

MIEJSKA WYSPA CIEPŁA W KIELCACH W ŚWIETLE POMIARÓW NAZIEMNYCH I ZOBRAZOWAŃ SATELITARNYCH

Urban Heat Island in the city of Kielce as derived from *in-situ* measurements and satellite imagery

KRZYSZTOF JARZYNA¹ 

Zarys treści. W pracy zbadano zmiany intensywności atmosferycznej miejskiej wyspy ciepła (MWC) w Kielcach w okresie 2010–2018 w przebiegu dobowym i rocznym, wykorzystując cegodzinne dane temperatury powietrza z dwóch stacji pomiarowych: miejskiej i pozamiejskiej. MWC zdefiniowano jako sytuację, w której temperatura powietrza na stacji miejskiej była wyższa niż na stacji pozamiejskiej. Określono też przestrzenny zasięg powierzchniowej wyspy ciepła (PWC) na podstawie analizy czterech zobrażeń satelitarnych LANDSAT 8. Stwierdzono, że średnia intensywność MWC w Kielcach wynosi 0,5°C, zaś maksymalna 8,3°C. Wyraźnie zaznacza się dobowy i roczny przebieg intensywności MWC, z największymi wartościami latem i w godzinach nocnych. W godzinach porannych MWC w Kielcach często zanika zastępowane przez „jezioro chłodu”, czyli sytuację, w której uprzywilejowany termicznie był teren pozamiejski. Roczna zmienność intensywności MWC jest w dużym stopniu efektem zmian zachmurzenia. PWC obejmowała 34–70% powierzchni miasta. Jej największą intensywność wykryto w obszarach z wielkopowierzchniowymi budynkami przemysłowymi, handlowymi i magazynowymi. Najniższą temperaturę powierzchni czynnej (LST) mają: zbiorniki wodne, kompleksy leśne i tereny zielone w dolinie rzeki Silnica.

Słowa kluczowe: atmosferyczna i powierzchniowa miejska wyspa ciepła, Kielce

Abstract. The intensity of the atmospheric Urban Heat Island (UHI) effect in the city of Kielce (central-southern Poland) was studied for the 2010–2018 period, in particular its diurnal and annual variability. The UHI is defined as a positive difference in hourly air temperature between the centre and outskirts of a city or town. Meanwhile, four LANDSAT 8 images were used to delimit the Surface Heat Island (SHI). The average annual intensity of the atmospheric UHI in Kielce is 0.5°C, while its maximum intensity was 8.3°C in the studied period. The highest average intensity of the UHI is recorded at night during the summer. The inverse state known as the “cold island” (when the air temperature is higher on the outskirts) often occurs in Kielce in the morning. A seasonal variability of the intensity of the UHI depends largely on the total cloudiness. SHI covered 34–70% of the area of Kielce. The highest intensity of SHI was found in areas where large low-rise industrial, commercial and storage buildings are located. The lowest Land Surface Temperature (LST) was found for forests, water bodies and green areas, especially in the area adjacent to the Silnica River.

Key words: atmospheric and surface Urban Heat Island, Kielce

Wprowadzenie

Miejska wyspa ciepła (MWC) jest jednym z najlepiej zbadanych zjawisk charakterystycznych dla klimatu lokalnego miast. W jej badaniach stosowane są zarówno naziemne pomiary temperatury powietrza, jak i metody teledetekcyjne. W efekcie badania skupiają się na dwóch odrębnych, choć powiązanych ze sobą zjawiskach: atmosferycznej i powierzchniowej MWC. W odniesieniu do atmosferycznej MWC również wydziela się dwa ty-

py tego zjawiska: wielokomórkowy, tworzący się w warunkach bezwietrznych i przy bardzo słabym wietrze, oraz jednokomórkowy, występujący przy nieco silniejszym wietrze o prędkości 2–4 m·s⁻¹ (Błażejczyk i in. 2014).

Stosunkowo wcześniej odkryto też, że maksymalne natężenie MWC wzrasta wraz z wielkością miasta (Oke 1973). W dużych miastach z gęstą, wysoką zabudową w dzielnicach centralnych, gdzie dominuje sztuczne podłoże zjawisko to wykształca się najwyraźniej. Dlatego między innymi prace polskich autorów poświęcone MWC skupia-

¹ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa; e-mail: k.jarzyna3@uw.edu.pl, ORCID: 0000-0001-6518-3395

ją się na największych polskich miastach: Warszawie, Krakowie, Wrocławiu, Łodzi, Poznaniu oraz na silnie zurbanizowanym regionie górnośląsko-zagłębiowskim (m.in.: Kłysik, Fortuniak 1998; Szymanowski 2004; Bokwa 2009; Stopa-Boryczka i in. 2011; Błażejczyk i in. 2014; Półrolniczak i in. 2019; Renc i in. 2022). Badano też miejską wyspę ciepła w mniejszych polskich miastach, takich jak: Lublin, Bydgoszcz, Toruń czy Stargard Szczeciński, ale za wyjątkiem Torunia poświęcono im pojedyncze prace (m.in.: Filipiuk i in. 1998; Dudek i in. 2010; Szyłobryt i in. 2013; Przybylak i in. 2017). Słabo zbadana jest również miejska wyspa ciepła w liczących około 185 tys. mieszkańców Kielcach.

W ostatnich dwudziestu kilku latach powstało szereg studiów zróżnicowania warunków termicznych w Kielcach (m.in.: Żarnowiecki 2002, 2003; Olszewski i in. 2003; Jarzyna, Żarnowiecki 2016). Poza pracą Jarzyny i Żarnowieckiego badania te opierały się na krótkich ciągach danych pomiarowych, o długości do około 40 dni. W pracy Jarzyny i Żarnowieckiego porównano warunki termiczne w centrum Kielc i na ich peryferiach w okresie 2012–2015, ale tylko w dniach gorących, czyli głównie latem.

Celem niniejszej pracy jest porównanie warunków termicznych w centrum Kielc i poza nimi niezależnie od pory roku oraz warunków pogodowych. Jako że porównanie to dotyczyło danych temperatury powietrza pochodzących tylko z dwóch punktów pomiarowych, dodatkowo oszacowano przestrzenne zróżnicowanie powierzchniowej wyspy ciepła (SHI), wykorzystując kilka zobrażeń satelitarnych LANDSAT 8 z okresu letniego.

Materialy i metody

W pracy wykorzystano codzienne wartości temperatury powietrza, zarejestrowane w okresie od stycznia 2010 roku do maja 2018 roku. Dane pochodzą z dwóch stacji pomiarowych: stacji meteorologicznej Instytutu Meteorologii i Gospodarki Przestrzennej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB) Kielce-Suków oraz niedziałającej już stacji monitoringu powietrza WIOŚ (Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska) przy ul. Jagiellońskiej w Kielcach. Odległość w linii prostej między punktami pomiarowymi wynosi około 9 km (rys. 1).

W analizach wykorzystano też codzienne wartości zachmurzenia ogólnego nieba ze stacji IMGW-PIB Kielce-Suków.

