0.25	
18/08/97	0.36*	0.13	0.59**	0.34	0.83**	0.69	0.43**	0.18	
28/07/01	0.42**	0.18	0.83**	0.70	0.97**	0.94	0.58**	0.33	
24/08/02	-0.05	0.00	0.18	0.03	0.84**	0.70	0.41**	0.17	
22/08/10	0.34*	0.12	0.69**	0.47	0.96**	0.93	0.53**	0.29	
29/07/13	0.41**	0.17	0.75**	0.57	0.92**	0.84	0.49**	0.24	
03/07/15	0.42**	0.18	0.81**	0.65	0.96**	0.91	0.51**	0.26	
22/06/17	0.30	0.09	0.74**	0.55	0.98**	0.95	0.56**	0.32	
31/08/19	0.05	0.00	0.22	0.05	0.85**	0.73	0.39*	0.15	

Explanation: NI – the number of inhabitants of GZM districts, PD – the population density of GZM districts, r – Pearson correlation, R2 – coefficient of determination, * – statistically significant $\alpha = <0.05$, ** and bolded – statistically significant $\alpha = <0.01$.

was found in July, during heatwaves, which to some degree may be related to an intensification of heatwaves due to global warming.

Further intensive urbanization along with the progressing climate warming projected by the IPCC [49] will lead to further intensification of advert effect of the summer SUHI on aging societies [5] like that in GZM. Therefore, the authorities should implement adaptation measures to climate change, especially in the most intensive SUHI areas. Our research showed that studies on the long-term variability in LST and SUHI enables the impact of urbanization and climate change on the development of SUHI to be assessed. However, in order to correctly assess these effects, the necessary conditions for images being compared include very similar weather conditions and close part of a year with particular attention to the harvest period.

CRediT authorship contribution statement

Aleksandra Renc: Visualization, Validation, Software, Methodology, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. Ewa Łupikasza: Writing – review & editing, Visualization, Supervision.

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

Data will be made available on request.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at https://doi. org/10.1016/j.buildenv.2023.110997.

References

- T. Hung, D. Uchihama, S. Ochi, Y. Yasuoka, Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities, Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 8 (2006) 34–48, https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.05.003.
 L. Li, Y. Tan, S. Ying, Z. Yu, Z. Li, H. Lan, Impact of land cover and population
- [2] L. Li, Y. Tan, S. Ying, Z. Yu, Z. Li, H. Lan, Impact of land cover and population density on land surface temperature: case study in Wuhan, China, J. Appl. Remote Sens. 8 (2014), https://doi.org/10.1117/1.JRS.8.084993, 084993-1.
- [3] P. Rakoto, K. Deilami, J. Hurley, M. Amati, Q. Sun, Revisiting the cooling effects of urban greening: planning implications of vegetation types and spatial configuration, Urban For Urban Green. 64 (2021), 127266, https://doi.org/ 10.1016/j.ufue.2021.127266.
- [4] C. Alexander, Normalised difference spectral indices and urban land cover as indicators of land surface temperature (LST), Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 86 (2020), 102013, https://doi.org/10.1016/i.jag.2019.102013.
- [5] J. Robine, S. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J. Michel, F. Herrmann, Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003, C.R. Biol. 331 (2) (2008) 171–1175. https://doi.org/10.1016/j.crrj.2007.12.001.
- [6] K. Ward, S. Lauf, B. Kleinschmit, W. Endlicher, Heat waves and urban islands in Europe: a review of relevant drivers, Sci. Total Environ. 569–570 (2016) 527–539, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.119.
- [7] M. Kuchcik, M. Degórski, Heat- and cold-related mortality in the north-east of Poland as an example of the socio-economic effects of extreme hydrometeorological events in the polish lowland, Geogr. P 82 (1) (2009), https:// doi.org/10.7163/GPol.2009.1.6.
- [8] D. Graczyk, I. Pińskwar, A. Choryński, Heat-related mortality in two regions of Poland: focus on urban and rural areas during the most severe and long-lasting heatwaves, Atmosphere 13 (2022) 390, https://doi.org/10.3390/atmos13030390
- [9] K. Błażejczyk, J. Baranowski, A. Błażejczyk, Wpływ Klimatu Na Stan Zdrowia W Polsce: Stan Aktualny Oraz Prognoza Do 2100 Roku. Wyd, Akademickie SEDNO, 2015.
- [10] Y. Wang, G. Yi, X. Zhou, T. Zhang, X. Bie, J. Li, B. Ji, Spatial distribution and influencing factors on urban land surface temperature of twelve megacities in China from 2000 to 2017, Ecol. Indicat. 125 (2021), 107533, https://doi.org/ 10.1016/j.ecolind.2021.107533.
- [11] D. Hidalgo-Garcia, J. Arco-Diaz, 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), Sustain. Cities Soc. 87 (2022), 104166, https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104166.

- [12] Q. Liu, M. Xie, R. Wu, B. Chen, Z. Li, X. Li, From expanding areas to stable areas: identification, classification and determinants of multiple frequency urban heat islands, Ecol. Indicat. 130 (2021), 108046, https://doi.org/10.1016/j. ecolind.2021.108046.
- [13] I. Kotowska, Sytuacja Demograficzna Polski Diagnoza, Perspektywy, Główne Wyzwania, w: T. Wróblewski, I.E. Kotowska, J. Piekutowski, S. Stodolak. Demografia, Zeszyty Gospodarcze, 2021, nr 1, Warsaw Enterprise Institute, 2021, pp. 16–40. wei.org.pl/2021/dokumenty/raporty/admin/zeszyty-gospodarcze-1-2021-gospodarka/.
- [14] Q. Huang, J. Huang, X. Yang, Ch Fang, Y. Liang, Quantifying the seasonal contribution of coupling urban land use types on Urban Heat Island using Land Contribution Index: a case study in Wuhan, China, Sustain. Cities Soc. 44 (2019) 666–675, https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.016.
- [15] S. Roy, S. Pandit, E. Eva, M. Bagmar, M. Papia, L. Banik, T. Dube, F. Rahman, M. Razi, Examining the nexus between land surface temperature and urban growth in Chattogram Metropolitan Area of Bangladesh using long term Landsat series data, Urban Clim. 32 (2020), 100593, https://doi.org/10.1016/j. uclim.2020.100593.
- [16] G. Tepanosyan, V. Muradyan, A. Hovsepyan, G. Pinigin, A. Medvedev, S. Asmaryan, Studying spatial-temporal changes and relationship of land cover and surface Urban Heat Island derived through remote sensing in Yerevan, Armenia, Build. Environ. 187 (2021), 107390, https://doi.org/10.1016/j. buildenv.2020.107390.
- [17] S. Guha, H. Govil, A. Dey, N. Gill, Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Eur. J. Remote. Sens. 51 (1) (2018) 667–678, https://doi.org/10.1080/ 22797254.2018.14774494.
- [18] J. Geletic, M. Lehnert, S. Savic, D. Milosevic, Inter-/intra-zonal seasonal variability of the surface urban heat island based on local climate zones in three central European cities, Build. Environ. 156 (2019) 21–32, https://doi.org/10.1016/j. buildenv.2019.04.011.
- [19] R. Yao, L. Wang, X. Huang, Z. Niu, F. Liu, Q. Wang, Temporal trends of surface urban heat islands and associated determinants in major Chinese cities, Sci. Total Environ. 609 (2017) 742–754, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.217
- [20] S. Gill, J. Handley, A. Ennos, S. Pauleit, Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure, Built. Environ. (2007) 115–133, 1978, https://www. coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/Gill_Adapting_Cities.pdf. (Accessed 15 January 2023).
- [21] K. Gwozsdz, A. Sobala-Gwozsdz, P. Czakon, Current Economic Development in the GZ Metropolitan Area: Trends and Mechanisms, Institute of Urban and Regional Development, Warsaw – Krakow, 2022, no. 11–29. s.
- [22] A. Nadudvari, The localization of urban heat island in the Katowice conurbation (Poland) using the combination of land surface temperature, normalized difference vegetation index and normalized difference built-up index, Geogr. Pol. 94 (1) (2021) 111–130, https://doi.org/10.7163/GPol.0196.
 [23] United States Geological Survey (USGS), Landsat 8 Data Users Handbook,
- [23] United States Geological Survey (USGS), Landsat 8 Data Users Handbook, Department of the Interior U.S. Geological Survey, 2019 version 5.0. (Accessed 27 December 2022).
- [24] J. Barsi, J. Schott, F. Palluconi, S. Hook, Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments, Proc. SPIE 5882 (2005).
- [25] J. Walawender, Application of LANDSAT satellite data and GIS techniques for estimation of thermal conditions in urban area (using an example of Kraków agglomeration), Prace Geograficzne, IGiGG. 122 (2009) 81–98.
- [26] M. Stathopoulou, C. Cartalis, Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: an application to major cities in Greece, Sol. Energy 81 (3) (2007) 358–368, https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.014.
- [27] F. Chen, S. Yang, Z. Su, K. Wang, Effect of emissivity uncertainty on surface temperature retrieval over urban areas: investigations based on spectral libraries, ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens. 114 (2016) 53–65, https://doi.org/ 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.007.
- [28] J. Sobrino, N. Raissouni, Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco, Int. J. Rem. Sens. 21 (2) (2000) 353–366, https://doi.org/10.1080/014311600210876.
- [29] J. Sobrino, V. Caselles, F. Becker, Significance of the remotely sensed thermal infrared measurements obtained over a citrus orchard, ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens. 44 (1990) 343–354.
- [30] J. Sobrino, J. Jiménez-Muñoz, l. Paolini, Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5, Remote Sens. Environ. 90 (4) (2004) 434–440.
- [31] T. Carlson, A. Ripley, On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index, Remote Sens. Environ. 62 (1997) 241–252.
- [32] D. Parastatidis, Z. Mitraka, N. Chrysoulakis, M. Abrams, Online global land surface temperature estimation from landsat, Rem. Sens. 9 (2017) 1208. https://do i:10.3390/rs9121208.
- [33] J. Sobrino, J. Jimenez-Munoz, G. Soria, M. Romaguera, L. Guanter, J. Moreno, Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensor, IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 46 (2008) 2, https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.904834.
- [34] H. Zhang, Z. Qi, X. Ye, Y. Cai, W. Ma, M. Chen, Analysis of land use/land cover change, population shift, and their effects on spatiotemporal patterns of urban heat islands in metropolitan Shanghai, China, Appl. Geogr. 44 (2013) 121–133, https:// doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.07.021.
- [35] U. Avdan, G. Jovanovska, Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data, J. Sens. (2016), 1480307, https://doi org/10.1155/2016/1480307.
- [36] European Environmental Agency (EEA), Updated CLC Illustrated Nomenclature Guidelines, 2017. https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/corine

-land-cover-nomenclature-guidelines/docs/pdf/CLC2018_Nomenclature_illu strated_guide_20190510.pdf. (Accessed 29 December 2022).

