



Ogólna charakterystyka termiczna doliny Wisły w obszarze Warszawy

A general thermal characterisation of the Vistula Valley in Warsaw

Magdalena Kuchcik  Kaja Czarnecka 

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN

ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa

mkuchcik@twarda.pan.pl (autor korespondencyjny) • czarnecka@twarda.pan.pl

Zarys treści. Rzeki przepływające przez miasta i ich doliny pełnią wiele funkcji przyrodniczych, w tym szczególną rolę w melioracji klimatu miasta. Dolina Wisły w Warszawie jest głównym i najbardziej efektywnym obszarem przewietrzania i regeneracji powietrza w mieście, pomimo tego niewiele wiadomo o warunkach termicznych w niej panujących. W celu ich poznania od 2016 r. rozpoczęto ich monitoring w 3 punktach: na południu i w części śródmiejskiej na lewym brzegu oraz na północy na prawym brzegu rzeki. W artykule przeanalizowano 10-minutowe dane z 6 lat (2017-2022) z punktów w dolinie, które porównano z warunkami na stacji w ścisłym centrum miasta i na jego obrzeżach. Przedstawiono wstępną charakterystykę termiczną doliny: wartości średnie, dni termicznie charakterystyczne, częstość różnic temperatury minimalnej oraz wartości 10-minutowych między centrum miasta (Hoża) a pozostałymi stacjami w przedziałach wartości, przykładowe przebiegi temperatury latem i zimą. Omówiono zjawisko „cold spotów”, którego częstość w najbliższym sąsiedztwie Wisły miejscami przewyższała 88% analizowanych obrazów termalnych. Wykazano różnice reżimu termicznego w dolinie, zależne od lokalizacji i najbliższego sąsiedztwa punktu. Wraz z rosnącą gęstością zabudowy i spadkiem udziału terenów biologicznie czynnych maleje średnia amplituda dobową temperatury powietrza. Północna i południowa część doliny na odcinku warszawskim cechują się podobnymi warunkami termicznymi, zaś część śródmiejska wyraźnie od nich odbiega. Jest znacznie cieplejsza, ale równocześnie notuje się tu znacznie częściej zjawisko „cold spotu”.

Słowa kluczowe: rzeka Wisła, monitoring temperatury, reżim termiczny, kontrasty termiczne, „cold spot”.

Keywords: Vistula river, thermal monitoring, thermal regime, thermal contrasts, „cold spot”.

Wstęp

Rzeki od lat stanowią element miastotwórczy. Miasta zakładano w dolinach rzek, u ich ujścia, w zakolach, na wyspach czy na skarpach nadrzecznych, jak w przypadku Warszawy itd. Rola rzek widoczna była w całej historii miast: od wyboru lokalizacji, przez rozwój przestrzenno-funkcjonalny, gospodarczo-polityczny, a nawet kulturalny (Pancewicz, 2003). Z czasem funkcja gospodarcza rzek uległa zmniejszeniu, a zaczęto dostrzegać funkcje przyrodnicze dolin rzecznych: klimatyczne i ekologiczne, ale także społeczne, gdyż rzeka jest ważnym elementem identyfikacji przestrzennej dla mieszkańców miasta.

Przez stulecia doliny rzeczne na terenie miast były silnie przekształcane, początkowo na potrzeby żeglugi i kanalizacji, od XIX w. – na potrzeby rozwijającego się przemysłu,

a w XX w. – w wyniku intensyfikacji procesów urbanizacyjnych. W efekcie mieszkańcy miast odwrócili się od zanieczyszczonych i zaśmieconych rzek, a funkcja przyrodnicza i rekreacyjna dolin prawie zanikła. Doliny rzeczne pomimo różnej i długotrwałej działalności człowieka, która je przekształciła, nadal stanowią cenny element systemu przyrodniczego (Nowacka-Rejzner, 2009). W Polsce pod koniec XX w. zaczęto podejmować działania renaturalizacji dolin, wykorzystywania ich potencjału rekreacyjnego, społecznego oraz przyrodniczego i rozpoczęto proces przywracania rzek miastu i jego mieszkańcom.

Wisła w granicach Warszawy płynie na dystansie 31,5 km, a jej dolina osiąga szerokość od 2 km na południu, gdzie meandruje i usypuje łachy piaszczyste, po 450 m na wysokości Skarpy Warszawskiej. Prawie na całym odcinku warszawskim jest uregulowana i obudowana wałami przeciwpowodziowymi. Jej lewy brzeg, zwłaszcza w dzielnicach Śródmieście i Żoliborz, jest wysoki, w części zabudowany bulwarami, prawy zaś niski, o charakterze naturalnym. Większość doliny Wisły w granicach Warszawy objęta jest formą ochrony Natura 2000 Dolina Środkowej Wisły (chroniona jest zarówno sama dolina, jak i ptactwo oraz łągi). Międzywale Wisły jest najważniejszą ostoją fauny w Warszawie, będąc siedliskiem wodno-łądowym oraz szlakiem migracyjnym dla setek gatunków, w tym chronionych ptaków i ssaków. Rosną tu wikliny nadrzeczne, zarośla i lasy łąkowe topolowo-wierzbowe oraz wiązowo-jesionowe. Roślinność ta jest jednak pod silną antropopresją w związku z rozwojem form wypoczynku nad Wisłą oraz usuwaniem drzew utrudniających swobodny przepływ wody przy wysokich stanach i fali powodziowej (SUiKZP, 2006, schematy 29, 35, 37, 38, 45).

Podłużne, niezabudowane lub w niewielkim stopniu zabudowane części dolin przecinające miasta stają się korytarzami wymiany powietrza (wcześniej zwanymi klinami nawietrzającymi) lub – jak ostatnio określa się je częściej – obszarami przewietrzania i regeneracji powietrza. Dolina Wisły jest głównym i najbardziej efektywnym korytarzem w Warszawie. Jednakże wysoka do 20 m zabudowa w pobliżu doliny, dopuszczona przez obowiązujące Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego m.st. Warszawy (2006), może ograniczyć swobodny przepływ powietrza. Główną strefę zasilającą dolinę Wisły w chłodniejsze powietrze stanowią: Puszcza Kampinoska, łąki w dolinie Wisły, Lasy Chotomowskie i inne kompleksy leśne. Zarówno w północnej, jak i południowej części korytarza znajdują się duże źródła emisji zanieczyszczeń powietrza i ciepła antropogenicznego, w tym elektrociepłownie: Żerań i Siekierki. Stanowią one wysokie źródła emisji, zatem zanieczyszczenia zazwyczaj ulegają rozproszeniu bądź zostają przetransportowane poza Warszawę. Niemniej przy silnej inwersji termicznej może dochodzić do kumulacji zanieczyszczeń w korytarzu Wisły, ponadto technologiczna emisja ciepła sprawia, że w sąsiedztwie elektrociepłowni temperatura powietrza jest podwyższona (SUiKZP, 2006; Błażejczyk et al., 2014).