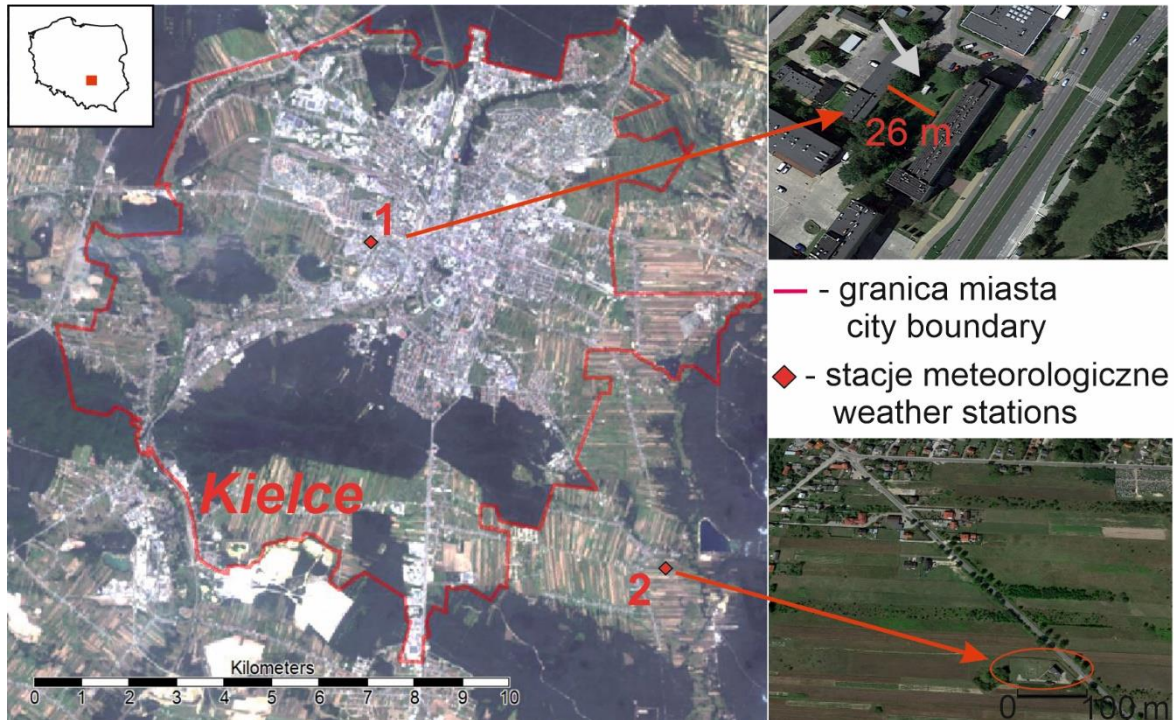
Pomiary przy ul. Jagiellońskiej reprezentują warunki centrum miasta, zaś pomiary w Sukowie warunki tła podmiejskiego. Stacja pomiarowa WIOŚ w centrum Kielc zlokalizowana była wśród luźnej zabudowy wielokondygnacyjnej, między dwoma budynkami. Stacja Kielce-Suków znajduje się wśród pól na peryferiach Kielc (rys. 1).

Dane ze stacji meteorologicznej Kielce-Suków pobrano z portalu Dane Publiczne IMGW-PIB (IMGW-PIB 2023). Dane ze stacji monitoringu powietrza przy ul. Jagiellońskiej zostały udostępnione przez świętokrzyski WIOŚ. W sumie przeanalizowano 70 939 synchronicznych pomiarów temperatury powietrza z centrum Kielc i z obszaru poza miastem.

Przyrządy pomiarowe na obu stacjach umieszczone były na różnych wysokościach. Na stacji meteorologicznej IMGW-PIB Kielce-Suków pomiar temperatury powietrza prowadzony jest na standardowej wysokości 2 m n.p.g., a przyrządy na stacji pomiarowej WIOŚ znajdowały się na wysokości 3,5 m n.p.g. Pomiar temperatury powietrza na stacji WIOŚ prowadzono termometrem rezystancyjnym NTC o dokładności pomiaru 0,15°C. Nie wprowadzano poprawek do wartości temperatury powietrza ze względu na różnice wysokości termometrów w analizowanych punktach pomiarowych. Gradient termiczny powyżej wysokości 2 m jest znacznie mniejszy niż przy powierzchni ziemi, więc przy różnicy wysokości 1,5 m poprawka ta byłaby mniejsza niż dokładność pomiaru.

Natężenie miejskiej wyspy ciepła określono na podstawie różnic pomiędzy temperaturą powietrza w centrum miasta, a temperaturą poza miastem ($t_{K-S} = t_{Kielce} - t_{Suków}$). W analizie różnic t_{K-S} zastosowano proste statystyki: średnią arytmetyczną, medianę, kwartył dolny i kwartył górny. Przeanalizowano też zmienność roczną i zmienność dobową różnic t_{K-S} . Istotność statystyczną różnic t_{K-S} w poszczególnych miesiącach określono nieparametrycznym testem Kruskala-Wallisa. Obliczono też częstość występowania MWC oraz obserwacji, w których temperatura powietrza w obu punktach była taka sama lub występowało uprzywilejowanie termiczne terenu podmiejskiego. Tę samą metodykę zastosowano również dla podzbiorów danych wydzielonych w zależności od zachmurzenia ogólnego (0/8, $\leq 2/8$, $\leq 4/8$ i $\geq 7/8$).

Wyznaczono też największe natężenie MWC w Kielcach oraz najniższą wartość t_{K-S} , czyli sytuację, w której uprzywilejowanie termiczne obszaru podmiejskiego było największe. Duże różnice termiczne między miastem a terenem pozamiej-



Rys. 1. Lokalizacja punktów pomiarów temperatury powietrza

1 – stacja pomiarowa WIOŚ w Kielcach (stacja miejska),

2 – stacja meteorologiczna IMGW-PIB Kielce-Suków (stacja podmiejska)

Źródła materiałów kartograficznych: duża mapa – kompozycja w barwach naturalnych na podstawie zobrażenia LANDSAT 8 z portalu Earth Explorer (2023), małe mapy pobrane z Google Earth (2023)

Location of air temperature measurement points

- 1 – measurement point of the Inspectorate of Environmental Protection in Kielce (urban weather station),
2 – weather station of the Institute of Meteorology and Water Management, National Research Institute in Kielce-Suków (rural weather station)

Source of maps: big map – LANDSAT 8 true colour RGB composite, a satellite imagery downloaded from Earth Explorer (2023), small maps retrieved from Google Earth (2023)

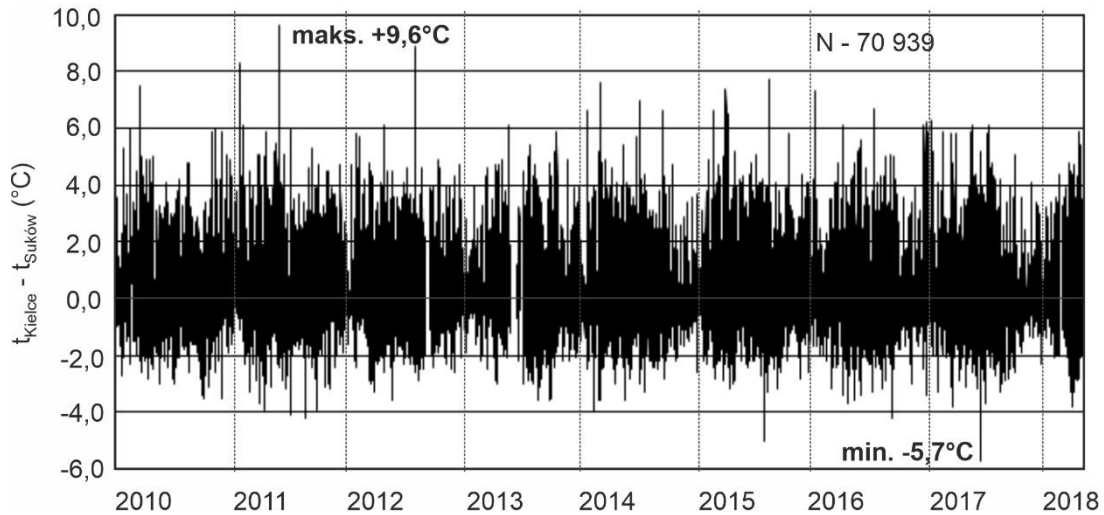
skim mogą wynikać z niesynchronicznego przemieszczania się nad oboma punktami pomiarowymi frontów atmosferycznych i komórek burzowych (Kłysik, Fortuniak 1998; Krawczyk i in. 2022). Dlatego, korzystając z kalendarza typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej Niedźwiedzia (2017) oraz archiwalnych map synoptycznych i map zbiorczych odbiciowości radarowej (IMGW-PIB 2023), wskazano sytuacje z największymi różnicami t_{k-s} , które nie wiązały się z oddziaływaniem makro- i mezoskalowych układów cyrkulacyjnych.