- [37] J.Q. Zhang, Y.P. Wang, Study of the relationships between the spatial extent of surface urban heat islands and urban characteristic factors based on Landsat ETM plus data, Sensors 8 (2008) 7453–7468, https://doi.org/10.3390/s8117453.
- [38] A. Renc, E. Łupikasza, M. Blaszczyk, Spatial structure of the surface heat and cold islands in summer based on Landsat 8 imagery in southern Poland, Ecol. Indicat. 142 (2022), 109181, https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109181.[39] I. Stewart, T. Oke, Local climate zones for urban temperature studies, Bull. Am.
- Meteorol. Soc. 93 (No. 12) (2012) 1879-1900, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
- [40] P. Martin, Y. Baudouin, P. Gachon, An alternative method to characterize the surface urban heat island, Int. J. Biometeorol. 59 (2015) 849-861, https://doi.org/ 10.1007/s00484-014-0902-9
- [41] A. Emran, S. Roy, M. Bagmar, C. Mitra, Assessing topographic controls on vegetation characteristics in Chittagong Hill Tracts (CHT) from remotely sensed data, Remote Sens. Appl.: Soc. Environ. 11 (2018) 198-208, https://doi.org. 10.1016/j.rsase.2018.07.00
- [42] S. Han, W. Li, M. Kwan, C. Miao, B. Sun, Do polycentric structures reduce surface urban heat island intensity? Appl. Geogr. 146 (2022), 102766 https://doi.org/ og.2022.102 10.1016/i.a
- [43] S. Sultana, A. Satyanarayana, Assessment of urbanisation and urban heat island intensities using landsat imageries during 2000 - 2018 over a sub-tropical Indian City, Sustain. Cities Soc. 52 (2020), 101846, https://doi.org/10.1016/i 2019.101846.
- [44] I. Wójcik, A. Doroszewski, E. Wróblewska, P. Koza, Susza rolnicza w uprawie zbóż arych w Polsce w latach 2006-2017, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie 19 (2019) 77-95
- [45] C. Portela, K. Massi, T. Rodrigues, E. Alcantara, Impact of urban and industrial features on land surface temperature: evidences from satellite thermal indices, Sustain. Cities Soc. 56 (2020), 102100, https://doi.org/10.1016/j. s 2020 102100
- [46] M. Shepherd, T. Andersen, C. Strother, A. Horst, L. Bounoua, C. Mitra, Urban Climate Archipelagos: A New Framework for Urban Impacts on Climate, IEEE Earthzine, 2013. https://earthzine.org/urban-climate-archipelagos-a-new-fran work-for-urban-impacts-on-climate/

Building and Environment 247 (2024) 110997

- [47] R. Yao, L. Wang, X. Huang, W. Gong, X. Xia, Greening in rural areas increases the surface urban heat island intensity, Geophys. Res. Lett. 46 (2019) 2204–2212, https://doi.org/10.1029/2018GL081816.
- [48] M. Dushi, A. Berila, Determining the influence of population density on the land surface temperature based on remote sensing data and GIS techniques: application to Prizren, Kosovo. Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 31 (1) (2022) 47-62, https:// /doi.org/
- [49] IPCC, in: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B. R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (Eds.), Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press,, Cambridge, UK and New York, NY, US, 2021, https://doi.org/10.1017/9781009157896.

Web references

- [50] Statistic Poland, Demographic data for all GZM districts. https://bdl.stat.gov.pl/
- [50] bullstart. (Accessed 13 March 2023).
 [51] IMGW-PIB, Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute, Average annual air temperature 1991-2020 for Poland https://klimat.im n.pl/pl/climate-normals/TSR AVE. (Accessed 3 October 2023).
- [52] USGS, United States Geological Survay. Landsat Collection 1 Level-1 product. htt ps://earthexplorer.usgs.gov/. (Accessed 15 November 2022).[53] USGS, United States Geological Survay. Frequently asked questions: What are the
- band designations for the Landsat satellites? Information about spatial resolution of thermal bands delivered to users. https:// ww.usgs.gov
- nd-designations-landsat-satellites. (Accessed 3 October 2023). [54] OGIMET, Weather Information Service. Meteorological data for 10 UTC at the Katowice-Muchowiec station. http://ogimet.com/synopsc.phtml.en. (Accessed 20 December 2022).
- [55] CLMS, Copernicus Land Monitoring Service. Technical Summary Evolution of CORINE Land Cover, https://la d-covers. (Accessed 3 October 2023).

Acquisition	Sensor	CPx	LST		Weather	:		
date		(%)	(°C)					
			Mean	SD	AT	Н	N	V
					(°C)	(%)		(m/s)
June								
17/06/1986*	L5-TM	98	31.1	3.8	24.4	48	3	5
05/06/2002*	L7-ETM+	99	27.4	3.7	20.8	56	2	5
22/06/2017	L8-OLI/TIRS	100	33.6	4.5	23.9	35	3	2
12/06/2019*	L8-OLI/TIRS	99	35.4	4.2	27.9	47	2	3
17/06/2021*	L8-OLI/TIRS	97	33.1	4.0	25.7	45	1	5
July								
25/07/1994* ^H	L5-TM	99	36.3	4.3	28.2	40	1	1
28/07/1995	L5-TM	100	29.8	4.0	23.8	48	2	5
28/07/2001	L5-TM	100	26.9	3.0	22.8	59	1	1
31/07/2008*	L5-TM	96	30.4	3.5	24.2	58	2	2
29/07/2013 ^H	L8-OLI/TIRS	100	39.7	3.9	31.9	31	0	2
03/07/2015	L8-OLI/TIRS	100	33.9	3.9	25.3	37	0	4
August								
04/08/1986	L5-TM	100	32.1	3.0	27.3	54	0	4
23/08/1987	L5-TM	100	27.3	3.2	21.6	49	0	5
31/08/1990	L5-TM	100	29.9	3.4	26.0	47	0	1
28/08/1992 ^H	L5-TM	100	39.7	4.3	30.0	37	0	2
18/08/1997	L5-TM	100	27.1	4.1	21.6	43	1	4
02/08/2000*	L7-ETM+	98	29.8	3.2	24.0	55	0	3
18/08/2000*	L7-ETM+	99	28.9	3.0	23.8	70	1	3
24/08/2002	L7-ETM+	100	30.2	4.1	23.6	60	0	1
22/08/2010	L5-TM	100	28.9	3.0	24.8	62	0	3
31/08/2019	L8-OLI/TIRS	100	31.2	2.8	25.7	45	1	5

Appendix A Primary information of all satellite images used

Explanation: CPx – clear pixels, SD – standard deviation, AT – air temperature, H – humidity, N – cloudiness, V – wind speed, L5 – Landsat 5, L7 – Landsat 7, L8 – Landsat 8, * - images with masked cloud cover, bolded – images selected for comparison, $^{\rm H}$ – images captured during a heat wave.

	Original clas	sification		Reorganiz	zed
Level 1	Level 2	<u> </u>	Level 3	New group	Number class of land cover of level 3 from the original classification
1.Artificial	1. 1. Urban fabric	111	Continuous urban fabric	1. Impervious surfaces	111
surfaces	1.2. Industrial, commercial and transport units	112 121	Discontinuous urban fabric Industrial or commercial units		112 121
		122	Road and rail networks		122
		123	Port areas		123
		123	Airports		124
	1. 3. Mine, dump and construction sites	131	Mineral extraction sites		142
		132	Dump sites		
	1 4 4 4 6 1 1	133	Construction sites		
	1. 4. Artificial non- agricultural vegetated areas	141	Green urban areas		
		142	Sport and leisure facilities		
				2. Industrial and related bare land	131
					132
2.Agricultural areas	2. 1. Arable land	211	Non-irrigated arable land	3. Agricultural areas	211
		222	Fruit trees and berry		222
	2. 3. Pastures	231	Pastures		231
		242	Complex cultivation		242
		242	patterns		242
		243	by agriculture with		243
			significant areas of natural		
2 Forests and	3 1 Forests	211	vegetation Broad leaved forest	A Vegetation areas	141
semi-natural areas	5. 1. Polests	511	broad-reaved forest	4. Vegetation areas	141
					311
		312	Coniferous forest		312
		313	Mixed forest Transitional woodland		313
			scrub		
	3. 3. Open spaces with little or no vegetation	331	Beaches dunes sand plains		333
	-	333	Sparsely vegetated areas		
	4 1 Tales 1	334	Burnt areas	5 Water entry	411
4.Wetlands	4. 1. Inland wetlands	411	mand marsnes	5. water areas	411
5.Water bodies	5. 1. Continental waters	512	Water bodies		512

Ecological Indicators 169 (2024) 112871



Original Articles

Permanent and seasonally specific surface heat island structure in urban and non-urban areas in mid-latitude polycentric agglomeration based on Landsat images

Aleksandra Renc^{*}, Ewa Łupikasza

Faculty of Natural Sciences, Institute of Earth Sciences, University of Silesia in Katowice, Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec, Poland

ARTICLE INFO	ΑF	ARTI	CL	ΕI	NF	0
--------------	----	------	----	----	----	---

Keywords: SUHI Heat island Seasonality Land cover Remote sensing

ABSTRACT

The surface heat island (SHI), manifesting itself by increased surface temperatures in the city compared to the surrounding areas, is a dynamic phenomenon during the year. The study aims to recognise seasonal variability in the SHI structure (extent and composition of land cover type), and define an effective contribution and potential capability of particular land cover types for SHI development in a polycentric agglomeration based on LANDSAT satellite images. For the first time, the SHI structure was investigated separately in the urban and non-urban areas and the permanent and seasonally specific SHIs were delineated. Seasonal variability was a significant feature of SHI structure, particularly in its non-urban part, which was driven mainly by the vegetation annual cycle and altitude-dependent snow cover distribution in winter. In the majority of seasons, the intense urban SHI was conventionally compacted in the central most urbanized part of the metropolis, and its area was changing in a pulse-wise manner throughout the year from the maximum in summer to the minimum in autumn. The extent of permanent urban SHI indicating areas risky for human health was larger than the extent of seasonally specific urban SHIs. It covered 3% of GZM and was mostly composed of industrial and commercial units. Permanent nonurban SHI was scattered throughout the GZM without any clear pattern and covered only 0.4% of the entire GZM, and 75% of its area was covered by non-irrigated arable land and pastures. The identification of the surface types with permanent and seasonally variable ability to form SHI is helpful in planning urban spaces and adapting existing cities to contemporary climate changes.