Rzeki w miastach traktowane są jako jeden z najistotniejszych elementów planów adaptacji do zmian klimatu bazujących na przyrodzie (*nature-based solutions*). Tzw. infrastruktura błękitna (rzeki, ciekі, zbiorniki wodne naturalne, ale też stawy retencyjne, niecki, zbiorniki, rowy bioretencyjne, rowy infiltracyjne, ogrody deszczowe itd.) najczęściej wykorzystywana jest w celu zagospodarowania wód opadowych i powodziowych, jednak stwierdzono również jej silny efekt chłodzący (Gunawardena et al., 2017; Cruz et al., 2020; Yu et al., 2020). W literaturze europejskiej obecne są nieliczne opracowania określające wpływ rzek na warunki termiczne miast, skupiające się przede wszystkim na studiach przypadków cieków o znacznie mniejszym przepływie i szerokości w porównaniu do Wisły.

Pomimo istotnych funkcji przyrodniczych, jakie dla Warszawy pełni dolina Wisły, niewiele wiadomo o jej warunkach termicznych i o kontrastach między doliną a obszarem zabu-

dowanym. Klimat miasta jest przedmiotem badań setek klimatologów na całym świecie już od połowy XIX w. (Howard, 1833; Landsberg, 1981; Oke, 1987; Stewart, 2011). Klimatem obszarów zurbanizowanych w Polsce również zajmowało się większość klimatologów (m.in. Merecki, 1915; Kossowska, 1973, 1978; Kozłowska-Szczęsna et al., 1996, 2001; Wawer, 1997; Lewińska, 2000; Fortuniak, 2003; Szymanowski, 2004; Błażejczyk et al., 2014). Jednak żadna z powyższych prac nie porusza tematu klimatu doliny rzecznej w obrębie miasta.

Jedną z niewielu polskich publikacji koncentrujących się na różnicach reżimu termicznego między doliną rzeki na wysokości Nowego Dworu Mazowieckiego (na północ od miasta, poza aglomeracją), a wysoczyzną, jest artykuł Gołaszewskiego (2004). Na podstawie wieloletnich pomiarów (różne okresy w zależności od stacji między 1951 a 1979 r.) warunków meteorologicznych w dolinie Neru, środkowej Wisły oraz dolinie ujścia Wisły stwierdzono, iż kontrast termiczny zależy od szerokości i głębokości doliny. Rozległa dolina środkowej Wisły cechowała się wyższą średnią temperaturą powietrza o $0,2^{\circ}\text{C}$ w porównaniu do niezabudowanej wysoczyzny. Jednak wyników tych nie można porównywać z danymi z doliny z zabudową. Z kolei temat wyróżniającej się temperatury powierzchni czynnej doliny Wisły poruszony został w opracowaniu końcowym określającym stan ekosystemu m.st. Warszawy w kontekście zmian klimatu (Dąbrowska-Zielińska et al., 2019). Temperatura powierzchni czynnej koryta była niższa do 7°C w porównaniu z sąsiadującymi terenami zabudowanymi, podczas gdy zwarte kompleksy leśne w mieście różniły się jedynie o $3-4^{\circ}\text{C}$.

Znacznie częściej poruszonymi tematami w artykułach publikowanych w Polsce, koncentrującymi się na rzekach obszarów zurbanizowanych, są: wpływ klimatu na zmiany reżimu hydrologicznego (Wrzesiński, 2010), właściwości termiczne wód rzecznych (Bartnik, 2017; Halaś et al., 2019) oraz topoklimat roślinnych zbiorowisk nadwiślańskich w pobliżu miasta (Kowalska et al., 2019).

Typ zagospodarowania silnie kształtuje reżim termiczny dolin rzecznych przebiegających przez tereny zurbanizowane, ale tylko w nielicznych pracach podkreślane jest zróżnicowanie pokrycia brzegów – roślinnością bądź silnie przekształconymi, nieprzepuszczalnymi materiałami (Hathway i Sharples, 2012; Wang et al., 2022). Inne prace, na podstawie zazwyczaj bardzo krótkich serii danych, dowodzą, że na zasięg oddziaływania rzeki duży wpływ ma morfologia miasta – gęstość i kubatura zabudowy oraz układ dróg (Murakawa et al., 1991; Park et al., 2019; Allahyari et al., 2023).

Przedstawione poniżej opracowanie jest pierwszym krokiem w analizie klimatu doliny Wisły na wysokości Warszawy. Celem opracowania jest wstępna ocena warunków termicznych w dolinie Wisły, różnic reżimu termicznego w dolinie w stosunku do centrum i obrzeży miasta, średnio w roku, w poszczególnych miesiącach oraz w wybranych okresach gorących i mroźnych. Ponadto podjęto próbę odpowiedzi na pytanie: w jakim stopniu warunki termiczne punktów pomiarowych kształtuje położenie w dolinie największej rzeki w Polsce, a w jakim najbliższe otoczenie?

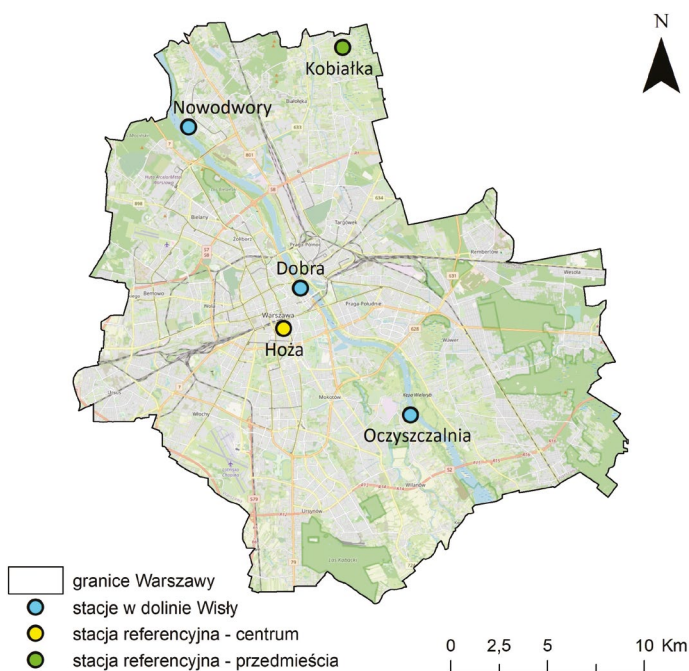
Materiały i metody

Sieć stałego monitoringu termicznego aglomeracji Warszawy rozwijana jest przez klimatologów IGiPZ PAN od 2002 r. Początkowo obejmowała 10 rejestratorów. W latach 2006 i 2009 została znacząco rozwinęta i do 2018 r. obejmowała 29 czujników termiczno-wilgotnościowych HOBO Pro U23-001 oraz U23-002 umieszczonych w różnych typach użyt-