W pracy wykorzystano też cztery zobrażenia satelitarne LANDSAT 8 (kanał 10 – termalny) z dni: 12.07.2015, 8.08.2016, 11.08.2017 oraz 30.06.2019 z godziny 10:26 CET. Zobrażenie pozyskano z portalu Earth Explorer (2023). Na ich podstawie obliczono temperaturę powierzchni (LST) zgodnie z metodą opisaną w pracy Avdan i Jovanovska (2016) z wykorzystaniem oprogramowania SAGA GIS (Conrad i in. 2015). Kry-

terium wydzielania powierzchniowej wyspy ciepła (PWC) w granicach administracyjnych Kielc była różnica pomiędzy LST poszczególnych pikseli w mieście, a LST piksela o współrzędnych geograficznych pokrywających się ze stacją meteorologiczną IMGW-PIB Kielce-Suków (ΔLST). Obliczono powierzchnię PWC w Kielcach oraz największe odchylenia LST w Kielcach od wartości LST wokół stacji meteorologicznej Kielce-Suków. Dokonano też jakościowego porównania lokalizacji obszarów mapy ΔLST z klasami użytkowania/pokrycia terenu (LULC) według Corine Land Cover 2018 (Geoportal 2024).

Wyniki

Wartości różnicy pomiędzy temperaturą powietrza w centrum Kielc a temperaturą poza miastem (t_{k-s}) były w badanym okresie bardzo zmienne (rys. 2). Analizowane różnice zawierały się



Rys. 2. Różnice pomiędzy temperaturą powietrza (°C) w centrum Kielc (t_{Kielce}) i poza miastem (t_{Sukow}) w okresie 1.01.2010–23.05.2018

Differences in air temperature (°C) between city centre (t_{Kielce}) and rural area (t_{Sukow}), 1st January, 2010 to 23rd May, 2018

w przedziale od $-5,7^{\circ}\text{C}$ do $+9,6^{\circ}\text{C}$. Widać też, że w chłodnej części roku zakres zmian różnic był zwykle mniejszy niż w ciepłej części roku.

W okresie 2010–2018 średnia różnica temperatury powietrza pomiędzy stacją WIOŚ w centrum Kielc a podkieleckim Sukowem wynosiła $0,5^{\circ}\text{C}$. Mediana tej różnicy jest mniejsza i wynosi $0,2^{\circ}\text{C}$.

Należy jednak zaznaczyć, że MWC, czyli zjawisko definiowane jako sytuacja, w której temperatura powietrza w mieście jest wyższa niż w obszarze pozamiejskim, występowała w Kielcach tylko w 56,3% wszystkich obserwacji. Pozostałe sytuacje obejmują synchroniczne pomiary, w trakcie których ciepłej było poza miastem (38,4% obserwacji), czyli tak zwane „jezioro chłodu” (JC) oraz pomiary, w których temperatura w obu punktach była taka sama (5,3% obserwacji).

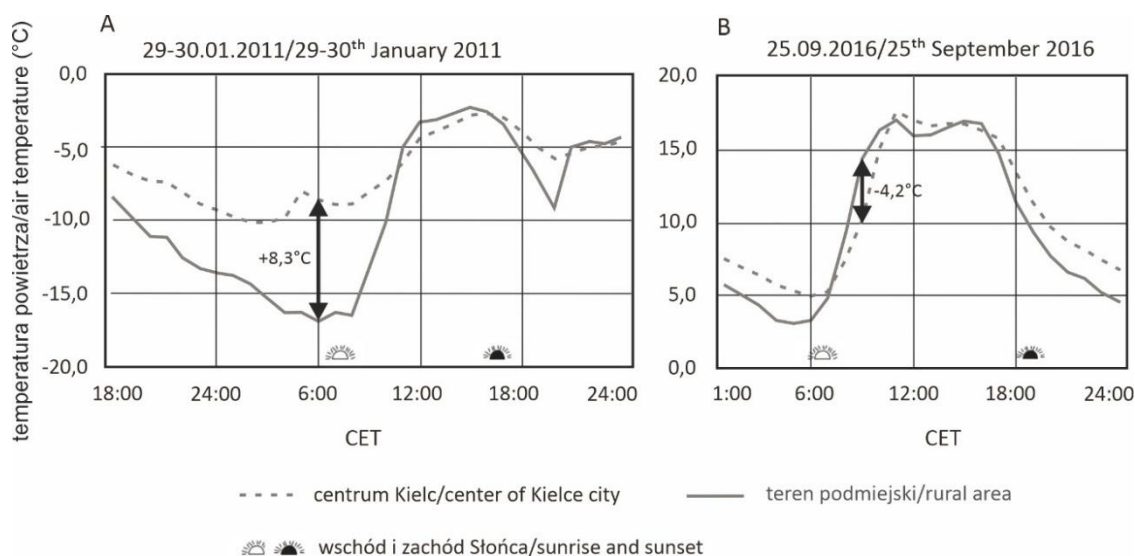
Ogólnie jednak natężenie zarówno MWC, jak i JC w Kielcach nie jest duże. W połowie badanych przypadków (50,7%) wartości temperatury powietrza w obu punktach były takie same lub różnica ta nie była większa niż $0,5^{\circ}\text{C}$. W 16,3% przypadków różnica nie przekraczała $0,1^{\circ}\text{C}$.

Szczegółowa analiza synoptyczna sytuacji z dużymi wartościami $t_{\text{K-S}}$ pozwoliła stwierdzić, że MWC o największej intensywności wystąpiła w Kielcach w trakcie pogodnej, bezwietrznej oraz mroźnej nocy z 29 na 30 stycznia 2011 roku (rys. 3A). Podczas gdy w centrum Kielc temperatura powietrza spadła do $-10,1^{\circ}\text{C}$, w podkieleckim Sukowie zanotowano tej nocy $-16,9^{\circ}\text{C}$. O godzi-

nie 6:00 CET różnica pomiędzy temperaturą powietrza w centrum Kielc i w Sukowie wyniosła aż $8,3^{\circ}\text{C}$. W późniejszych godzinach tego dnia obserwowano wzrost zachmurzenia najpierw chmurami piętra wysokiego, później również chmurami piętra średniego i niskiego, będący efektem zbliżania się frontu atmosferycznego.

Z kolei największą intensywność JC w Kielcach stwierdzono w dniu 25 września 2016 roku o godzinie 9:00 CET, a więc około 2,5 godziny po wschodzie słońca. Różnica temperatury powietrza między centrum Kielc a podkieleckim Sukowem wyniosła $-4,2^{\circ}\text{C}$ (rys. 3B). W tym dniu Polska znajdowała się pod wpływem klina wysokiego ciśnienia, z napływającą nad południową Polskę masą powietrza polarnego kontynentalnego. W godzinach przedpołudniowych w tym dniu niebo w Kielcach zasnuwały przede wszystkim chmury piętra wysokiego. Prędkość wiatru była niska. Stwierdzony zakres zmienności $t_{\text{K-S}}$, wynikający ze specyfiki klimatu miejskiego, wynosi więc $12,5^{\circ}\text{C}$.