1. Introduction

All types of artificial surfaces that build a city strongly modify its energy balance (Roth, 2002; Pongrácz et al., 2010; Oke et al., 2017) which manifests in increased air and surface temperatures (Arnfield, 2003; Tran et al., 2006; Huang et al., 2019) known as the atmospheric (UHI) and surface urban heat islands (SUHI). Both UHI and SUHI most clearly develop and thus are most frequently studied in summer, usually concerning their intensity (Gémes et al., 2016; Lima-Alves, 2016; Geletič et al., 2019). However, as indicated by existing single studies, the phenomenon intensity visibly varies seasonally (Oke et al., 2017; Geletič et al., 2019). The SUHI reaches its maximum intensity in summer and minimum in winter (Pongrácz et al. 2010; Sfîcâ, et al., 2023). In spring SUHI is usually more intense than in autumn (Gémes et al., 2016; Sfîcâ,

et al., 2023; Yang et al., 2020), or the difference in SUHI intensity between these seasons is minor (Geletič et al., 2019). Based on a large sample of 2027 cities worldwide, Liu et al. (2022) revealed six different seasonal SUHI patterns. These patterns were found to be driven by varying Sun elevation and length of the day, which both determine the amount of incoming solar radiation (Yang et al., 2020; Lemus-Canovas et al., 2020).

Seasonal variability in SUHI intensity also results from seasonally varying properties of some land use types like vegetation (Wang and Huang, 2015; Geletič et al., 2016; Yang et al., 2020), and periodically occurring snow cover (Stewart and Oke, 2012; Oke et al., 2017). Specific structures in the city, like high buildings and related shadowing which depends on Sun elevation, can also contribute to seasonality in the SUHI intensity (Yang et al., 2020). Factors driving seasonal SHI variability

https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112871

1470-160X/© 2024 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Abbreviations: GZM, Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis; LST, land surface temperature; CLC, CORINE Land cover; LCZ, Local Climate Zone; UHI, urban heat island; SHI, surface heat island; Urban SHI, urban surface heat island; Non-urban SHI, non-urban surface heat island. Corresponding author.

E-mail address: aleksandra.renc@us.edu.pl (A. Renc).

Received 1 July 2024; Received in revised form 13 November 2024; Accepted 17 November 2024 Available online 22 November 2024

operate on both global and local scales, which justifies the necessity for regional studies.

In contrast to SUHI intensity, seasonal variations in the SUHI distribution and composition regarding land cover types and their potential for SUHI development constitute a gap in the current knowledge which is undertaken in this study. In this study, for the first time, we distinguished between the permanent and seasonally specific surface heat island (SHI), found the significant differences in seasonal variability in SHI structure between urban and non-urban areas, and defined an effective contribution and potential capability of particular land cover types for SHI development. The SHI structure is understood as its extent and composition of various land cover types. The knowledge of land cover types capability for SHI development and its seasonal variability can be used by urban planners to transform or design the contribution of specific land cover types in the urban space, thus creating strategies for adapting to and mitigating current climate change in the cities.

It is also worth emphasising that seasonal approach alters the common perception of the SUHI as a negative phenomenon, which increases the intensity of heat waves in the city and adversely impacts the elderly, sick, and small children (Robine et al., 2008; Ma et al., 2015; Dushi and Berila, 2022), increases mortality (Macintyre et al., 2021) and demand for electricity due to air conditioning thus increases the emission of CO2 and other air pollutants (Lima-Alves, 2016). The advert SUHI effect weakens in transitional seasons, and in winter, the effect is perceived as positive due to reduced exposure to low temperatures (Macintyre et al., 2021), energy demand, and related emission of pollutants (Roxon et al., 2019). The seasonal variations in SUHI effect are well pictured by the numbers of mortality increased by 36 % in summer and reduced by 15 % in winter (Macintyre et al., 2021). Seasonal variations in the SHI effect motivated us to undertake a seasonal perspective when studying the SHI composition and land cover type capability for SHI development, which both may change in the run of the year.

The studies of SHI structure use two classifications of land cover types to separate urban areas, the CORINE Land Cover 2018 (CLC2018) or the newest Local Climate Zone (LCZ). These classifications differ from each other in the number of classes (see section 2.2 Data for more details), which raises the question of their comparability, which, as to the authors' knowledge, has never been checked. Moreover, most studies select the classification of land cover type subjectively with no justification. We also assumed that the type of classification translating into the number of discriminated land cover types diversifies particular type capability for SHI development. Therefore, in this study, we used both classifications of land cover types, CLC2018 and LCZ to check how differences in the number of classes impact the physical properties of the distinguished types, thus their abilities to reduce or enhance SHI. Our preliminary calculations revealed unexpected seasonal variability in the distribution of heated areas outside the city border, therefore, in this study, we paid separate attention to the non-urban SHI. Finally, this study answers the following questions, which all constitute the gaps in the current SHI knowledge:

- What are seasonal variations in the distribution and the composition of SHI?
- Which urban or non-urban SHI structure undergoes larger seasonal variability?
- Which land cover types most contribute to seasonal variability in the structure of urban and non-urban SHI?
- How does the selection of land cover type classification impact the thermal properties of land cover types, their contribution to SHI and SHI structure?

2. Materials and methods

2.1. Study area

The GZM is amongst the largest polycentric agglomerations in

Central Europe, with an area of 2,550 km². It is located in southern Poland, the Silesian Voivodeship, and constitutes 20 % of its area (Fig. 1). The GZM consists of 41 districts with 2.2 million inhabitants (data for 2022) and a population density of 873 people per km². Highly urbanised districts dominate GZM, however, some located on the metropolis outskirts are urban–rural (2 districts) or rural (13 districts) (Fig. 1A). The districts are strongly functionally connected, with none playing a dominant role. Next to the capital city Warsaw, GZM is Poland's most significant labour market, with ongoing economic development (Gwozsdz et al., 2022).

In GZM the altitude varies between 187.7 m in the Kłodnica River valley in the western part of the metropolis and 395.7 m in its northeastern part near Mierzęcice, Bobrowniki and Psary (Fig. 1A and B). The temperate warm transitional climate of GZM with four seasons is characterized by large weather variability. The average (1991–2020) air temperature reaches -1.2 °C in January representing winter, 9.3 °C in April representing spring, 19.1 °C in July representing summer and 8.9 °C in October representing autumn (https://klimat.ingw.pl/pl/clim ate-normals/TSR_AVE). According to the Köppen classification, GZM lies in the humid continental climate zone with mild summers and rainfall all year round (Dfb).

2.2. Data

The land surface temperature (LST) was retrieved from Landsat TM, ETM + and OLI/TIRS images based on Landsat Collection 2 Level-2 products. Images showing the LST are ready-to-use products containing all atmospheric and emission corrections. The used LST products were certified by the Committee on Earth Observation Satellites as analysis-ready data compliant (Crawford et al., 2023). Detailed information about Collection 2 Level-2 of Landsat products can be found on the USGS website (https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsatcollection-2-surface-temperature). We selected 54 cloud-free Landsat satellite images taken between 1984–2022 so that they represent each meteorological season (Table 1, appendix A), i.e. winter (DJF: December, January, February), spring (MAM: March, April, May), summer (JJA: June, July, August), and autumn (SON: September, October, November). Detailed information and the number of images acquired for a given month are gathered in Table 1.

The LST analysis was performed based on two different classifications of land cover types, CLC2018 classification (https://land.cope rnicus.eu/en/dataset-catalog) and LCZ (https://lcz-generator.rub.de/) which is currently the most commonly used in urban heat island studies worldwide. The classifications delineate various numbers of land cover types, which translate into various detailedness and physical properties of classes which may impact their seasonal contribution to SHI. Generally, the less detailed LCZ is recommended for use in urban heat island studies. However, given the purpose of this study, and our assumption that the number of distinguished land cover types impacts their physical properties and thus, contribution to SHI, the performance of both classifications has been checked.

The CLC2018 classification distinguishes urban anthropogenic structures with very high precision and accuracy, therefore, this classification was used to delineate the boundaries of urban areas. The CLC2018 distinguishes 44 land cover classes, including 11 classes of artificial surfaces (Fig. 2), and has a minimum cartographic unit of 25 ha and a geometric accuracy higher than 100 m (European Environmental Agency, 2019). It was made for Europe on behalf of The European Environment Agency. Classes constituting less than 0.1 % of the GZM area were excluded from the study. Therefore, the 222 class – *Fruit trees and berry plantations*, was not considered.

The Local Climate Zone (LCZ) classification distinguishes 17 land cover classes characterised by uniform surface cover, structure, material, and human activity (Stewart and Oke, 2012). The LCZ Map for GZM was developed in the LCZ Generator (Demuzere et al., 2021) based on training fields which were created using Google Earth dataset (Renc,



Fig. 1. The location, type of districts (A) and elevation (B) of the Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolis (GZM) on the background of the Silesian voivodeship and Poland.