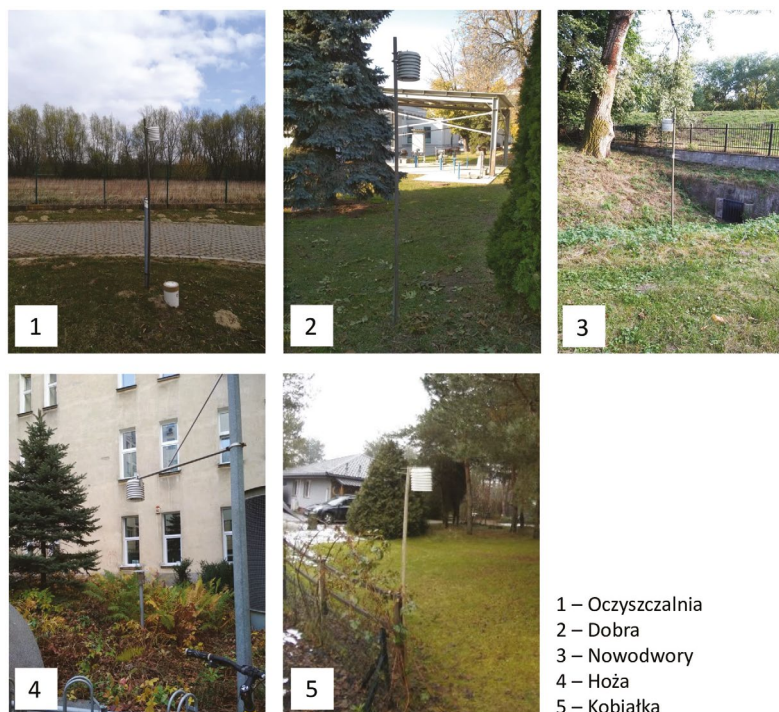
kowania terenu w mieście i jego otoczeniu, na 2 m nad powierzchnią trawiastą, jedynie na stacji Hoża nad płozącymi roślinami okrywowymi (*Juniperus horizontalis*). Od 2019 r. zredukowano sieć do 20 stanowisk. W latach 2015 i 2016 sieć uzupełniły 3 rejestratory termiczno-wilgotnościowe w dolinie Wisły. Znajdują się one na południu, w Śródmieściu i na północy Warszawy (ryc. 1, fot. 1, tab. 1):

- stanowisko Oczyszczalnia leży na równinie zalewowej na lewym brzegu rzeki za wałami przeciwpowodziowymi, które znajdują się na wschód od rejestratora, na obrzeżach Zakładu Oczyszczalni Ścieków Południe Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w m.st. Warszawie SA, przy ul. Sytej 190/192, dzielnica Wilanów;
- punkt Dobra położony jest na nadbudowanym antropogenicznie niskim soleckim tarasie nadzalewowym Wisły, ok. 10 m od trasy Wybrzeża Kościuszkowskiego, w otoczeniu gęstej sieci dróg, na terenie Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji w m.st. Warszawa SA, stacja pomp kanałowych Powiśle przy ul. Dobrej 74, dzielnica Śródmieście;
- stanowisko Nowodwory usytuowane jest na równinie zalewowej na prawym brzegu rzeki, 10 m na wschód od wału przeciwpowodziowego, na terenie parku Seminarium Duchownego Diecezji Warszawsko-Praskiej, przy ul. Mehoffera 2, dzielnica Białołęka.

Ponadto w opracowaniu wykorzystano 2 inne stanowiska pomiarowe reprezentujące Śródmieście oraz obrzeża miasta:



Ryc. 1. Stanowiska pomiarowe wykorzystane w opracowaniu
Measurement stations referenced in the study
 Opracowanie własne; źródło podkładu: OpenStreetMap.



Fot. 1. Stanowiska pomiarowe (fot. Kaja Czarnecka, Magdalena Kuchcik)
The measurement stations

- Hoża – punkt w ścisłym centrum miasta, zlokalizowany na wysoczyźnie morenowej, w „studni miejskiej” otoczonej 6-8-piętrowymi kamienicami, przy ul. Hożej 58/60, dzielnica Śródmieście;
- Kobiąłka – stanowisko referencyjne, położone na północnych obrzeżach miasta, na niskim tarasie nadzalewowym, w otoczeniu mozaiki różnych typów zagospodarowania terenu: łąk, lasów, zabudowy jednorodzinnej, przy ul. Ruskowy Bród 80M, dzielnica Białołęka.

Okresem badawczym dla wszystkich stacji są lata 2017-2022, a podstawą opracowania są 10-minutowe dane z opisanych wyżej 5 rejestratorów. W dalszej części opracowania maksymalna (T_{max}) czy minimalna (T_{min}) temperatura powietrza oznaczać będzie najwyższą lub najniższą wartość zmierzoną podczas danej doby.