Średnia arytmetyczna wartość różnicy temperatury powietrza $t_{\text{K-S}}$ jest dodatnia we wszystkich miesiącach (tab. 1). Zmienia się jednak w przebiegu rocznym. Najwyższe średnie wartości występują w sierpniu ($0,7^{\circ}\text{C}$), najniższe zaś w miesiącach od listopada do lutego ($0,3^{\circ}\text{C}$). Różnice pomiędzy średnimi wartościami $t_{\text{K-S}}$ w poszczególnych miesiącach są, zgodnie z testem Kruskala-Wallisa, istotnie statystycznie na poziomie $\leq 0,05$. Kwartył dolny $t_{\text{K-S}}$ był we wszystkich miesiącach ujemny, ale zmieniał się nieregular-



Rys. 3. Temperatura powietrza w centrum Kielc i poza miastem w dniu:
 A – z największą intensywnością miejskiej wyspy ciepła
 B – z największą intensywnością „jeziora chłodu”

Air temperature in Kielce city centre and rural area during the day with:
 A – the most intense UHI
 B – the most intense “cold island”

Tabela 1

Średnia roczna i średnie miesięczne różnice temperatury powietrza w centrum Kielc i poza miastem (°C)
 dla całości danych i dla sytuacji z zachmurzeniem ogólnym nieba $N \leq 4/8$

Mean monthly air temperature differences between the centre and outskirts of Kielce city [°C]
 for the whole dataset and for cases with total cloudiness $N \leq 4/8$

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	rok
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
całość danych/ whole dataset	0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,7	0,4	0,4	0,3	0,2	0,5
sytuacje z $N \leq 4/8$ / cases with $N \leq 4/8$	1,2	1,2	1,1	1,3	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0	0,9	1,0	0,9	1,2

Objaśnienia: pogrubiono najwyższe wartości
 Explanations: highest values are bolded

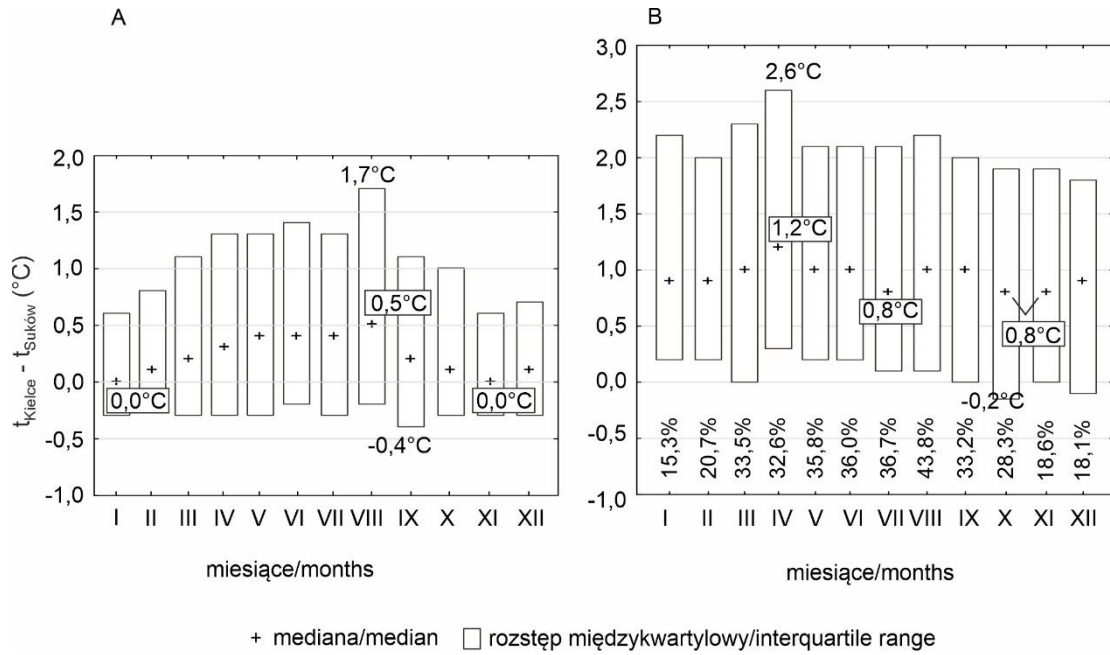
nie. Kwartył górny t_{K-S} wyraźnie zmieniał się sezonowo, od $0,6^\circ\text{C}$ w listopadzie i styczniu do $1,7^\circ\text{C}$ w sierpniu (rys. 4A).

W przebiegu dobowym MWC jest najlepiej rozwinięta w Kielcach w godzinach nocnych. Z kolei JC rozwija się około 2 godziny po wschodzie słońca i utrzymuje się przez 3–4 godziny (rys. 5). Ten cykl dobowej zmienności różnicy temperatury powietrza t_{K-S} jest najlepiej wykształcony w miesiącach wiosennych i letnich.

Wartości $t_{K-S} > 1,0^\circ\text{C}$ występują w Kielcach w okresie marzec–wrzesień w godzinach wieczornych i nocnych. Największą średnią godzinową intensywność t_{K-S} ($1,7^\circ\text{C}$) wykryto w sierpniu w godzinach 22:00 i 23:00 CET. W listopadzie, grudniu i styczniu średnia intensywność MWC w go-

dzinach nocnych zwykle nie przekracza $0,6^\circ\text{C}$. Największe średnie natężenie JC ($t_{K-S} = -1,2^\circ\text{C}$) stwierdzono w sierpniu o godzinie 7:00 CET. W miesiącach jesiennych i zimowych JC przeważa w Kielcach również w godzinach okołopołudniowych, a w listopadzie i grudniu niemal przez całą dzienną część doby (rys. 5). W miesiącach letnich od godzin przedpołudniowych do godzin wieczornych występuje zwykle MWC, ale o niewielkiej intensywności, rzadko przekraczającej $0,5^\circ\text{C}$.

Zarówno średnia intensywność MWC, jak i sezonowa zmienność tej intensywności wynika w dużym stopniu z sezonowych zmian zachmurzenia nieba. Przy zachmurzeniu ogólnym nieba $\leq 2/8$ temperatura powietrza w centrum Kielc była



Rys. 4. Sezonowa zmienność różnic temperatury powietrza pomiędzy centrum Kielc i terenem podmiejskim (t_{K-S})

A – dla całego zbioru danych

B – dla sytuacji z zachmurzeniem ogólnym nieba $\leq 4/8$

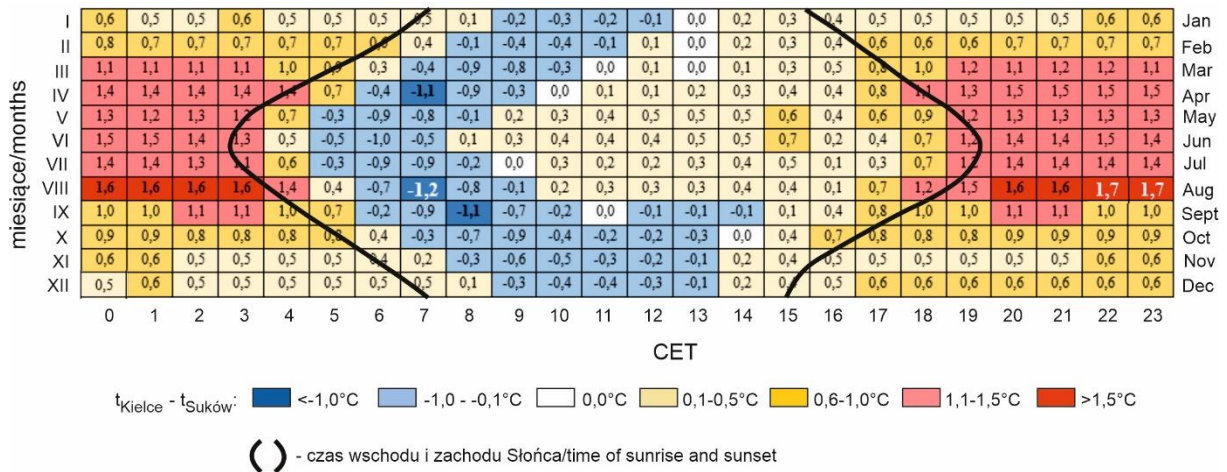
Podano też procentowy udział tych sytuacji w poszczególnych miesiącach

Seasonal variability of air temperature differences between centre and outskirts of Kielce city (t_{K-S}):

A – for the whole dataset

B – for the cases with total cloudiness $\leq 4/8$

Monthly frequency of such conditions given at bottom of diagram



Rys. 5. Sezonowy i dobowy przebieg średnich różnic temperatury powietrza pomiędzy centrum Kielc i terenem podmiejskim w okresie 1.01.2010–23.05.2018

Seasonal and diurnal variability of air temperature differences between centre and outskirts of Kielce city, 1st January, 2010 to 23rd May, 2018

średnio $1,2^{\circ}C$ wyższa niż temperatura poza miastem, a MWC występowało w 77,5% przypadków. Jak już wspomniano powyżej, dla całości analizowanych danych niezależnie od zachmurzenia średnia wartość t_{K-S} wynosi $0,5^{\circ}C$, a występowanie MWC stwierdzono w 56% przypadków.