Table 1 Landsat satellite data used

Season	Images number	Period	Additional information		
DJF	6	2005-2021	Dec: 2, Jan: 3, Feb: 1		
MAM	19	1985-2021	Mar: 9, Apr: 5, May: 5		
JJA	14	1986-2022	Jun: 2, Jul: 4, Aug: 8		
SON	15	1988-2022	Sep: 9, Oct: 5, Nov: 1		

2023) with an overall accuracy of 0.84 and a spatial resolution of 100 m. Out of seventeen LCZ classes, eleven were identified in GZM. All of these classes and corresponding CLC2018 classes are shown in Fig. 2.

The five LCZ classes were not identified in GZM, like compact highrise (LCZ1), compact low-rise (LCZ3), open high-rise (LCZ4), lightweight low-rise (LCZ7), heavy industry (LCZ10), and bush, scrub (LCZC). The heavy industry in the GZM occurred to be classified as LCZ8 large low-rise class, which includes all industrial and commercial areas of the metropolis.

2.3. Mean seasonal LST of images

Land surface temperatures (LST) from images recorded during the same meteorological season were averaged to get one LST image per season (Fig. 3). Thus, seasonal mean LSTs were calculated based on 6 images for DJF, 19 images for MAM, 14 images for SON, and 15 images for JJA. The Person correlation coefficients were calculated between the individual and seasonally averaged LSTs to check how much the mean LST patterns represent single images (Appendix A). These correlation coefficients were all statistically significant at least at 0.05, and ranged from 0.49 to 0.71 for DJF, 0.72 to 0.91 for MAM, 0.77 to 0.91 for JJA, and 0.44 to 0.91 for SON. The mean SON LST poorly represented the picture taken in November (correlation coefficient of 0.44) on a day

Table 2

Percentage of area occupied by SHI, urban SHI and non-urban SH	HI in GZM.

Season	SHI		Urban SHI	Non-urban SHI	Urban SHI in % GZM urban areas
	%	km2	%	%	%
DJF	15.2	387.8	7.0	8.2	23.0
Α					
29/01/	16.2	412.9	6.2	10.0	20.3
17					
26/12/	11.5	292.6	2.2	9.3	7.2
21					
В					
19/01/	17.5	446.8	6.2	11.3	20.5
19					
05/12/	10.5	266.6	3.9	6.6	12.8
19					
С					
12/01/	12.6	321.5	4.7	7.9	15.6
05					
25/02/	4.3	109.2	2.5	1.8	8.1
21					
MAM	13.8	349.5	8.9	4.9	29.2
JJA	14.0	357.9	11.4	2.6	37.6
SON	14.7	374.3	6.8	7.9	22.5

Explanation: A – snow cover distributed over the entire GZM, B – partial snow cover, and C – without snow cover.

snow cover distribution was obtained based on the natural colour composite of Landsat satellite images.

provided in Appendix A.

2.4. Surface heat island indicators

The preliminary studies indicated that the distribution of the nonurban SHI part was particularly vulnerable to seasonal variability. Therefore in this study, we also put special attention separately to urban and non-urban SHI. The SHI was calculated solely based on the thermal criterion (Zhang and Wang, 2008), according to the following equation:

much colder than other studied days. Excluding November, the correlations between the LSTs of mean and single SON images varied between 0.69 and 0.91. Descriptive statistics of LST for individual images are

In DJF, the analysis of SHI was performed separately for pictures without and with snow cover, which significantly impacts the winter LST. Due to frequent winter cloudiness in the temperate climate zone, we disposed of only six DJF images of which two are snow-cover-free (12/01/05 and 15/02/21). The other four images represent two cases – snow cover over the entire study area (29/01/17; 26/12/21), and snow cover partly covering (19/01/19; 05/12/19) the study area. The

 $SHI = mean \, seasonal \, LST < \mu - \delta$ (1)

 μ – mean seasonal LST for an image.



Fig. 2. CORINE land cover classes (111–142) and the corresponding LCZ classes identified in GZM.

Ecological Indicators 169 (2024) 112871

Ecological Indicators 169 (2024) 112871



Fig. 3. Methodology flowchart.

δ – standard deviation from mean seasonal LST for an image. The land cover limited surface urban heat island indicator, hereafter urban SHI, is defined as SHI limited to the boundaries of urban areas (Renc et al., 2022). The boundaries of urban areas were determined based on all 11 artificial surface classes of CLC2018 identified in GZM (Fig. 2). The non-urban SHI includes the SHI area, which was not classified as urban SHI, thus it lies outside the boundaries of artificial surfaces (SHI – urban SHI = non-urban SHI). The properties of natural surfaces undergo larger seasonal variability than anthropogenic surfaces due to snow cover, vegetation development, harvest, and soil moisture variability (Oke and Stewart, 2012). Therefore, seasonal variability in the properties of land surfaces is particularly important in the context of both SHI structure (composition and extent) and land cover type capa-

bilities for SHI development.

3. Results

3.1. Seasonal variation in LST

In GZM, the seasonal mean LST ranged between 30.6 °C in JJA and -0.6 °C in DJF, and it amounted to 20.2 °C in MAM and 21.2 °C in SON. In SON the LST was higher by 1 °C than in MAM due to strongly heated agricultural areas after the harvest, which increased the seasonal mean LST of the entire GZM. Lower albedo of areas covered with sparse vegetation or bare soil and reduced latent heat flux translated into a stronger response of bare soil to radiation (Geletič et al., 2019). In particular seasons the range of LST variability reached 39.1 °C in JJA, 37.7 °C in MAM, 31.0 °C in SON, and 23.8 °C in DJF. In JJA, the biggest interquartile range of 4.7 °C (Fig. 4), was due to the coexistence of



Fig. 4. Statistical distribution of seasonal mean LST. Explanation: Q1 - first quartile, Q3 - third quartile.

strongly heated impervious surfaces and cooled vegetation at the top of the vegetation growth. In DFJ, short days and less radiation reaching the ground (Lima-Alves, 2016; Lemus-Canovas et al., 2020) reduced the interquartile LST range to 1.1 °C.

The variability in the seasonal pattern of LST distribution followed the seasonal variability in vegetation. In JJA, urban areas were clearly warmer than other land cover types (Fig. 5). In MAM, the entire GZM constituted strongly heated surface due to unvegetated or sparsely vegetated vegetation, especially in agricultural areas, which had a similar LST to urban areas (Fig. 5). In SON, the thermal contrast between the surface types was strongest than in MAM, due to much lower LST of fully developed forests compared to the urban tissue, just like in JJA. Moreover, agricultural areas also had much higher LST in SON than in JJA due to the loss of vegetation after harvest.

In DJF, altitude was the seasonal-specific indirect factor affecting the LST, which decided on the distribution of snow cover. The warmest area in the western part of GZM located in the Kłodnica River valley (Fig. 1) was characteristic of the lowest altitude, thus poor snow cover in the majority of the snow-covered DJF satellite images.

3.2. Contribution of land cover types to seasonal variability in LST

The LST of different land cover types underwent various seasonal variability, which was found by Geletič et al. (2019) based on the LCZ classification. To assess the seasonal contribution of particular land cover types to SHI, the deviations of their LST from seasonally averaged mean LST for the entire image were calculated and are pictured in Fig. 6 for both classifications. The magnitude of the deviation measures the capability of particular land cover types to develop the urban and non-

Ecological Indicators 169 (2024) 112871

urban SHI.

The deviations of LST for the majority of urban classes were positive for both classifications. Generally, the LCZs for urban classes were warmer by a maximum of 0.9 °C than the corresponding CLC classes. For most seasons, the continuous urban fabric (CLC111) and corresponding compact midrise (LCZ2) classes most contributed to urban SHI with as high LST positive deviations as 7.4 - 7.5 °C in JJA, 4.1 - 4.5 °C in MAM, and 3.0-3.3 °C in SON. In DFJ, the compact river port area in Gliwice had extremely high LST due to differences in heat capacity between terrains and water, particularly clear in DJF. The port area class is distinguished only in the CLC classification (CLC123: +1.0 °C) and constitutes a small GZM area.

The contribution of three CLC classes (CLC131, 141 and 142) and LCZ9 class to urban SHI changed throughout a year from positive to negative (grey areas in Fig. 6). Generally, the green urban areas (CLC141) contributed negatively to SHI, except for MAM. In the case of sports and leisure facilities (CLC142), the deviations were negative in SON and DJF and positive in JJA and MAM. The contribution of corresponding LCZ 9 to SHI was generally positive except for SON. Seasonal variations in the contribution of these classes to SHI were closely related to the content of vegetation and water reservoirs. However, the magnitudes of LST deviations for these classes reached a maximum of +/-0.4 °C.

The contribution of non-urban areas to SHI was classificationdependent. According to LCZ, two non-urban classes, low plants (LCZD) and bare soil or sand (LCZF), contributed positively to SHI (Fig. 6). In the case of CLC2018, of all non-urban classes, only one class, the non-irrigated arable land (CLC211), was warmer than average LST all year round with the deviation varying between + 1.3 °C in SON to +



Fig. 5. Distribution of seasonal mean LST for winter (DJF), spring (MAM), summer (JJA) and autumn (SON) in GZM.

Ecological Indicators 169 (2024) 112871



Fig. 6. Deviations of the mean LST for land cover classes from the seasonal mean LST (DJF: -0.6 °C, MAM: 20.2 °C, JJA: 30.6 °C, SON: 21.2 °C) for CLC2018 (left graph) and LCZ (right panel), grey area – classes with opposite contribution to SHI, positive/negative depending on season. Explanation: CLC land cover types: 111 – Continuous urban fabric, 112 – Discontinuous urban fabric, 121 – Industrial or commercial units, 122 – Road and rail networks and associated land, 123 – Port areas, 124 – Airports, 131 – Mineral extraction sites, 132 – Dump 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 – Land principally occupied by agricultural, 311 – Broad-leaved forest, 312 – Coniferous forest, 313 – Mixed forest, 324 – Transitional woodland-shrub, 512 – Water bodies; LCZ land cover types: 2 – Compart midrise, 5 – Open indrise, 6 – Open low-rise, 8 – Large low-rise, 9 – Sparsely built, E – Bare rock or paved, A – Dense trees, B – Scattered trees, D – Low plants, F – Bare soil or sand, G – Water.