Każde stanowisko pomiarowe zostało scharakteryzowane z wykorzystaniem następujących wskaźników (tab. 1):

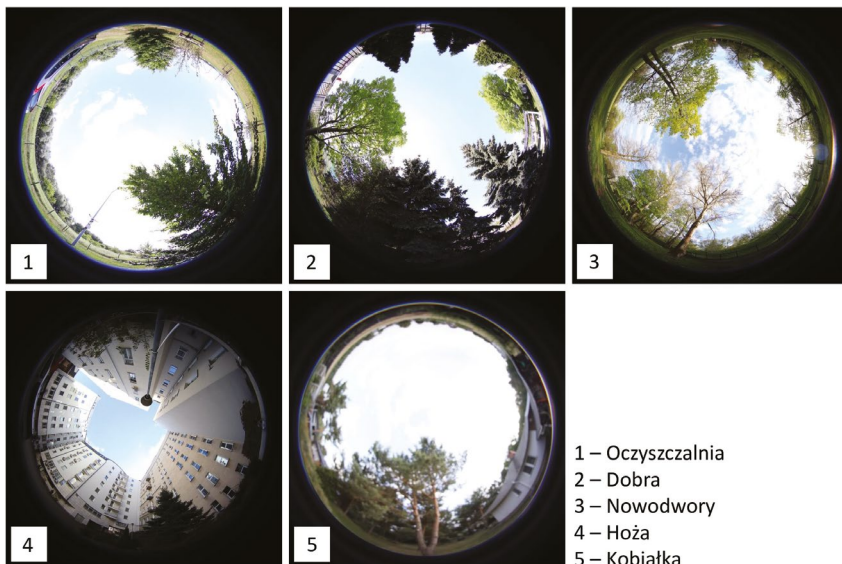
- wskaźnik intensywności zabudowy (WIZ) – stosunek iloczynu powierzchni zabudowy liczonej po zewnętrznym obrysie budynków (z wyłączeniem balkonów i tarasów) i liczby kondygnacji do powierzchni analizowanego obszaru (Information Report No. 111, 1958);
- gęstość zabudowy (Gzab) – udział powierzchni zabudowy liczonej po zewnętrznym obrysie budynków (z wyłączeniem balkonów i tarasów) w powierzchni analizowanego obszaru (Xu et al., 2017);

Tabela 1. Charakterystyka stanowisk pomiarowych
Characteristics of the measurement stations

Nr	Nazwa stanowiska	Wysokość m n.p.m.	WIZ	Gzab [%]	Wmax [m]	Wavg [m]	TBC [%]	SVF
1	Oczyszczalnia	83	0,0	0,0	0,0	0,0	94,2	0,77
2	Dobra	85	0,2	11,9	17,0	8,1	32,4	0,47
3	Nowodwory	80	0,0	1,6	8,0	7,7	93,2	0,48
4	Hoża	113	2,4	45,0	33,0	22,0	5,9	0,27
5	Kobiałka	82	0,2	13,4	11,0	8,1	70,9	0,72

Opracowanie własne na podstawie OpenStreetMap, Bing Aerial, Google Earth Pro.

- maksymalna wysokość budynku (Wmax) – wysokość najwyższego budynku w obrębie analizowanego obszaru (Tsichritzis i Nikolopoulou, 2019);
- średnia wysokość budynku (Wavg) – stosunek sumy powierzchni zabudowy liczonej po zewnętrznym obrysie budynków (z wyłączeniem balkonów i tarasów) i wysokości budynku do powierzchni analizowanego obszaru (Xu et al., 2017);
- wskaźnik terenów biologicznie czynnych (TBC) – stosunek powierzchni biologicznie czynnej (naturalna roślinność o powierzchni większej niż 10 m² na dachach i tarasach uwzględniania w 50%) do powierzchni analizowanego obszaru (Szulczewska et al., 2014);
- wskaźnik odświeżenia horyzontu (SVF) – udział nieba niezastłoniętego przez obiekty w najbliższym otoczeniu punktu pomiarowego do całego pola widzenia obiektywu obliczony metodą Holmera et al. (2001) (fot. 2).

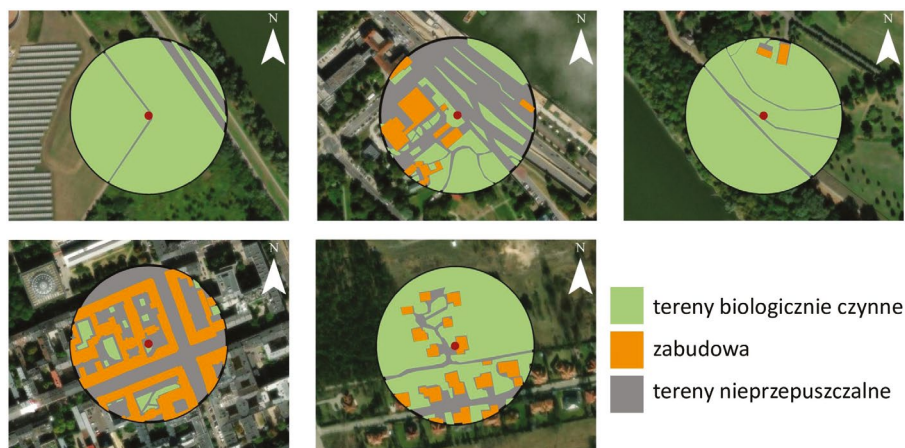


Fot. 2. Zastłonięcie horyzontu na stanowiskach pomiarowych (fot. Jarosław Baranowski, Kaja Czarnecka, Magdalena Kuchcik)
Horizon limitation at the measurement stations

W ocenie wskaźników urbanistycznych brano pod uwagę obszar w promieniu 100 m od każdego stanowiska pomiarowego. Kontury wszystkich budynków i granice terenów biologicznie czynnych zostały zdigitalizowane w programie QGIS 3.4.9 na podstawie wtyczek OpenStreetMap i Bing Aerial (Open Layers Plugin 2.0.0.) (ryc. 2). Informacja o liczbie kondygnacji pochodzi z inwentaryzacji terenowych oraz analizy zdjęć ukośnych (ukosne.um.warszawa.pl). Wysokość budynków została oszacowana za pomocą programu Google Earth Pro. W każdym stanowisku pomiarowym tuż nad czujnikiem termicznym wykonano zdjęcia hemisferyczne z wykorzystaniem obiektywu *fisheye* (Canon EOS M50; CF 4mm F2.8/210° FISHEYE NO.008609). Obliczenia odślonienia horyzontu oraz poprawkę kąta widzenia z 210° do 180° przeprowadzono w programie Sky View Factor Calculator wersja 1.1.

Stanowisko Dobra, położone na tarasie nadzalewowym, w centrum miasta, pomimo niskiej wartości wskaźnika intensywności zabudowy, cechuje się także dość niskim udziałem terenów biologicznie czynnych, co wynika z otoczenia punktu głównie przez ulice i chodniki, które nie wliczają się do wskaźnika WIZ (tab. 1).