Sytuacje z zachmurzeniem $\leq 2/8$ występowały jednak w ciągu roku tylko w 22,4% wszystkich rozpatrywanych sytuacji. Szczegółowe analizy przeprowadzono więc dla nieco częstszych sytuacji z zachmurzeniem ogólnym nieba $\leq 4/8$. Stanowiły one około 29,2% analizowanych przy-

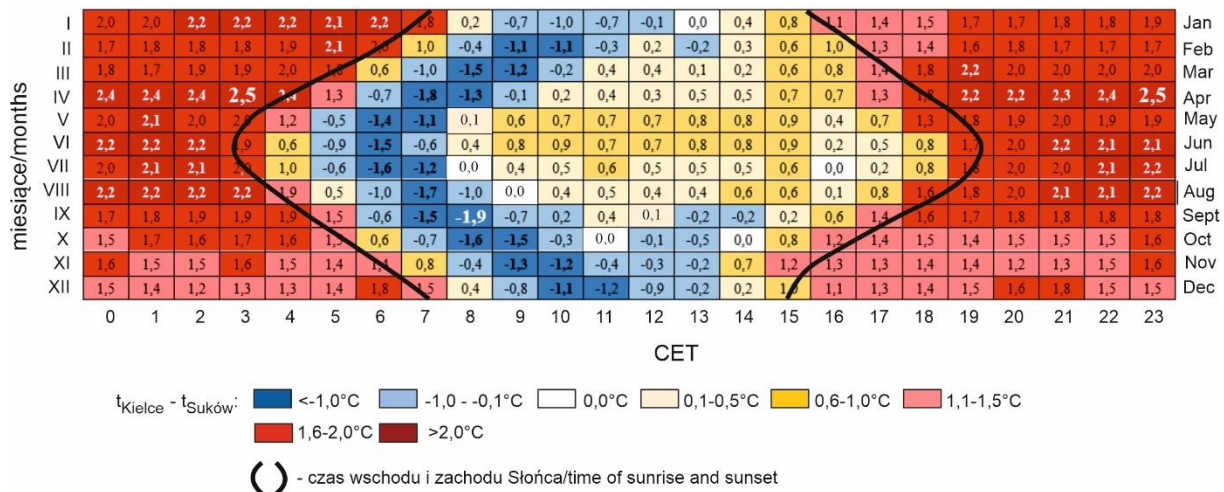
padków. Zarówno średnia t_{K-S} ($1,1^{\circ}\text{C}$), jak i częstość występowania MWC w Kielcach (76%) była podobna jak przy zachmurzeniu $\leq 2/8$.

Średnia arytmetyczna t_{K-S} , jak również mediana, kwartył dolny i górny tej różnicy były przy zachmurzeniu $\leq 4/8$ wyższe niż dla całości danych (tab. 1; rys. 4B). Ponadto słabiej niż dla całości danych zaznaczała się sezonowa zmienność tych wskaźników. W sytuacjach z zachmurzeniem $\leq 4/8$ jeszcze wyraźniej zaznaczała się dobowa zmienność różnicy temperatury powietrza pomiędzy centrum Kielc a peryferiami miasta (rys. 6). „Jezioro chłodu” najczęściej rozwija się w tych samych godzinach, co w przypadku całości danych, ale z większą intensywnością, największą ($< -1,0^{\circ}\text{C}$) około 3–4 godzin po wschodzie słońca. Najintensywniejsze JC (średnio $-1,9^{\circ}\text{C}$) stwierdzono we wrześniu o godzinie 8:00 CET. W godzinach nocnych średnia intensywność MWC zwykle przekraczała $1,5^{\circ}\text{C}$. Wyjątkiem były miesiące od października do grudnia. W kwietniu w godzinach 23:00 i 3:00 CET średnia intensywność MWC była największa ($2,5^{\circ}\text{C}$). W dniach z zachmurzeniem ogólnym nieba $\leq 4/8$ stwierdzono też wyraźniejszy niż dla wszystkich danych wzrost intensywności MWC w godzinach okołopołudniowych (9:00–15:00 CET), widoczny zwłaszcza w maju i w czerwcu.

Należy oczywiście pamiętać, że sytuacje z tak małym zachmurzeniem w miesiącach od listopada do stycznia stanowiły $>20\%$ badanych przypadków, podczas gdy w sierpniu obejmowały one ponad 40% przypadków (rys. 4B). W miesiącach chłodnej części roku dominują sytuacje z zachmurzeniem $\geq 7/8$, w których różnice pomiędzy temperaturą powietrza w centrum miasta i poza nim są minimalne (średnia arytmetyczna $-0,2^{\circ}\text{C}$, mediana $-0,0^{\circ}\text{C}$).

W warunkach bezchmurnych t_{K-S} wynosi średnio $1,7^{\circ}\text{C}$. Bezchmurne niebo jest niezbędnym warunkiem, żeby wykorzystać zobrażenia satelitarne do sporządzenia mapy temperatury radiacyjnej podłoża (LST). W pracy wykorzystano cztery zobrażenia satelity LANDSAT 8 z miesięcy letnich. W związku z czasem przelotu tego satelity nad obszarem Polski wygenerowane mapy LST informują nas o wielkości i intensywności MWC w porze przedpołudniowej.

Przyjęto, że obszar kieleckiej powierzchni wyspy ciepła (PWC) pokrywa się z wartościami LST większymi niż LST piksela, w obrębie którego leży stacja meteorologiczna IMGW-PIB Kielce-Suków ($\Delta\text{LST} > 0,0^{\circ}\text{C}$). Na poszczególnych zobrażeniach satelitarnych powierzchnia tych obszarów różni się (rys. 7).