0.1 °C in DJF. The LST deviation for other classes, the pastures (CLC 231), the complex cultivation patterns class (CLC242) and agricultural class (CLC 243), varied between -0.5 to +0.8 °C depending on the season. Such seasonal fluctuations were related to seasonally changing and/or ephemeral properties of agricultural lands, like changes in ground moisture and seasonal snow coverage, the duration of which is longer on natural surfaces than on artificial surfaces (Stewart and Oke, 2012).

Generally, water bodies were characteristic of the highest negative deviations from mean seasonal LST except for DFJ, when the deviation was also negative, however, it was only slightly below average. The negative contribution of water bodies was exceptionally large in MAM (-7.2 °C), most likely due to the high heat capacity of water, which warms up slower, thus, in MAM, it was still much cooled compared to land surfaces. In DJF, the negative deviation of water LST from the mean might have been due to the icing of the lakes, in contrast to port areas (CLC123) located on unfrozen rivers whose LST positively deviated from the seasonal mean LST. Negative deviations of water LST in DJF is a regional feature which rather concerns stagnant water bodies located in the climate zone with freezing winters. In Prague and Brno in the Czech Republic, Novi Sad in Serbia (Geletič et al., 2019) and Changchun in China, water LST was found to have a warming effect (Yang et al., 2020).

The cooling effect of forests persisted all year round. However, the intensity of this cooling depended on the forests category (Fig. 6). The coniferous forest (CLC312) was the coolest forest type in the majority of seasons with LST deviation bigger by 0.2 (DFJ), 1.2 (MAM), and 1.9 °C (SON) than deciduous forests (CLC312), and by 0.7 (MAM) than mixed forests (CLC313). In contrast, in JJA, the negative LST deviation was the largest (-3.4 °C) for deciduous forests (CLC311) and mixed forests (CLC313). According to LCZ classification, which includes all forest categories to one ground cover type, the dense trees class (LCZA) was colder than mean LST (JJA: -3.1 °C, MAM and SON: -2.0 °C), while in DJF, the deviation was minor probably due to opposite effects of various

forest categories.

3.3. Seasonal variability in urban and non-urban SHI extent

3.3.1. Urban and non-urban SHI spatial distribution

In majority of seasons, the intense urban SHI was conventionally compacted in the central most urbanized part of the metropolis and its area was changing in a pulse-wise manner throughout the year from the maximum in JJA to the minimum in SON (Table 2, Fig. 7). Such seasonal pulsation was due to annual cycle in plant development and related transpiration (Liu and Weng, 2008; Geletič et al., 2016; Gémes et al., 2016; Paschalis et al. al., 2021). Interestingly, in DJF, the focal points of both non-urban and urban SHIs were shifted to the western part of the GZM (Fig. 8). This effect was entirely related to snow cover distribution, which was finest in the area of the lowest altitude. Importantly, altitude/ topography did not affect the SHI spatial distributions on days without snow cover because, in GZM, altitude is low and varies in a narrow range of 395.7 to 187.6 m a.s.l.

3.3.2. Composition of urban and non-urban SHI

The previous section clearly indicated land cover classes, which strongly contributed to SHI intensity due to large deviations of their LST from the mean LST for the entire image; however, with no attention to the spatial extent of the particular surfaces. In this section, the contribution of particular land cover classes to the SHI extent is discussed and calculated as (i) the percentage of urban SHI covered by various land cover types (Fig. 9A), which we call effective contribution of a surface to spatial SHI extent, and (ii) as the percentage of each land cover class included in urban SHI (Fig. 9B) called the potential capability of the surface type to SHI development. The second approach is an alternative to the LST deviation method, and informs on the potential capability of particular classes for SHI development regardless of their size. Such a measure of potential capability for SHI development is useful for the

A. Renc and E. Łupikasza

Ecological Indicators 169 (2024) 112871



Fig. 7. Seasonal variation in the distribution of the non-urban and urban SHIs based on CLC2018.



Fig. 8. Distribution of the non-urban SHI and urban SHI in individual winter days with A – snow cover distributed over the entire GZM, B – partial snow cover, and C – without snow cover.

A. Renc and E. Łupikasza

Ecological Indicators 169 (2024) 112871



Fig. 9. Variability of urban SHI effective contribution in seasons (A) and the potential capability of particular land cover types in creating urban SHI (B). Explanation: A – the percentage of the area occupied by land cover class within urban SHI, B – the percentage of the particular land cover type covered by the urban SHI. Explanation: CLC land cover types: 111 – Continuous urban fabric, 112 – Discontinuous urban fabric, 121 – Industrial or commercial units, 122 – Road and rail networks and associated land, 123 – Port areas, 124 – Airports, 131 – Mineral extraction sites, 132 – Dump sites, 133 – Construction sites, 141 – Green urban areas, 142 – Sport and leisure facilities.

identification of the land cover types that can enhance or limit the SHI effect. The effective contribution can be used to identify surfaces needing transformations by, for example, disjointing a particular warm land cover type with the surface capable of weakening SHI effect.

Effective contribution to urban SHI extent. In all seasons, two classes, discontinuous urban fabric (CLC112) and industrial and commercial units (CLC121), constituted together as much as 84.5 to almost 88.3 % of urban SHI. The spatial contribution of CLC112 to urban SHI varied between around 30 % in transitional seasons (MAM and SON) to more than 50 % in JJA and DJF and was larger compared to CLC121. Such a

seasonal variability might have been related to the physical properties of buildings and urban metabolism. Concrete, stone, or brick need more energy to heat up due to its high thermal mass (Golański, 2011). Therefore, when less solar radiation reaches the earth's surface in transitional seasons, these materials heat up less than in JJA. In DJF, CLC112 contribution might have been enhanced by anthropogenic heat emission. The spatial contribution of CLC121 to urban SHI in JJA was lower than in transitional seasons due to vegetation spread between the industrial and commercial units and the related cooling effect of evapotranspiration. Much smaller, however, still noticeable was also the

contribution of dump areas (CLC132, 4.6 - 6.5 %) and road and rail networks and associated land (CLC122, 2.7 - 3.8 %).

Potential capability of a land cover type to develop urban SHI. All year round, the strongest SHI potential capability belonged to continuous urban fabric (CLC111), whose area of 60 % (DJF) to almost 100 % (JJA) was included in urban SHI. In the majority of seasons, the second largest potential capability belonged to industrial and commercial units (CLC121) and dump sites (CLC132), which are characteristic of the postmining GZM landscape. Although two of these SHI favouring types, CLC111 and CLC132, constituted together only 1.1 % of the GZM, they should be avoided, and modified or eliminated to reduce the advert urban SHI effect in JJA. Only in DFJ, the highest SHI potential capability belonged to port areas (CLC123); however, in this season, SHI is considered a positive phenomenon.

The seasonal patterns of effective contribution to non-urban SHI and potential capability for non-urban SHI development for land cover types are presented in Fig. 10A and 10B, respectively. Large part of the nonurban SHI, from 67 % in DJF to 96 % in SON, was composed of four classes of agricultural land (CLC211, 231, 242, 243), with a dominant contribution of non-irrigated arable land (CLC211, 57.5 % to 85.8 % depending on season) (Fig. 10A). However, the potential capability of these classes for non-urban SHI development was much weaker compared to urban surfaces (Fig. 10B). In DJF, 29 % of non-urban SHI was composed of forests (CLC 311, 312 and 313) probably due to less snow cover on tree crowns. In MAM, despite CLC211, pastures (CLC231) contributed more than any other land cover type (13.6 %) with its strongest potential capability for non-urban SHI development in this season. Seasonal variability in the potential capability of natural surfaces for the development of non-urban SHI is related to seasonal changes in the physical properties of green areas during a growing season (Geletič et al., 2016), and agricultural activity of humans, which include agricultural burning, harvest, and different choices of crop species (Yang et al. 2020).

3.3.3. Seasonally specific and permanent non-urban and urban SHI

Seasonal variability in LST distribution indicated seasonally specific and seasonally permanent surfaces of enhanced heating, which motivated us to distinguish related seasonally specific and permanent SHI (Fig. 11 and Fig. 12). The term 'seasonally specific SHI' describes the areas included in the SHI only in one season, while 'permanent SHI' indicates the areas counted to the SHI all year round. The most extensive seasonally specific urban SHI (57.6 km²) occurred in DFJ, closely followed by JJA (57.1 km²). In DFJ, seasonally specific urban SHI constituted 32.3 % of winter urban SHI, and in JJA, it was 19.6 % of the summer urban SHI. In transitional seasons, seasonally specific urban SHI occupied only 22.8 km² (10.1 % of spring urban SHI) and 6.6 km² (3.8 % of autumn urban SHI). In DJF, JJA and SON, more than 63 % of seasonally specific urban SHI was covered by discontinuous urban fabric, and approximately 14 % by industrial and commercial areas (Table 3). In MAM, discontinuous urban fabric accounted for less than 50 % of the seasonally specific urban SHI, and the commercial areas covered 28 % of its area. The permanent urban SHI (Fig. 11) covered 75.9 km², i.e. 3 % of GZM and was mostly composed of industrial and commercial areas (48.4 %), followed by discontinuous urban fabric (37.9 %) and dump sites (7.1 %) (Table 3).

Seasonally specific non-urban SHI, in most cases, covered a larger part of the GZM than the seasonally specific urban one (Fig. 12). Seasonally specific non-urban SHI was most extensive in DJF (135.9 km²). In DJF it constituted 64.5 % of the entire non-urban SHI, and approximately 35 % of non-urban SHI distinguished in MAM and SON. Seasonally specific SHI mostly covered the western part of the metropolis in DJF; the eastern part of the metropolis (pastures, 24 % of nonurban SHI) in MAM, and it was spread over the GZM in SON (Fig. 12). In JJA, seasonally specific non-urban SHI was recognised to cover only 3.1 km^2 . In all seasons, non-irrigated arable land most contributed to seasonally specific non-urban SHI (about 52 %), while other land cover types usually occupied less than 11 % of its area (Table 4). Permanent non-urban SHI was scattered throughout the GZM without any clear pattern and covered only 0.4 % of the entire GZM as being more prone to seasonal variability, and 75 % of its area was covered by non-irrigated arable land and pastures.