Coraz częściej podstawą charakterystyki termicznej dużych obszarów są dane z termalnych obrazów satelitarnych, znacznie bardziej dostępne od pomiarów naziemnych, zatem w niniejszej pracy przedstawiono również temperaturę powierzchni czynnej w dolinie Wisły na terenie m.st. Warszawy. W tym celu wykorzystano 25 zobrazowań (18 – cały obszar, 7 – brak północno-zachodniego fragmentu miasta) z różnych terminów pomiarowych obejmujących wszystkie pory roku (najwięcej z wiosny i lata) między 2002 a 2018 r. stworzonych na potrzeby projektu LIFE_ADAPTCITY_PL¹. Mapy te zostały opracowane na podstawie danych satelitarnych Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI/TIRS oraz Sentinel-2A/B MSI o rozdzielczości 30 m z godzin przedpołudniowych (około 10:00). Wyeliminowany został wpływ pyłów, aerozoli i różnic wynikających z nierówności terenu, zastosowano korekcję



Ryc. 2. Zagospodarowanie przestrzenne w najbliższym sąsiedztwie punktów pomiarowych (promień 100 m)
1 – Oczyszczalnia, 2 – Dobra, 3 – Nowodwory, 4 – Hoża, 5 – Kobiałka
Spatial development in the immediate vicinity of the measurement stations (radius 100 m)
Opracowanie własne na podstawie OpenStreetMap, Bing Aerial, Google Earth Pro.

¹ Zespół IGIK pod kierunkiem prof. K. Dąbrowskiej-Zielińskiej; wykonawcy R. Gurdak, P. Grzybowski, D. Olszewski; źródło finansowania: instrument finansowy LIFE Komisji Europejskiej oraz Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska).

atmosferyczną w oprogramowaniu ATCOR v. 8.3.1. oraz wykonano maskowanie chmur (Dąbrowska-Zielińska et al., 2015, 2019).

W celu lepszego scharakteryzowania warunków termicznych doliny Wisły wytypowano obszary wyróżniające się niższą temperaturą w stosunku do otoczenia, zwane jeziorami chłodu, „cold spotami” lub „cool-spotami” (Mavrakou et al., 2018). W niniejszej pracy zastosowano nazwę „cold spot” ze względu na zastosowaną metodę ich delimitacji – analizę Hot (Cold) Spot. Wykorzystane zostało narzędzie Getis-Ord Gi* (Fixed Distance Band; odległość euklidesowa) oprogramowania ArcGIS. Analizę wykonano dla wszystkich 25 zobrażeń, wykorzystując jedynie te klastry (grupy pikseli), które były istotnie statystycznie (na poziomie 99%) chłodniejsze od otoczenia. Mapy wynikowe zostały na siebie nałożone, a następnie dla każdego piksela obliczono częstość występowania zjawiska „cold spot”. Wartości dla niektórych pikseli, zwłaszcza w północno-zachodniej części Warszawy, mogą być niedoszacowane ze względu na brak danych podczas zachmurzenia lub inną ścieżkę przelotu satelity. Aby wykluczyć sytuacje nietypowe dla danych pikseli, największą uwagę poświęcono obszarom, na których częstość zjawiska wyniosła co najmniej 25%.

Wyniki

W latach 2017-2022 średnia roczna temperatura (T_{sr}) w dolinie Wisły najniższa była na stanowisku Oczyszczalnia (10,2°C), zaś najwyższa na stanowisku Dobra (11,3°C) (tab. 2). Różnica średniej temperatury maksymalnej (T_{max}) między tymi stanowiskami była mniejsza i wyniosła 0,6°C. Znacznie większe zróżnicowanie wykazywała średnia z najniższych 10-minutowych wartości (T_{min}) – 2,1°C między częścią centralną a południową doliny, 3,6°C sięgała różnica między stanowiskami na Dobrej i w Oczyszczalni. Północna i południowa część doliny na odcinku warszawskim cechuje się taką samą średnią dobową amplitudą temperatury powietrza, zaś wartość na Dobrej jest znacząco (o 0,8°C) niższa. Wpływa na to większa intensywność zabudowy wokół punktu na Dobrej w porównaniu do Oczyszczalni i Nowodworów oraz duża powierzchnia asfaltowa ulic wokół (dwujezdniowe, kilkupasmostowe Wybrzeże Kościuszkowskie, Karowa).

Tabela 2. Wybrane charakterystyki termiczne stanowisk pomiarowych w dolinie Wisły, w centrum Warszawy i na obrzeżach

Selected thermal characteristics of the measurement stations in the Vistula valley, city centre and suburbs

[°C]	Oczyszczalnia	Dobra	Nowodwory	Hoża	Kobiałka
T_{max} absolutna data	36,4 30.06.2019	38,2 26.06.2019	36,9 26.06.2019	36,7 26.06.2019	37,7 26.06.2019
T_{max}	15,1	15,7	15,4	14,7	15,3
T_{sr} roczna	10,2	11,3	10,3	11,2	10,1
T_{min}	5,1	7,2	5,7	7,8	4,7
T_{min} absolutna data	-20,4 18.01.2021	-16,8 7.01.2017	-19,1 18.01.2021	-15,3 7.01.2017	-21,3 18.01.2021
Absolutna amplituda T	56,8	55,0	56,0	52,0	58,9
Średnia dobowa amplituda T	8,6	7,8	8,6	6,8	9,9