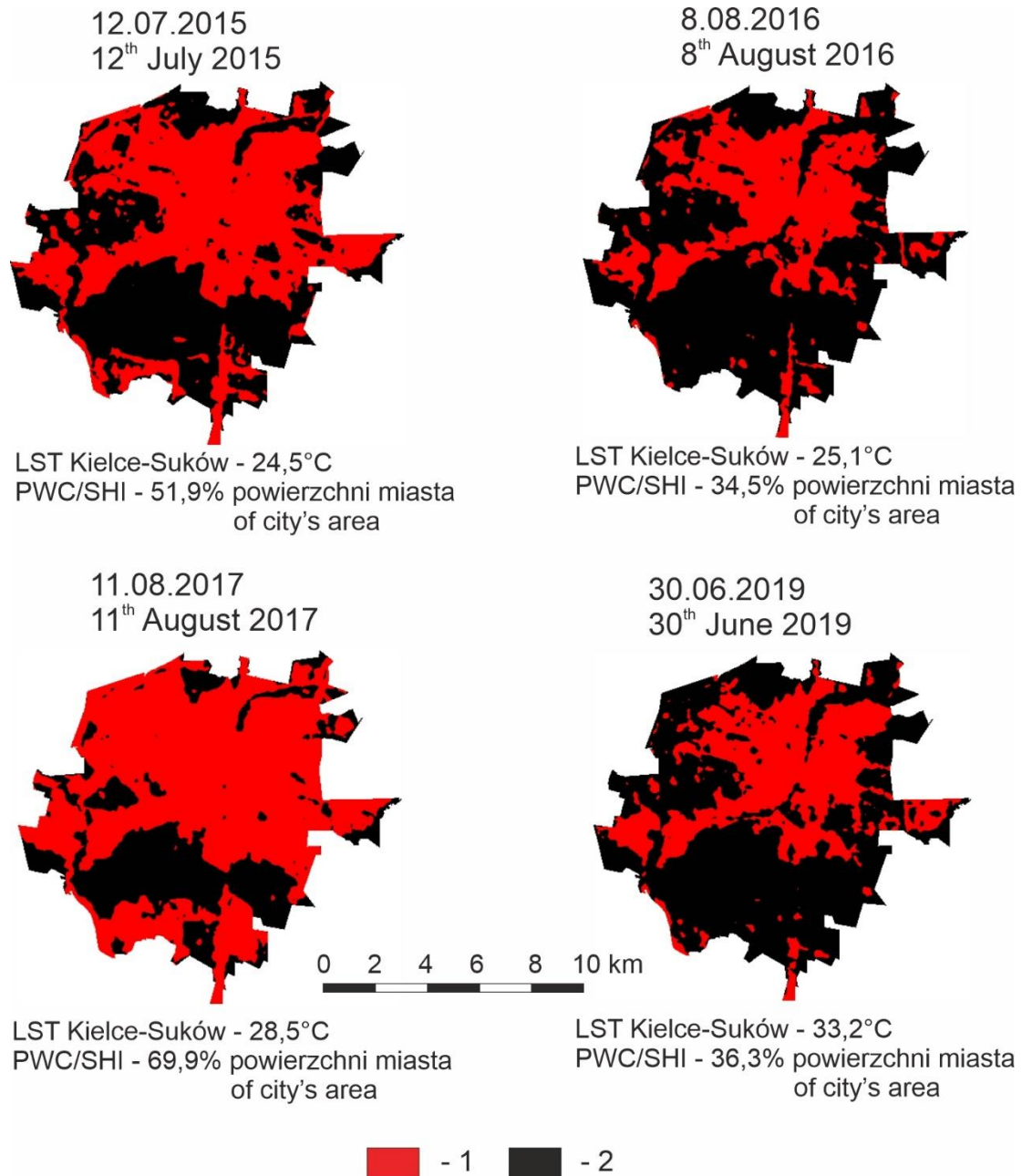


Rys. 6. Sezonowy i dobowy przebieg t_{K-S} w okresie 1.01.2010–23.05.2018 w sytuacjach z zachmurzeniem ogólnym nieba $\leq 4/8$

Seasonal and diurnal variability of t_{K-S} , 1st January, 2010 to 23rd May, 2018, and in cases with total cloudiness $\leq 4/8$

W przypadku dwóch zobrażeń (z dnia 8.07.2015 i 30.06.2019) powierzchniowa wyspa ciepła w Kielcach obejmowała około 1/3 ich powierzchni. W pozostałych przypadkach powierzchniowa wyspa ciepła była większa, w dniu

12.07.2015 zajmowała około połowy powierzchni Kielc, zaś w dniu 11.08.2016 aż 70% powierzchni miasta. Na wszystkich zobrażeniach widać ochładzające oddziaływanie doliny Silnicy, zwłaszcza w jej górnym odcinku przecinającym pół-



Rys. 7. Udział (%) powierzchniowej wyspy ciepła (PWC) w powierzchni Kielce obliczony na podstawie różnicy LST w granicach administracyjnych miasta i na stacji meteorologicznej Kielce-Suków
1 – obszar występowania PWC, 2 – pozostały obszar Kielce

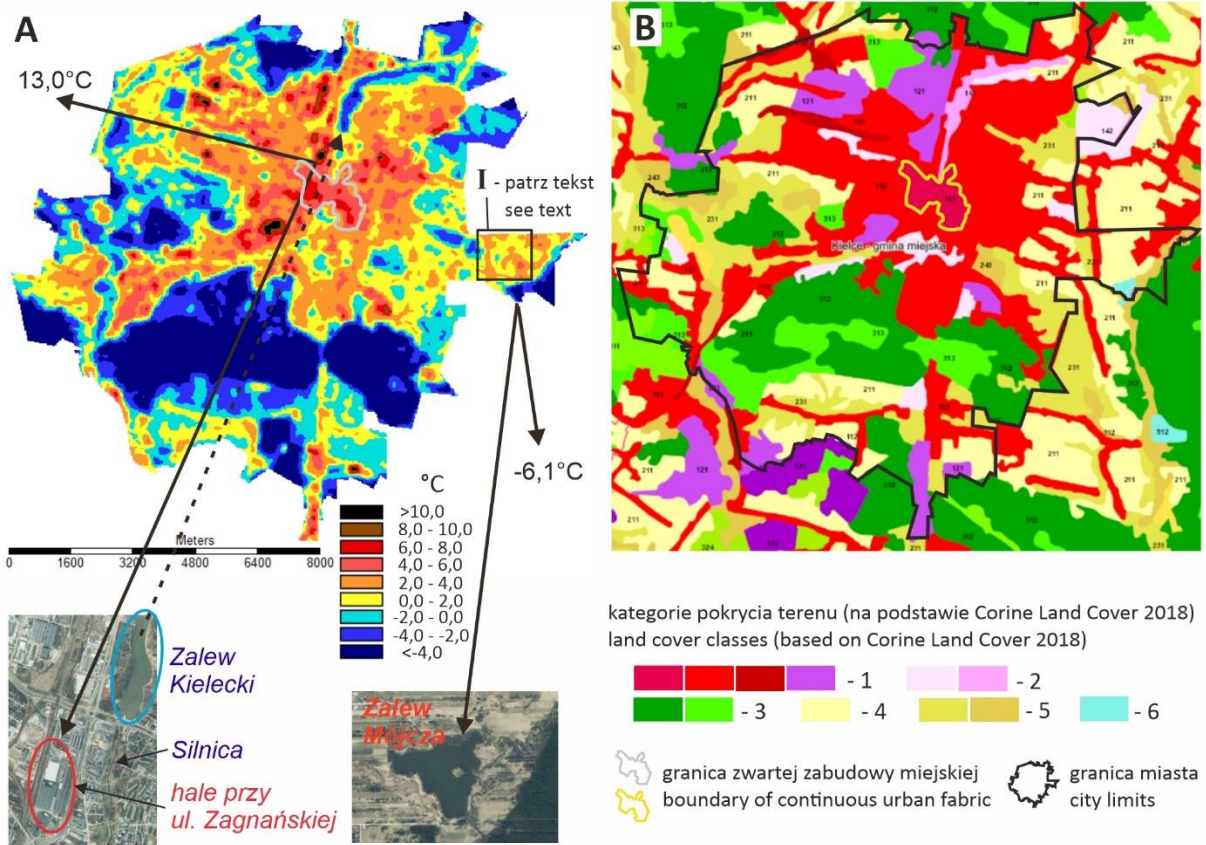
Percentage of surface heat island (SHI) within Kielce city estimated using LST differences between pixels within city limits and at the Kielce-Suków weather station
1 – SHI area, 2 – area of Kielce outside of SHI

nocną część miasta. Wyraźnie chłodniejsze są też zalesione stoki pasm górskich na południu i zachodzie Kielce (rys. 8).

Największą intensywność (13,0°C) tak zdefiniowanej PWC stwierdzono 12.07.2015. Dotyczyła ona obszaru w centrum miasta przy ul. Zagnańskiej, blisko kieleckich dworców. Płaskie dachy zlokalizowanych tam magazynów i zakładów

przemysłowych silnie nagrzewają się w ciągu dnia (rys. 8A).