4. Discussion

Seasonal variability was found to be a significant feature of SHI structure, particularly in its non-urban part, which was mostly driven by the annual cycle of vegetation, species type and distribution of snow cover in DJF which depended on altitude. The effective contribution of particular land cover types to SHI and the potential capability of these types for SHI development also underwent seasonal variability.

Seasonal variability in SHI due to vegetation cycle. The seasonal cycle of vegetation produced seasonal variability in the contribution of agricultural and forest classes to SHI. The intra-class variations in the LST of agricultural areas might have resulted from the different species composition, various content of vegetation in particular classes, and different agricultural inputs (irrigation, fertilization, care, burning, etc.), which affected the albedo and moisture content of these land cover types. The combination of various inputs from these effects decided on the strength and direction (positive/negative) of the agricultural areas' contribution to SHI and, as well as a similarity in SHI structure in MAM and JJA. In SON, after harvesting, non-urban areas were often as warm as urban areas.

Seasonal variability in forests' contribution to SHI was primarily due to the loss of leaves by deciduous forests. In JJA, broad-leaved trees at the peak of the growing season had the strongest potential to reduce LST due to the greater leaf area and, therefore, greater canopy abundance, which leads to higher albedo (DeWalle and McGuire, 1972; Lukeš et al., 2013). In the other seasons, mixed and coniferous forests had greater feasible to reduce LST than broad-leaved forests because of evergreen coniferous trees and, in DJF, snow cover more easily retained on conifers. The impact of forest type on LST was recognised based on the CLC, which takes forest composition into account. Geletič et al. (2019), who introduced the forest type to LCZ, found no clear relationships between LST and forest composition.

Seasonal variability in SHI due to snow cover distribution. In DFJ, altitude determined the snow cover distribution, thus indirectly influencing the LST in the GZM. On days free of snow cover, altitude had a minor impact on LST distribution. Topography was found to have a significant contribution to winter SUHI in Iaşi, Romania due to thermal inversions which impacted radiative heating (Sficâ et al., 2023), and in Milan, Italy, where night-time SUHI was found to be of much higher intensity than day-time SUHI (Pongrácz et al., 2010). Topography also contributed to the development of MAM SUHI in São José dos Campos (Brazil) located between two mountain ranges (Portela et al., 2020). Thus, local topography impacts SHI structure differently depending on the season, day-time, meteorological background, the occurrence of the phenomenon related to topography like air temperature inversion or snow cover, and urban structure.

Seasonally specific and permanent SHI. The urban SHI was most extensive, well-developed and less seasonally variable, while the nonurban SHI was significantly driven by seasonal variability in vegetation and snow cover if existing. The land cover type most contributing to JJA SHI was continuous urban fabric. Seasonally specific non-urban SHI was driven by non-irrigated arable land. In JJA, the extent of seasonally specific SHI was also large due to the physical properties of the materials the city is built of and the lengthened duration of sunlight. The high heat capacity of concentrate, stone, and brick is determined by their slow heat up and slow release of the accumulated heat to the surroundings (Golański, 2011). Thus, large parts of the city surfaces receive the highest amount of energy in JJA. Therefore, above 78 % of urban tissue was classified as seasonally specific urban SHI in JJA.

The permanent urban SHI covered 3 % of the entire GZM, thus, it had

Ecological Indicators 169 (2024) 112871



Fig. 10. Variability of non-urban SHI effective contribution in seasons (A) and the potential capability of particular land cover types in creating non-urban SHI (B). Explanation: A – the percentage of the area occupied by land cover class within non-urban SHI, B – the percentage of the particular land cover type covered by the non-urban SHI. Explanation: CLC land cover types: 211 – Non-irrigated arable land, 231 – Pastures, 242 – Complex cultivation patterns, 243 – Land principally occupied by agriculture with significant areas of natural vegetation, 311 – Broadleaved forest, 312 – Coniferous forest, 313 – Mixed forest, 324 – Transitional woodland-shrub, 512 – Water bodies.

A. Renc and E. Łupikasza

Ecological Indicators 169 (2024) 112871



Fig. 11. Distribution of the urban SHI occurring only in a given season (seasonally specific) and permanent urban SHI occurring in the same place in all seasons.



Fig. 12. Distribution of the non-urban SHI occurring only in a given season (seasonally specific) and permanent non-urban SHI occurring in the same place in all seasons.

a larger coverage than seasonally specific urban SHIs. In contrast, the permanent non-urban SHI covered only 0.4 % of the entire GZM. The permanent urban SHI is particularly important because it indicates the

areas risky for human health and in extreme cases, human life during heat waves in JJA (Robine et al., 2008; Ma et al., 2015; Dushi and Berila, 2022). The strategies for mitigating climate change in the cities should,

Table 3

Percentage of land cover class within urban SHI occurring only in a given season (seasonally specific) and urban SHI occurring in the same place on all seasons (permanent).

Land cover type	DFJ	MAM	JJA	SON	permanent
All seasonally specific and permanent as % of GZM	2.3	0.9	2.2	0.3	3.0
Continuous urban fabric	0.0	0.0	0.3	0.0	2.4
Discontinuous urban fabric	67.7	47.4	78.1	63.7	37.9
Industrial or commercial units	13.2	27.4	16.3	12.8	48.4
Road and rail networks and associated land	6.2	5.7	0.7	12.4	1.7
Port areas	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0
Airports	0.1	1.4	0.8	0.5	0.9
Mineral extraction sites	0.6	1.8	0.6	2.0	0.9
Dump sites	2.5	6.6	1.3	4.3	7.1
Constructions sites	0.6	0.3	0.2	0.1	0.0
Green urban areas	1.5	3.5	0.5	0.2	0.3
Sport and leisure facilities	7.1	5.8	1.2	4.2	0.4

Explanation: The total area occupied in GZM is given in brackets. The values that constituted the dominant part of urban SHI according to each indicator are bolded.

Table 4

Percentage of land cover class within non-urban SHI occurring only in a given season (seasonally specific) and non-urban SHI occurring in the same place on all seasons (permanent).

Land cover type	DFJ	MAM	JJA	SON	permanent
All seasonally specific and permanent as % of GZM	5.3	1.7	0.1	2.8	0.4
Non-irrigated arable land	52.5	57.8	70.2	85.8	64.0
Pastures	10.8	23.8	10.5	5.7	11.0
Complex cultivation patterns	1.9	6.1	6.2	3.6	4.1
Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	1.2	2.0	1.1	0.9	1.5
Broad-leaved forest	10.0	2.1	1.2	0.5	3.1
Coniferous forest	9.8	2.5	3.2	1.6	10.7
Mixed forest	9.2	1.7	1.2	0.5	1.8
Transitional woodland-shrub	1.4	3.2	4.7	1.0	1.2
Water bodies	3.0	0.9	1.6	0.5	2.6

Explanation: The total area occupied in GZM is given in brackets. The values that constituted the dominant part of non-urban SHI according to each indicator are bolded.

in the first instance, focus on the extensive areas recognised as summerspecific SHI because, in other seasons, the SHI effect is not explicitly negative. In the cities with already developed structures, these extent areas of summer-specific SHI should be disaggregated by blue-green infrastructure (Martins et al., 2016; Yu et al., 2018; Lehnert et al., 2020) preceded by an assessment of the potential capability of particular species for SHI mitigation. Another recently proposed solution is to implement so-called corridors for urban heat island mitigation (Yu et al., 2021; Rezaei et al., 2024). Due to global warming, this negative effect can also involve transitional seasons because very high daily air temperatures are becoming more frequent in SON and MAM (Wibig, 2020; Twardosz et al., 2021), which will ultimately result in lower quality and satisfaction with urban life (Roy et al., 2022) for most of the year in the future. On the other hand, in DFJ, the urban SHI positive effect can prevent an increase in mortality caused by hypothermia. Additionally, pollution reduction due to reduced household heating demand can limit the frequency of high pollution episodes, which also have deadly consequences for the local community. According to the Polish Economic Institute (2019), increased levels of PM 2.5 caused 43,000 premature deaths in 2019 in Poland. Nevertheless, the study shows that the decrease in mortality caused by winter urban SHI does not compensate for the increase in JJA mortality, which is more than twice as high as in DFJ (Macintyre et al., 2021). Such altering throughout the year effect of urban SHI is characteristic of its permanent part. Therefore, the highest potential of a positive effect of winter urban SHI lies in its seasonally specific part, particularly that which disappears in summer. These results suggest that land cover types with seasonally changing properties should be considered as a measure for adapting to and mitigating climate change effects in the city. Thus, an assessment of the potential capability of particular land cover types for SHI development and its seasonal variability should be a part of strategies for SHI mitigation. The effectiveness of blue-green infrastructure in SHI mitigation has been proven globally (Paschalis et al., 2021; Lehnert et al., 2023). Moreover, introducing greenery into the city is considered to be the simplest and cheapest way to effectively reduce the temperature in the city (Martins et al., 2016). However, it is a geographical location which determines the average climate and, thus, the species with the best SHI mitigation effect (Wang et al., 2023). In cities with advanced urbanisation processes, the implementation of green infrastructure between packed impervious surfaces will be a challenging task, however, it is necessary to provide long-term and sustainable improvement of the life quality of the city residents (Roy et al. 2023).

CORINE classification vs. LCZ classification. The patterns in seasonal LST variations were similar for corresponding land cover classes, but LCZ usually had a higher LST than LCZ. However, only CLC classification indicated clear seasonal variability in LST of some land cover types like forest and agricultural land cover types. The impact of forest type on LST was also studied by Geletič et al. (2019), who used LCZ classification and thus additionally distinguished forest types but found no significant relationships between these variables. The selection of land cover classification should depend on a study's purpose. The studies on the potential of different land cover types for SHI mitigation/ adaptation require detailed information on the type of surface, therefore the CLC would be a better choice.