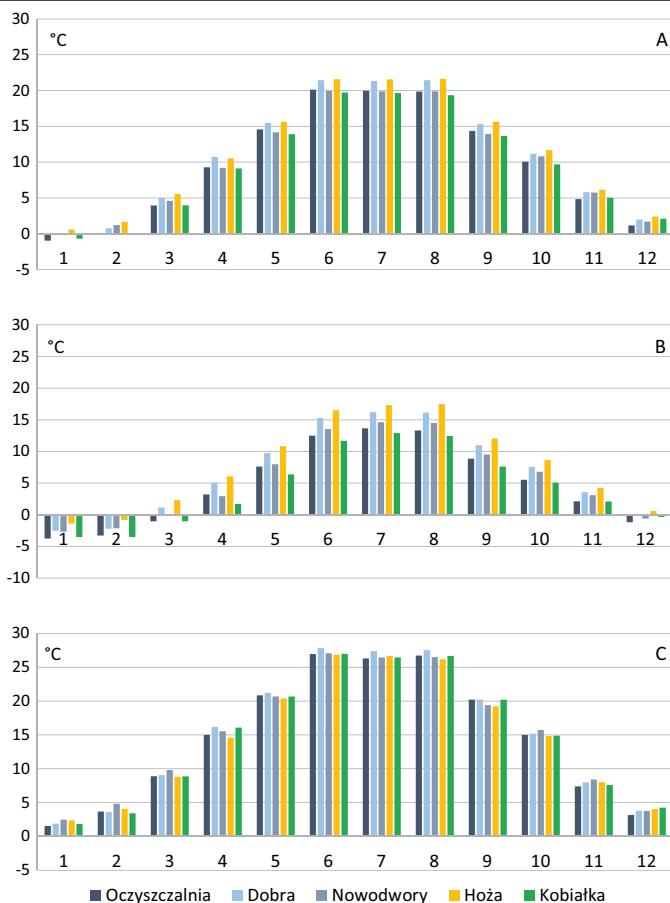
Odmienne wartości notowane są w ścisłym centrum miasta, na zacienionym stanowisku w podwórku wysokich kamienic (Hoża). Średnia temperatura powietrza jest tu nieznacznie niższa w porównaniu ze stanowiskiem na Dobrej, średnia maksymalna jest najniższa spośród wszystkich stanowisk, ale temperatura minimalna jest wyraźnie najwyższa (7,8°C). Podobnie, temperatura minimalna jest tu wyższa o ponad 5°C w porównaniu do południowej części doliny. Efekt zabudowy i miejskiej wyspy ciepła prowadzi do zmniejszenia absolutnej rocznej amplitudy temperatury powietrza, która w centrum jest o 6,9°C niższa w porównaniu z przedmieściami miasta (52°C w porównaniu do 58,9°C). Jednak stosunkowo większe różnice między stanowiskami wykazuje średnia amplituda dobowo: 6,8°C na Hożej w porównaniu do 9,9°C na Kobiałce. Północno-wschodnia część Warszawy jest chłodniejsza niż dolina Wisły – notuje się tu wyraźnie najniższą średnią i absolutną temperaturę minimalną oraz największą amplitudę, choć z drugiej strony – wartości temperatury maksymalnej bywają tu wysokie z uwagi na duże odsłonięcie nieba nad czujnikiem.

Na badanych stanowiskach w dolinie Wisły średnia miesięczna temperatura powietrza jest zawsze najwyższa w punkcie Dobra, a różnice dotyczą pozostałych dwóch stanowisk. W chłodnym półroczu, od października do marca, nieznacznie cieplejsze są Nowodwory, a w półroczu ciepłym, od kwietnia do września, Oczyszczalnia (ryc. 3A). W półroczu chłodnym średnia miesięczna T_{min} na Nowodworach jest o 0,5-2,7°C wyższa w porównaniu z Oczyszczalnią, natomiast w półroczu ciepłym różnice te zawierają się w przedziale 0,1-1,4°C. Świadczy to prawdopodobnie o ogrzewającym wpływie wielkiego osiedla Tarchomin okalającego park i bliskiego sąsiedztwa wału, który osłania czujnik od strony zachodniej, czyli od strony przeważającego kierunku wiatru. Średnia T_{max} jest w półroczu chłodnym wyższa na Nowodworach, ale w półroczu ciepłym – w niewielkim stopniu wyższa w Oczyszczalni – co wynika zapewne z większego niż na Nowodworach odsłonięcia horyzontu i nagrzewania się otoczenia tego punktu (ryc. 3B, C).

Jak opisano wcześniej, największe różnice między stanowiskami związane są z wychładzaniem terenu, a nie z nagrzewaniem, dlatego najsilniej różnicuje stanowiska T_{min} , szczególnie w miesiącach od czerwca do września (ryc. 3B). W okresie tym między stanowiskami położonymi w dolinie Wisły – Dobrą i Oczyszczalnią – różnice sięgają 3,7°C, zaś poza doliną, między Hożą i Kobiałką, różnica średniej T_{min} jest jeszcze większa i zawiera się w przedziale 5,5-6,9°C.

Dni gorące ($T_{max} \geq 25^\circ\text{C}$) notowane są w Warszawie od kwietnia do września, wyraźnie częściej na stanowisku Dobra, w otoczeniu powierzchni sztucznych, ale z mniejszym zasłonięciem horyzontu niż na stacji na Hożej, gdzie liczba dni gorących bywa najniższa wśród analizowanych miejsc (w kwietniu, czerwcu, sierpniu). Dni upalne ($T_{max} \geq 30^\circ\text{C}$) notowane są od maja do sierpnia, choć sporadycznie także w kwietniu i wrześniu. Od czerwca do sierpnia na stacji na Dobrej występuje 9-10 takich dni, na stacji Oczyszczalnia – 7-8,5 dnia, zaś w ścisłym centrum miasta, na zacienionym stanowisku na Hożej – 6-7 dni (ryc. 4A, B).

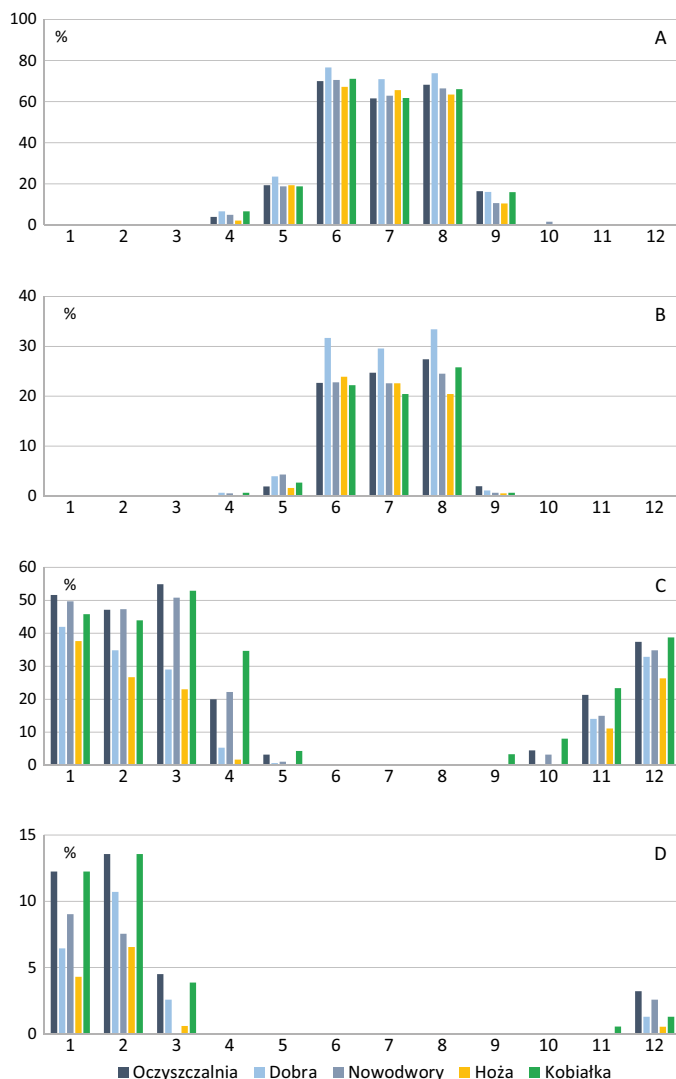
Jako że największe różnice między stanowiskami są widoczne w najniższych notowanych wartościach temperatury, także dni charakterystyczne dla chłodnej połowy roku bardziej różnicują stanowiska w dolinie Wisły. Dni przymrozkowe, w których temperatura minimalna spada poniżej 0°C, a temperatura maksymalna jest wyższa od 0°C ($T_{min} < 0^\circ\text{C}$ oraz $T_{max} > 0^\circ\text{C}$), notowane są w Warszawie od października do maja, choć w centrum miasta – od listopada do kwietnia. Na południu i północy doliny Wisły ich liczba jest zazwyczaj do siebie zbliżona – w poszczególnych miesiącach różni się najczęściej o 0,5-1 (w marcu w Oczyszczalni – 17 dni, na Nowodworach – 15,7 dnia). Od tego wzorca wyraźnie odbiega