Ogólnie widać dobrą zgodność obszaru występowania PWC z zasięgiem obszarów zabudowanych. W analizowanym dniu największą intensywność PWC (>8,0°C) stwierdzono w obrębie terenów przemysłowych i handlowych (kolor lila róż na rys. 8B). Są to między innymi: hale wysta-



Rys. 8. Natężenie powierzchniowej wyspy ciepła (PWC) w Kielcach 12.07.2015 roku (10:26 CET)

A – wraz z ortofotomapami miejsc z najniższym i najwyższym ΔLST (Geoportal 2024)

B – na tle mapy pokrycia terenu według Corine Land Cover 2018

Kategorie pokrycia terenu (zgeneralizowane): 1 – obszary z dużym udziałem podłoża sztucznego, 2 – tereny rekreacyjne i zieleni miejskiej, 3 – lasy, 4 – grunty orne, 5 – inne tereny rolnicze (seminaturalne), 6 – zbiorniki wodne

Intensity of Surface Heat Island (SHI) in the city of Kielce on 12th July 2015 (10:26 CET)

A – orthophotos of locations with highest and lowest ΔLST (Geoportal 2024)

B – land cover map according to Corine Land Cover 2018

Land cover classes (generalised): 1 – artificial surfaces, 2 – leisure facilities and green urban areas, 3 – forests, 4 – arable land, 5 – other agricultural areas (seminatural), 6 – water bodies

wiennicze Targów Kielce, galeria handlowa „Echo” oraz hale produkcyjne zakładów Chemar S.A. Intensywność PWC w granicach zwartej zabudowy centrum Kielc była nieco niższa ($4,0\text{--}8,0^{\circ}\text{C}$). Występowanie PWC stwierdzono też wzdłuż dróg i w obrębie wielu gruntów ornych, na przykład na wschodnich krańcach miasta (obszar I na rys. 8A). Inne obszary rolnicze – łąki i obszary z dużym udziałem roślinności naturalnej – miały z reguły LST niższą niż w okolicy stacji meteorologicznej Kielce-Suków. Chłodniejsze były też obszary rekreacyjne i zielone Kielc. Dotyczy to zwłaszcza doliny Silnicy, która w górnym odcinku miała LST niższą niż w sąsiedztwie stacji meteorologicznej Kielce-Suków o $>4,0^{\circ}\text{C}$. Ochładzający wpływ doliny Silnicy zanika w centrum miasta – pomiędzy Al. IX Wieków Kielc i parkiem miejskim im. Stanisława Staszica. Rzeka płynie

tam w wybetonowanym korycie, w wąskiej około 25-metrowej przerwie między kilkupiętrowymi budynkami. Najchłodniejsze w porównaniu z podmiejskim punktem odniesienia były lasy i zbiorniki wodne (o $4,0^{\circ}\text{C}$ i mniej). Najniższą LST w porównaniu z okolicą stacji meteorologicznej Kielce-Suków ($-6,1^{\circ}\text{C}$) miała powierzchnia wody Zbiornika Mójcza na wschodnich peryferiach miasta (rys. 8A).

Dyskusja i wnioski

Średnia różnica temperatury powietrza pomiędzy centrum Kielc i obszarem pozamiejskim wynosi $0,5^{\circ}\text{C}$. Podobną wartość średniego natężenia miejskiej wyspy ciepła ($0,5^{\circ}\text{C}$) zauważono w znacznie mniejszym Stargardzie Szczecińskim (Szyłobryt i in. 2013). W innych polskich miastach, o znac-

nie większej liczbie ludności niż Kielce, średnie natężenie MWC jest wyraźnie większe. We Wrocławiu w obrębie wielokondygnacyjnej, luźnej zabudowy osiedlowej wynosi ono $0,7^{\circ}\text{C}$. W ścisłym centrum Wrocławia jest większe – $1,0^{\circ}\text{C}$ (Szymanowski 2004). Badania Wawer (1997) pokazały zaś, że centrum Warszawy jest cieplejsze od Okęcia (warunki podmiejskie) średnio o $2,0^{\circ}\text{C}$.

Średnia różnica temperatury powietrza pomiędzy centrum Kielc i ich peryferiami byłaby większa, gdyby punkt pomiarowy WIOŚ położony był w obrębie zwartej zabudowy ścisłego centrum Kielc lub na placu dworcowym. Sugerują to wyniki wcześniejszych pomiarów topoklimatycznych (Żarnowiecki 2002; Jarzyna, Żarnowiecki 2016).

Najwyższa stwierdzona w Kielcach intensywność MWC ($8,3^{\circ}\text{C}$) jest niewiele niższa niż w największych polskich miastach. We Wrocławiu maksymalne natężenie MWC wyniosło $9,0^{\circ}\text{C}$ (Szymanowski 2004), a w Warszawie osiągnęło $10,8^{\circ}\text{C}$ (Wawer 1997). Najwyższe maksymalne natężenie MWC ($12,0^{\circ}\text{C}$) stwierdzono w Łodzi w trakcie pomiarów patrolowych w lutym 1996 roku (Kłysik 1998). Zarówno w Kielcach, jak i w Warszawie i Łodzi najwyższe natężenie MWC stwierdzono w trakcie bardzo mroźnych, pogodnych nocy (Wawer 1997; Kłysik 1998).

Mimo tego, że sytuacje z największą intensywnością MWC występują zimą, to właśnie w tej porze roku średnia intensywność MWC jest w Kielcach najniższa. Prawdopodobnie tę opisywali też autorzy innych prac (Kłysik, Fortuniak 1998; Błażejczyk i in. 2014). Wydaje się, że wynika to z częstszego występowania zimą warunków cyrkulacyjnych sprzyjających wzrostowi zachmurzenia ogólnego nieba i prędkości wiatru. Potwierdzają to niewielkie sezonowe różnice w wykształceniu MWC w Kielcach w sytuacjach z zachmurzeniem $\leq 4/8$. Zgadza się to też ze stwierdzeniem Kłysika i Fortuniaka (1998), których zdaniem czynniki makrocyrkulacyjne są najważniejszą przyczyną rocznej cykliczności natężenia MWC. Najlepsze warunki do rozwoju MWC występują w Kielcach, podobnie jak i w Łodzi (Krawczyk i in. 2022) w miesiącach letnich.

W godzinach porannych i przedpołudniowych w Kielcach, podobnie jak i w innych miastach (Steinacke 1999; Szymanowski 2004; Krawczyk i in. 2022), rozwija się „jezioro chłodu”, choć – jak pisał Szymanowski (2004) – zjawisko to może występować w dowolnej porze doby. W Kielcach zjawisko to jest częstsze (38% obserwacji) niż na przykład we Wrocławiu (12%), co może wynikać z silnego przesłonięcia horyzontu w są-

siedztwie stacji pomiarowej przy ul. Jagiellońskiej. W polskich miastach znaczenie JC jest mniejsze niż w miastach, których centra zdominowane są przez wysokościowce, takich jak Hongkong (Yang i in. 2016). W takich warunkach w nocy przeważa MWC, a w dzień dominują „jeziora chłodu”.

Analiza PWC wskazała obszary przemysłowe, magazynowe oraz handlowo-wystawiennicze jako najcieplejsze w Kielcach w warunkach letniego przedpołudnia. Również w Poznaniu LST w obszarze Międzynarodowych Targów Poznańskich i centrów handlowych była najwyższa wzdłuż profili przecinających miasto (Majkowska i in. 2017). Wysoką intensywność MWC na terenach przemysłowych stwierdzono również w trakcie pomiarów naziemnych, na przykład na Żeraniu w Warszawie (Kuchcik, Milewski 2016).

W pracy wykazano też, że dolina nawet niewielkiej rzeki (Silnica) i istniejący na tej rzece zbiornik wodny ograniczają natężenie MWC. Podobny, silniej wyrażony efekt stwierdzono między innymi w dolinie Wisły, która stanowi swojego rodzaju „cold spot” wzdłuż całego przebiegu w granicach administracyjnych Warszawy (Kuchcik, Czarnecka 2023).

Uzyskane wyniki potwierdzają więc znane z literatury przedmiotu prawidłowości opisujące dobową i sezonową zmienność atmosferycznej miejskiej wyspy ciepła oraz jej pogodowe uwarunkowania i przestrzenne związki między LST a kategoriami pokrycia/użytkowania terenu. Wyniki te stanowią cenne uzupełnienie wiedzy o klimacie lokalnym Kielc, informując między innymi o obszarach potencjalnego występowania stresu ciepła.

Literatura

- Avdan U., Jovanovska G. 2016. Algorithm for automated mapping of Land Surface Temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors* 1480307.
- Błażejczyk K., Kuchcik M., Milewski P., Dudek W., Kręcis B., Błażejczyk A., Szmyd J., Degórska B., Pałczyński C. 2014. Miejska wyspa ciepła w Warszawie, uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne. IGiPZ PAN, Wyd. Akademickie „Sedno”, Warszawa.
- Bokwa A. 2009. Miejska wyspa ciepła na tle naturalnego zróżnicowania termicznego obszaru położonego we wklęsłej formie terenu (na przykładzie Krakowa). *Prace Geograficzne* 122: 111-132.

- Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development* 8: 1991-2007.
DOI 10.5194/gmd-8-1991-2015
- Dudek S., Kuśmierk-Tomaszewska R., Żarski J. 2010. Charakterystyka miejskiej wyspy ciepła na przykładzie Bydgoszczy. *Ekologia i Technika* 18(4): 180-185.
- Earth Explorer (US Geological Service). 2023. Online: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (data ostatniego dostępu: 28.12.2023)
- Filipiuk E., Kaszewski B.M., Zub T. 1998. Porównanie warunków termicznych w śródmieściu Lublina z obszarami pozamiejskimi. *Acta Universitatis Lodzianis – Folia Geographica Physica*. 3: 71-82.
- Geoportal (Główny Urząd Geodezji i Kartografii). 2024. Online: <https://mapy.geoportal.gov.pl/> (data ostatniego dostępu: 4.01.2024)
- Google Earth. 2023. Online: <https://earth.google.com/> (data ostatniego dostępu: 10.12.2023)
- IMGW-PIB (Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy). 2023. Online: https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/ oraz <https://danepubliczne.imgw.pl/pl/datastore/> (data ostatniego dostępu: 18.12.2023)
- Jarzyna K., Żarnowiecki G. 2016. Warunki klimatyczne i bioklimatyczne terenów rekreacyjnych Kielc na tle klimatu centrum miasta w trakcie epizodów pogody gorącej. *Acta Geographica Lodzianis* 104: 181-192.
- Kłysik K. 1998. Struktura przestrzenna miejskiej wyspy ciepła w Łodzi. *Acta Universitatis Lodzianis – Folia Geographica Physica* 3: 385-391.
- Kłysik K., Fortuniak K. 1998. Dobowy i roczny cykl występowania miejskiej wyspy ciepła w Łodzi. *Acta Universitatis Lodzianis – Folia Geographica Physica* 3: 23-32.
- Krawczyk E., Fortuniak K., Wilk S. 2022. Miejska wyspa ciepła w Łodzi w latach 2015–2018 na tle wcześniejszych badań. *Przegląd Geofizyczny* 1–2: 3-18.
DOI: 10.32045/PG-2022-028
- Kuchcik M., Milewski P. 2016. Miejska wyspa ciepła w Warszawie – próba oceny z wykorzystaniem Local Climate Zones. *Acta Geographica Lodzianis* 104: 21-33.
- Kuchcik M., Czarnecka K. 2023. Ogólna charakterystyka termiczna doliny Wisły w obszarze Warszawy. *Przegląd Geograficzny* 95(3): 313-334.
- Majkowska A., Kolendowicz L., Półrolniczak M., Hauke J., Czernecki B. 2017. The urban heat island in the city of Poznań as derived from Landsat 5 TM. *Theoretical and Applied Climatology*. 128: 769-783.
DOI 10.1007/s00704-016-1737-6
- Niedźwiedz T. 2017. Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej – zbiór komputerowy. Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii, Sosnowiec.
- Oke T.R. 1973. City size and the Urban Heat Island. *Atmospheric Environment* 7(8): 769-779.
DOI 10.1016/0004-6981(73)90140-6
- Olszewski J.L., Żarnowiecki G., Predygiel K., Szałach G. 2003. Wstępne wyniki badań bioklimatu terenów rekreacyjnych Kielc w sezonie wiosennym. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 188: 303-315.
- Półrolniczak M., Kolendowicz L., Majkowska-Juskowiak A. 2019. Stan badań klimatu Poznania ze szczególnym uwzględnieniem pola temperatury i zjawiska miejskiej wyspy ciepła. *Acta Geographica Lodzianis* 108: 79-92.
DOI 10.26485/AGL/2019/108/6
- Przybylak R., Uscka-Kowalkowska J., Araźny A., Kejna M., Kunz M., Maszewski R. 2017. Spatial distribution of air temperature in Toruń (Central Poland) and its causes. *Theoretical and Applied Climatology*. 127: 441-463.
DOI 10.1007/s00704-015-1644-2
- Renc A., Łupikasz E., Błaszczuk M. 2022. Spatial structure of the surface heat and cold islands in summer based on Landsat 8 imagery in southern Poland. *Ecological Indicators* 142(12): 109181.
DOI 10.1016/j.ecolind.2022.109181
- Steinacke K. 1999. Urban climatological studies in the Reykjavik subarctic environment, Iceland. *Atmospheric Environment* 33(24–25): 4157-4162.
DOI 10.1016/S1352-2310(99)00158-2
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Grabowska K. 2011. Cykliczne zmiany miejskiej wyspy ciepła w Warszawie i ich przyczyny. *Prace i Studia Geograficzne* 47: 409-416.
- Szyłobryt K., Bednorz E., Kolendowicz L. 2013. Występowanie miejskiej wyspy ciepła w mieście średniej wielkości na przykładzie Stargardu Szczecińskiego. *Badania Fizjograficzne, Seria A – Geografia Fizyczna* 64: 247-268.

- Szymanowski M. 2004. Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu. *Studia Geograficzne* 77. Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- Wawer J. 1997. Miejska wyspa ciepła w Warszawie. *Prace i Studia Geograficzne* 20: 145-197.
- Yang X., Li Y., Luo Z., Chan P.W. 2016. The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. *International Journal of Climatology* 37(2): 890-904.
- Żarnowiecki G. 2002. Zróżnicowanie bioklimatu Kielc w sezonie letnim. *Regionalny Monitoring Środowiska Przyrodniczego* 3: 109-116.
- Żarnowiecki G. 2003. Sultry weather characteristics in Kielce. Fifth International Conference on Urban Climate. 1–5 September 2003, Łódź, Poland, Book of Abstracts 2: 219-222.

Summary

The intensity of the atmospheric Urban Heat Island (UHI) in the city of Kielce (central-southern Poland) was studied for the period January 2010–May 2018, in particular its diurnal and annual variability. The Urban Heat Island was defined as a positive difference in hourly air temperature between the city's centre (weather station on Jagiellońska Street, Kielce) and its outskirts (Kielce-Suków weather station). The dependence of UHI intensity on total cloudiness was also studied. Furthermore, four LANDSAT 8 images were used to calculate Land Surface Temperature (LST). Surface Heat Island (SHI) was defined as a positive difference in LST between the city proper and the Kielce-Suków weather station. The average annual intensity of the heat island in Kielce is 0.5°C, while its maximum intensity in the studied period was 8.3°C. Such a big difference in air temperature between the city centre and outskirts occurred during the frosty, clear and calm night of 29/30th January 2011. However, the highest average intensity of the urban heat island is recorded at night during the summer (up to 1.7°C in August at 10 p.m. and 11 p.m. CET). During the daytime, the urban heat island is much weaker in Kielce. Generally, a Urban Heat Island was found in Kielce during 56.5% of all observations. The in-

verse feature known as the “cold island”, when air temperatures on the outskirts are higher than in the centre, occurs in 38.5% of observations throughout the whole year in Kielce. The “cold island” usually occurred in Kielce ~2 hours after sunrise and persisted for ~4 hours, except in October, November and December, when this feature prevailed throughout the daytime (5–6 hours). The intensity of the UHI depends on, among other things, total cloudiness. It increases for cases with total cloudiness $\leq 4/8$. Lesser seasonal variability in UHI intensity was also observed for cases with low and medium cloudiness. Surface Heat Island, derived from LANDSAT 8 imagery, covered 34–70% of the area of the city of Kielce (within city limits) in the summer morning. The highest land surface temperature (LST) was found in industrial, commercial and storage areas, where flat roofs of large low-rise buildings are strongly heated by solar radiation during the daytime. Their LST was up to 13.0°C higher than LST in the vicinity of the Kielce-Suków weather station (suburban area). The lowest LST (<-4,0°C lower than in suburban areas) was found for forests and water bodies. Green areas adjacent to Silnica River and Kielecki Reservoir were very effective in reducing LST (and thus heat stress) within Kielce city limits.