5. Conclusion

Surface Heat Island underwent clear seasonal variations. These variations were largest within the non-urban SHI which almost entirely is a seasonally specific phenomenon due to an annual cycle of vegetation, agricultural activity of humans and snow cover which enhances the significance of altitude for SHI development. Of all non-urban SHI classes, agricultural areas were characteristic of the largest LST seasonal variability which in SON were warmer than in JJA. Depended on altitude, snow cover has a strong ability to modify the spatial pattern of SHI. However, the altitude had no impact on the winter SHI extent on days without snow cover, most likely due to anomalously warm winter weather conditions during the studied days.

The contribution of the six CLC classes, namely mineral extraction sites (CLC131), green urban areas (CLC141), sport and leisure facilities (CLC142), pastures (CLC231), complex cultivation patterns (CLC242), and land principally occupied by agricultural (CLC243) was subject to seasonal variability. The potential capability of these CLC classes for SHI development was small, which on the other hand indicates their cooling capability. Moreover, the tree species occurred to have various contributions to SHI depending not only on the season but also on forest type and therefore should be further investigated based on detailed information on species composition of a forest.

In DFJ and JJA, the largest part of SHI consisted of the discontinuous urban fabric, while in MAM and SON, of industrial and commercial units. Non-urban SHI was mainly composed of non-irrigated arable land and pastures in each season.

Permanent non-urban SHI covered 0.4 % of GZM in contrast to permanent urban SHI which covered 3 % of GZM. The urban SHI varied seasonally in a pulse-wise manner, while the location of the most compact areas of seasonally specific non-urban SHI varied depending on season.

Land cover types with the largest potential capability for urban SHI development, like continuous urban fabric, and dump sites, occupy a

small part of the GZM and should be first eliminated from the city tissue.

The implementation of the green areas into urban fabric lowers its LST by more than 50 % in each season as evidenced by the LST deviations for continuous urban fabric and discontinuous urban fabric. Due to vegetation, the contribution of the discontinuous urban fabric to urban SHI underwent clear seasonal variability and decided on the second largest (next to DJF) area of seasonally specific urban SHI in JJA. Nonetheless, discontinuous urban fabric and industrial and commercial units still constituted the largest part of permanent urban SHI.

Nowadays, city cooling is the most important challenge in plans for adaptation to climate change. The seasonal aspects of the urban and non-urban SHI variability based on land cover analysis are universal and provide valuable knowledge necessary to implement effective plans for urban adaptation to climate change. Those plans should consider the urban SHI that occurs only in a given season and permanently throughout the year due to their variable effects depending on the season. It is especially important for ageing European agglomerations like GZM, where urban SHI, in summer, poses a serious threat to the health and life of their residents. Future research should be focused on the green infrastructure, i.e. its composition, extent and resistance to climate change effects, which both determine its effectiveness in SHI mitigation. This research should be conducted on a regional scale regarding average climate and scenarios of its future changes which, as already mentioned, determines the species type possible to grow in particular regions.

CRediT authorship contribution statement

Aleksandra Renc: Visualization, Validation, Software, Methodology, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Ewa Łupi-kasza:** Writing – review & editing, Visualization, Supervision, Conceptualization.

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.

Acknowledgement

Publication co-financed by the National Agency for Academic Exchange under the STER program – Internationalization of Doctoral Schools, project: International from the beginning – wsparcie umiędzynarodowienia.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at https://doi. org/10.1016/j.ecolind.2024.112871.

Data availability

Data will be made available on request.

References

- Arnfield, A.J., 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. Int. J. Climatol. 2003 (23), 1–26. https://doi.org/10.1002/joc.859.
- Crawford, C.J., Roy, D.P., Arab, S., Barnes, C., Vermote, E., Hulley, G., Gerace, A., Choate, M., Engebretson, C., Micijejevic, E., Schmidt, G., Anderson, C., Anderson, M., Bouchard, M., Cook, B., Dittmeier, R., Howard, D., Jenkerson, K.M., Kleyians, T., Zahn, S., 2023. The 50-Year Landsat Collection 2 Archive. Science of Remote Sensing 8, 100103. https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100103.
- Demuzere, M., Kittner, J., Bechtel, B., 2021. LCZ Generator: a web application to create Local Climate Zone maps. Frontiers in Environmental Science 9, 637455. https:// doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455.

14

Ecological Indicators 169 (2024) 112871

- DeWalle, D., McGuire, S., 1972. Albedo variations of an oak forest in Pennsylvania. Agric Meteorol 11 107-113 https://doi.org/10.1016/0002-1571(73)90054-X
- Agric. Meteorol. 11, 107–113. https://doi.org/10.1016/0002-1571(73)90054-X. Dushi, M., Berila, A., 2022. Determining the influence of population density on the land surface temperature based on remote sensing data and GIS techniques: application to Prizren. Kosovo. Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 31 (1), 47–62. https://doi.org/10.22630/ srees.2324.
- European Environmental Agency 2019: Updated CLC illustrated nomenclature guidelines.
- Geletič, J., Lehnert, M., Dobrovolny, P., 2016. Land Surface Temperature Differences within Local Climate Zones, Based on Two Central European Cities. Remote Sesn. 8, 788. 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. Build Environ. 156, 21–32. https://doi.org/10.1016/j. buildenv.2019.04.011.
- Gémes, O., Tobak, Z., Leeuwen, B., 2016. Satellite Based Analysis of Surface Urban Heat Island Intensity. J. Environ. Geogr. 9 (1–2), 23–30. https://doi.org/10.1515/jengeo-2016-0004.
- Golański, M., 2011. Materiały budowlane jako masa termiczna w budynkach. Przegląd budowlany, 12, s. 88-93. https://bibliotekanauki.pl/articles/162224.pdf.
- Gwozsdz, K., Sobala-Gwozsdz, A., Czakon, P., 2022. Current economic development in the GZ Metropolitan Area: trends and mechanisms. Institute of Urban and Regional Development, Warsaw – Cracow, s. 11 – 29. https://irmir.pl/wp-content/uploads/ 2022/06/Current-economic-development-in-the-GZ-Metropolitan-Area_Gwosdz_ Sobala-Gwosdz_Czakon.pdf.
- Huang, Q., Huang, J., Yang, X., Fang, Ch., Liang, Y., 2019. Quantifying the seasonal contribution of coupling urban land use types on Urban Heat Island using Land Contribution Index: A case study in Wuhan, China. Sustainable Cities Soc. 44, 666–675. https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.016.
- Lehnert, M., Tokar, V., Jurek, M., Geletič, J., 2020. Summer thermal comfort in Czech cities: Measured effects of blue and green features in city centres. Int. J. Biometeorol. 65, 1277–1289. https://doi.org/10.1007/s00484-020-02010-y.
- Lehnert, M., Pánek, J., Kopp, J., Geletič, J., Květoňová, V., Jurek, M., 2023. Thermal comfort in urban areas on hot summer days and its improvement through participatory mapping: a case study of two Central European cities. Landsc Urban Plan. 233. 104713. https://doi.org/10.1016/il.landurbana.2023.104713
- Plan. 233, 104713. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104713. Lemus-Canovas, M., Martin-Vide, J., Moreno-Garcia, M., Lopez-Bustins, J., 2020. Estimating Barcelona's metropolitan daytime hot and cold poles using Landsat-8 Land Surface Temperature. Sci. Total Environ. 699, 134307. https://doi.org/ 10.1016/j.scitotenv.2019.134307.
- Lima-Alves, E., 2016. Seasonal and Spatial Variation of Surface Urban Heat Island Intensity in a Small Urban Agglomerate in Brazil. Climate 4, 61. https://doi.org/ 10.3390/cli4040061.
- Liu, H., Weng, Q., 2008. Seasonal variations in the relationship between landscape pattern and land surface temperature in Indianapolis, U.S. Environ. Monit. Assess. 144, 199–219. https://doi.org/10.1007/s10661-007-9979-5.
- Liu, Z., Zhan, W., Lai, J., Bechtel, B., Lee, X., Lee, X., Hong, F., Li, L., Huang, F., Li, J., 2022. Taxonomy of seasonal and diurnal clear-sky climatology of surface urban heat island dynamics across global cities. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 187, 14-33. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.02.019.
- Lukeš, P., Stenberg, P., Rautiainen, M., Mottus, M., Vanhatalo, K., 2013. Opticalproperties of leaves and needles for boreal tree species in Europe. Remote Sens. Lett. 4 (7), 667–676. https://doi.org/10.1080/2150704X.2013.782112.
- Ma, W., Zeng, W., Zhou, M., Wang, L., Rutherford, S., Lin, H., Liu, T., Zhang, Y., Xiao, J., Zhang, Y., Wang, X., Gu, X., Chu, C., 2015. The short-term effect of heat waves on mortality and its modifiers in China: an analysis from 66 communities. Environ. Int. 75, 103–109. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.004.
- Macintyre, H., Heaviside, C., Cai, X., Phalkey, R., 2021. The winter urban heat island: Impacts on cold-related mortality in a highly urbanized European region for present and future climate. Environ. Int. 154, 106530. https://doi.org/10.1016/j. envint.2021.106530.
- Martins, T.A.L., Adolphe, L., Bonhomme, M., Bonneaud, F., Faraut, S., Ginestet, S., Michel, C., Guyard, W., 2016. Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France. Sustain. Cities Soc. 26, 9–26. https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.05.003.
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J.A., 2017. Urban Climates s.123, 198–237. Paschalis, A., Chakraborty, T.C., Fatichi, S., Meili, N., Manoli, G., 2021. Urban Forests as Main Regulator of the Evaporative Cooling Effect in Cities. Earth and Space Sci. 2 (2), 1–14. https://doi.org/10.1029/2020AV000303.
- Pongrácz, R., Bartholy, J., Dezső, Z., 2010. Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. Phys. Chem. Earth. 35, 95–99. https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.004.
- Portela, C., Massi, K., Rodrigues, T., Alcantara, E., 2020. Impact of urban and industrial features on land surface temperature: Evidences from satellite thermal indices. Sustainable Cities Soc. 56, 102100. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102100.
- Renc, A., Łupikasza, E., Blaszczyk, M., 2022. Spatial structure of the surface heat and cold islands in summer based on Landsat 8 imagery in southern Poland. Ecol. Indic. 142, 109181. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109181.
- Renc, A., 2023. WUDAPT Level 0 training data for Katowice-GZM (Poland, Republic of), submitted to the LCZ Generator. This dataset is licensed under CC BY-NC-SA, and more information is available at https://tcz.generator.rub.de/factsheets/ 8bd3908ac4b0f4dcd52c78d299b1b6561f1a2c0e/
- 8bd3908ac4b0f4dcd52c78d299b1b6561f1a2c0e_factsheet.html. Rezaei, T., Shen, X., Chaiyarat, R., Pumijumnong, N., 2024. Effective cooling networks: Optimizing corridors for Urban Heat Island mitigation. Remote Sens. Appl. Soc. Environ. 36, 101372. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101372.