Ryc. 3. Średnia miesięczna temperatura powietrza (A), średnia minimalna (B) i średnia maksymalna (C) na stacjach położonych w dolinie Wisły, w centrum oraz na obrzeżach Warszawy, 2017-2022
Mean monthly air temperature (A), mean minimum (B) and mean maximum (C) at the stations situated in the Vistula Valley, in the city centre, and in the suburbs, 2017-2022

Dobra, gdzie dni przymrozkowych jest dwukrotnie, a nawet czterokrotnie (w kwietniu) mniej. W marcu i w listopadzie na południu i północy doliny jest dwukrotnie więcej dni przymrozkowych w porównaniu z centrum miasta.

Za dzień umiarkowanie mroźny przyjęto dzień, w którym temperatura minimalna jest niższa od -10°C (Kuchcik et al., 2013), choć w innym opracowaniu dzień taki ($T_{min} \leq -10^{\circ}\text{C}$) nazwany jest dniem mroźnym (Kozłowska-Szczęsna et al., 2004). Dni takich w dolinie Wisły jest zdecydowanie więcej na południu niż w części północnej, co można tłumaczyć różnicą lokalizacji rejestratorów. W Oczyszczalni, na otwartym terenie, powietrze przy gruncie szybko ulega wychłodzeniu, zaś w parku na Nowodworach, zarówno zasłonięcie czujnika od strony zachodniej przez pobliski wał przeciwpowodziowy, jak i obecność drzew, powodują zmniejszone wychłodzenie. Dni z $T_{min} \leq -10^{\circ}\text{C}$ notowane są od grudnia do marca, a ich częstość w południowej części doliny Wisły jest zbliżona do częstości na północno-wschodnich obrzeżach miasta (ryc. 4C, D).



Ryc. 4. Częstość w miesiącu: A – dni gorących ($T_{max} \geq 25^\circ\text{C}$), B – dni upalnych ($T_{max} \geq 30^\circ\text{C}$), C – dni przymrozko-
wych ($T_{min} < 0^\circ\text{C}$ i $T_{max} > 0^\circ\text{C}$), D – dni umiarkowanie mroźnych ($T_{min} \leq -10^\circ\text{C}$) na stacjach położonych w dolinie Wisły,
w centrum oraz na obrzeżach Warszawy, 2017-2022

The frequency of: A – hot days ($T_{max} \geq 25^\circ\text{C}$), B – very hot days ($T_{max} \geq 30^\circ\text{C}$), C – frosty days ($T_{min} < 0^\circ\text{C}$ and $T_{max} > 0^\circ\text{C}$)
and D – very frosty days ($T_{min} \leq -10^\circ\text{C}$) at the stations situated in the Vistula Valley, the city centre and the sub-
urbs, 2017-2022

Jak wcześniej wspomiano, największe różnice między stanowiskami wykazuje T_{min} . W związku z tym w dalszej części opracowania uwaga zostanie skupiona na minimalnej dobowej temperaturze powietrza oraz na jej różnicach między doliną Wisły, obszarem peryferyjnym i terenem najintensywniej zabudowanym.

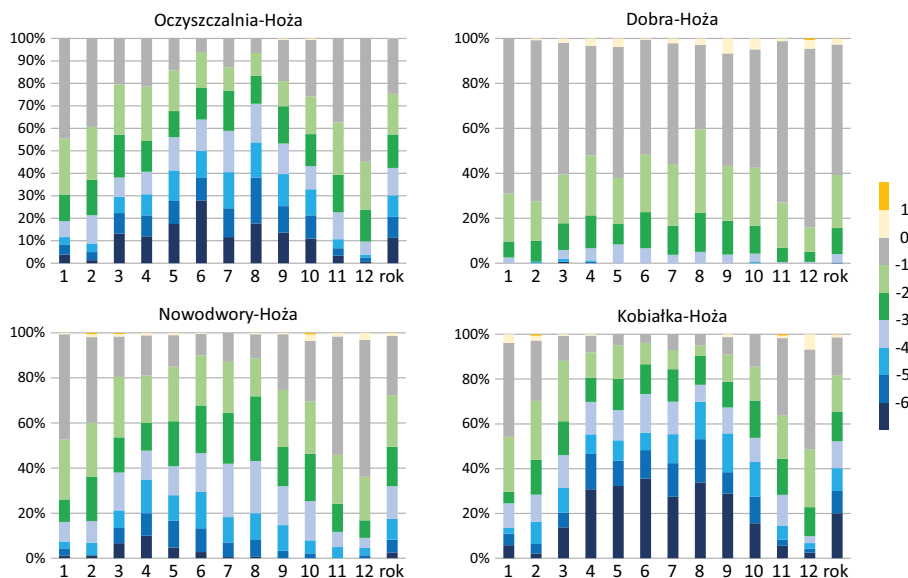
Różnice T_{min} między stacją na Hożej a stacjami położonymi w dolinie sięgnęły $-11,8^\circ\text{C}$ (Oczyszczalnia – 5.03.2018), $-8,6^\circ\text{C}$ (Nowodwory – 22.03.2022), $-8,9^\circ\text{C}$ (Dobra –

5.03.2018), a $-12,1^{\circ}\text{C}$ w stosunku do północno-wschodnich obrzeży miasta (Kobiałka – 5.03.2018). Różnice bezwzględne przekraczające 8°C były bardzo rzadkie (od 1 przypadku na Dobrej po 19 w Oczyszczalni – na 2005 analizowanych dni), dlatego do szczegółowej charakterystyki przyjęto próg 6°C . W poniższym opisie usunięto znaki ujemne, zakładając, że w większości sytuacji stanowiska położone w dolinie były chłodniejsze od centrum.