- Robine, J., Cheung, S., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J., Herrmann, F., 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. C.R. Biol. 331 (2), 171–U175. https://doi.org/10.1016/j.crvi.2007.12.001.
- Roth, M., 2002. Effects of cities on local climates. In: Proceedings of Workshop of Institute for Global Environment Studies/Asia- Pacific Network (IGES/APN) Megacity Project, Kitakyushu, Japan (CD-ROM).Roxon, J., Ulm, F., Pellenq, R., 2019. Urban Heat Island Impact on State Residential
- Roxon, J., Ulm, F., Pellenq, R., 2019. Urban Heat Island Impact on State Residential Energy Cost and CO2 Emissions in the United States. Urban Clim. 31, 100546. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100546.
- Roy, S., Bose, A., Basak, D., Chowdhury, I.R., 2023. Towards sustainable society: the sustainable livelihood security (SLS) approach for prioritizing development and understanding sustainability: an insight from West Bengal. India. Environ. Dev. Sustain. 26, 20095–20126. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03456-x.
- Roy, S., A. Bose, S. Majumder, I. Roy Chowdhury, H. G. Abdo, H. Almohamad, and A. Abdullah Al Dughairi, 2022. Evaluating Urban Environment Quality (UEQ) for Class-I Indian City: An Integrated RS-GIS Based Exploratory Spatial Analysis. Geocarto International. 38. https://doi.org/10.1080/10106049.202.2153932.
- Geocarto International, 38. https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2153932. Sficâ, L., Creţu, C., Ichim, P., Hriţac, R., 2023. Surface urban heat island of Iaşi city (Romania) and its differences from in situ screen-level air temperature measurements. Sustain. Cities Soc. 94, 104568. https://doi.org/10.1016/j. corg.2022.104568
- Stewart, I., Oke, T., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. Bull. Am.
- Meteorol. Soc. 93 (12), 1879–1900. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1.
 Tran, H., Uchihama, D., Ochi, S., Yasuoka, Y., 2006. Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 8, 34–48. https://doi.org/10.1016/j.jag.2005.05.003.
- Twardosz, R., Walanus, A., Guzik, I., 2021. Warming in Europe: Recent Trends in Annual and Seasonal temperatures. Pure Appl. Geophys. 178, 4021–4032. https://doi.org/ 10.1007/s00024-02102860-6.

Ecological Indicators 169 (2024) 112871

- Wang, J., Huang, B., 2015. Future urban climatic map development based on spatiotemporal image fusion for monitoring the seasonal response of urban heat islands to land use/cover, The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning, first ed. Routledge, New York, NY, USA.
- Wang, C., Ren, Z., Chang, X., Chang, X., Wang, G., Hong, X., Dong, Y., Guo, Y., Zhang, M., Wang, W., 2023. Understanding the cooling capacity and its potential drivers in urban forests at the single tree and cluster scales. Sustain. Cities Soc. 93, 104531. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104531.
- 104531. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104531.
 Wibig, J., 2020. Współczesne zmiany klimatu obserwacje, przyczyny, prognozy. In: Burchard-Dziubińska, M., Prandecki, K. (Eds.), Zmiana Klimatu - Skutki Dla Polskiego Społeczeństwa i Gospodarki. Warsaw, Polska Akademia Nauk, pp. 14–36 https://doi.org/10.24425/137391.
- Yang, C., Yan, F., Lei, X., Ding, X., Zheng, Y., Liu, L., Zhang, S., 2020. Investigating Seasonal Eects of Dominant Driving Factors on Urban Land Surface Temperature in a Snow-Climate City in China. Remote Sens. 12, 3006. https://doi.org/10.3390/ rs12183006.
- Yu, Q., Acheampong, M., Pu, R., Landry, S.M., Ji, W., Dahigamuwa, T., 2018. Assessing effects of urban vegetation height on land surface temperature in the City of Tampa, Florida, USA. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 73, 712–717. https://doi.org/10.1016/ j.jag.2018.08.016.
- Yu, Z., Zhang, J., Yang, G., 2021. How to build a heat network to alleviate surface heat island effect? Sustain. Cities Soc. 74, 103135. https://doi.org/10.1016/j. scs 2021 103135
- Zhang, J.Q., Wang, Y.P., 2008. Study of the relationships between the spatial extent of surface urban heat islands and urban characteristic factors based on Landsat ETM plus data. Sensors 8, 7453–7468. https://doi.org/10.3390/s8117453.

Season	Month	Image Date Correlation number coefficient between individual L and mean seasonal LS				LST [°C] ST F					
				\mathbb{R}^2	r	MIN	MAX N	1EAN	SD		
	DEC	1	05.12.2019	0,48	0,69	-7.7	16.0	0.0	0.98		
		2	26.12.2021	0,24	0,49	-15.6	11.2	-8.3	1.19		
TER		3	12.01.2005	0,47	0,68	-11.1	26.2	3.5	1.13		
LNIN		4	29.01.2017	0,51	0,71	-11.8	14.2	-6.9	1.32		
		5	19.01.2019	0,45	0,67	-12.9	15.8	-4.2	1.77		
	FAB	6	25.02.2021	0,33	0,57	0.3	30.4	12.1	1.96		
	MAR	1	24.03.1990	0,61	0,78	4.95	38.6	15.0	2.02		
		2	11.03.1997	0,51	0,72	-2.83	58.2	10.8	1.94		
		3	30.03.1998	0,85	0,92	2.59	42.1	14.8	2.69		
		4	17.03.2002	0,69	0,83	2.01	55.3	16.6	2.10		
		5	07.03.2007	0,57	0,75	-14.8	43.7	15.4	2.00		
		6	09.03.2008	0,69	0,83	-17.7	46.2	10.2	2.09		
		7	02.03.2011	0,74	0,86	-17.3	25.6	3.3	1.85		
		8	10.03.2014	0,78	0,88	5.2	48.6	14.7	2.05		
r ک		9	24.03.2022	0,69	0,83	6.5	37.0	18.9	2.81		
RIN(APR	10	09.04.1996	0,64	0,80	-3.2	67.1	13.6	2.87		
SP		11	28.04.2000	0,80	0,89	14.3	76.5	30.2	3.95		
		12	15.04.2004	0,82	0,91	2.8	45.8	22.0	3.03		
		13	29.04.2009	0,76	0,87	7.7	56.0	28.8	4.53		
		14	11.04.2020	0,69	0,83	7.3	43.2	23.4	3.31		
	MAY	15	13.05.1985	0,54	0,73	5.4	62.7	31.9	3.70		
		16	16.05.1992	0,72	0,85	12.0	50.8	24.7	3.80		
		17	03.05.1993	0,70	0,84	13.1	83.8	28.6	3.86		
		18	14.05.2000	0,74	0,86	13.0	72.0	27.0	5.17		
		19	04.05.2002	0,77	0,88	14.8	90.4	33.8	3.94		
Z Z	JUN	1	22.06.2017	0,81	0,90	22.3	60.4	32.7	4.73		
SUI ME		2	20.06.2022	0,73	0,86	17.2	62.3	33.5	4.31		

Appendix A

	JUL	3	28.07.1995	0,78	0,88	14.4	52.0	27.7	3.62
		4	28.07.2001	0,83	0,91	17.6	70.1	27.2	3.23
		5	29.07.2013	0,84	0,92	27.3	67.7	38.7	4.11
		6	03.07.2015	0,85	0,92	21.9	78.0	32.5	4.07
	AUG	7	04.08.1986	0,74	0,86	19.9	63.4	24.7	3.01
		8	23.08.1987	0,77	0,88	15.7	65.9	29.0	2.82
		9	31.08.1990	0,60	0,78	18.5	53.1	36.0	3.34
		10	28.08.1992	0,60	0,77	21.5	58.3	30.6	3.85
		11	18.08.1997	0,83	0,91	15.0	60.5	26.0	3.68
		12	24.08.2002	0,71	0,84	18.7	75.3	28.9	3.73
		13	22.08.2010	0,81	0,90	14.2	58.1	29.3	3.22
		14	31.08.2019	0,67	0,82	24.5	53.9	31.9	3.18
	SEP	1	13.09.1989	0,77	0,88	12.1	44.3	19.3	2.63
		2	24.09.1993	0,77	0,88	13.9	67.9	25.1	2.67
		3	27.09.2000	0,81	0,90	11.3	47.3	19.6	2.35
		4	20.09.2003	0,80	0,90	16.5	56.3	28.0	3.12
		5	09.09.2005	0,86	0,93	10.8	54.9	28.9	3.18
		6	12.09.2006	0,86	0,93	-0.3	54.8	23.6	2.73
N		7	23.09.2010	0,86	0,93	1.3	44.1	21.2	2.52
IUL		8	26.09.2011	0,82	0,91	5.6	45.5	23.1	2.89
AU		9	08.09.2022	0,75	0,87	18.5	48.9	28.8	3.17
	OCT	10	12.10.1988	0,47	0,69	7.8	45.7	16.6	1.94
		11	09.10.2010	0,83	0,91	-10.8	58.1	13.1	1.82
		12	15.10.2018	0,77	0,88	13.5	38.2	20.6	2.00
		13	10.10.2022	0,79	0,89	11.2	33.6	16.5	1.77
		14	26.10.2022	0,73	0,86	10.5	32.0	16.5	1.45
	NOV	15	05.11.2014	0,19	0,44	3.79	36.8	16.5	1.11

 $\label{eq:explanation: R2-determination coefficient, r-r-Pearson correlation coefficient, MIN-minimum, MAX-maximum, SD-standard deviation$