Temperatura minimalna na stanowisku Oczyszczalnia była niższa w porównaniu do Hożej o ponad 6°C przez średnio 11,3% dni w roku – najczęściej w czerwcu, kiedy było to aż 28% dni w miesiącu. Od maja do września przez nie mniej niż 40% dni w miesiącu południowa część doliny Wisły była chłodniejsza od centrum o co najmniej 4°C . Zimą kontrasty mały i przeważała różnica nie większa niż 2°C (ryc. 5).

Różnice T_{min} między Hożą a stacją na Nowodworach są wyraźnie mniejsze w porównaniu z wyżej opisaną stacją zlokalizowaną w dzielnicy Wilanów. Stacja w Nowodworach była chłodniejsza od centrum o ponad 6°C tylko w 2,6% dni w roku, najczęściej w kwietniu (10% dni w miesiącu). Od marca do sierpnia częstość dni w miesiącu z T_{min} niższą o co najmniej 4°C na Nowodworach w stosunku do Hożej wynosiła 18,3-35%. Od listopada do stycznia różnica termiczna w 73-80% dni w miesiącu nie przekraczała -2°C . W analizowanych 6 latach wystąpiły też 26 dni, w których T_{min} była wyższa na Nowodworach w porównaniu z centrum (ryc. 5).

Odmiennie kształtują się różnice między Hożą i Dobrą położonymi w Śródmieściu, a oddalonymi od siebie o 2,2 km w linii prostej. Wystąpiło jedynie 7 dni, w których stanowisko w dolinie Wisły było chłodniejsze o więcej niż 4°C od zwartej zabudowy miejskiej. Średnio w roku, podczas aż 82% dni Dobra była chłodniejsza od Hożej, jednak maksymalnie o 2°C , natomiast od listopada do lutego częstość tych różnic wynosiła 89-92% dni w miesiącu (ryc. 5).



Ryc. 5. Rozkład różnic temperatury minimalnej między centrum miasta (Hoża) a pozostałymi stacjami w kolejnych miesiącach i w całym roku, Warszawa 2017-2022

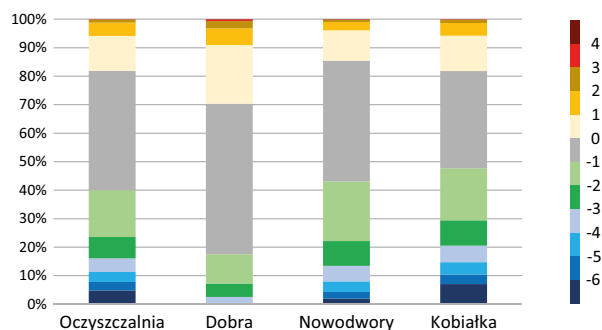
Distribution of differences in values for minimum air temperature between the city centre (Hoża) and the other stations, in consecutive months and the whole year, Warsaw 2017-2022

Na podstawie wcześniej opisanych charakterystyk termicznych można stwierdzić, że Oczyszczalnia w dolinie Wisły na południu Warszawy i Kobiąłka na północno-wschodnich peryferiach prezentują podobne warunki termiczne, jednak ocena wartości T_{min} pokazuje, że na przedmieściach są one znacznie ostrzejsze. Na stacji Kobiąłka średnio podczas 20% dni w roku notowana jest T_{min} niższa o ponad 6°C w stosunku do Hożej, a w 40% dni różnica ta jest większa od 4°C.

Ciekawe, że niezależnie od stacji, skrajnie niskie wartości T_{min} w porównaniu ze Śródmieściem najczęściej występowały w czerwcu i sierpniu, zaś w lipcu kontrasty były mniejsze.

T_{min} na różnych stanowiskach występuje w różnych godzinach. Biorąc pod uwagę różnice jednocześnie mierzonych wartości 10-minutowych na stacjach w dolinie Wisły i na przedmieściach w stosunku do zmierzonych w tym samym czasie w obrębie zwartej, intensywnej zabudowy miejskiej, częstość wartości przekraczających 6°C wyniosła: 4,8% w Oczyszczalni, 0% na Dobrej, 1,9% na Nowodworach i 7% na Kobiąłce. Częstość różnic większych od 1°C na powyższych stanowiskach wyniosła odpowiednio: 40%, 17,5%, 43% i 47,7%. Skrajnie chłodniejsze częściej było południe doliny niż północ, jednak biorąc pod uwagę wszystkie 10-minutowe pomiary, niezależnie od wartości różnicy, stanowisko na Nowodworach było chłodniejsze od Hożej w 96,1% przypadków, zaś stanowisko w Oczyszczalni w 94% pomiarów (ryc. 6).

Uzupełnieniem powyższych zestawień są przykładowe przebiegi średniej godzinowej temperatury powietrza latem i zimą w dwóch okresach 5-dniowych, w których wystąpiły duże różnice termiczne między stanowiskami. W dniach 16-20 sierpnia 2022 r. średnia różnica między Hożą a stanowiskami w dolinie wyniosła: 2,6°C (Oczyszczalnia), 1,2°C (Nowodwory) i 0,2°C (Dobra), zaś maksymalne różnice sięgnęły odpowiednio: 9,6°C, 6,3°C i 4,1°C (ryc. 7). Przedstawione na wykresie największe różnice występują między Hożą i Kobiąłką (sięgają 10,9°C), czyli między ścisłym centrum miasta a obrzeżami, natomiast stanowiska w dolinie są zazwyczaj cieplejsze niż północno-wschodnie obrzeża. W typie radiacyjnym pogody, latem, temperatura w dolinie (Oczyszczalnia, Nowodwory) zaczyna wyraźnie spadać w godzinach 18-19, najniższe wartości osiąga między 22 a 3, po czym wzrasta, by między 12 a 14 osiągnąć wyższe wartości w porównaniu z zacienionym w tych godzinach stanowiskiem na Hożej. Warunki termiczne stacji na Dobrej w dolinie Wisły na wysokości Śródmieścia, otoczonej wieloma powierzchniami sztucznymi, w sierpniu



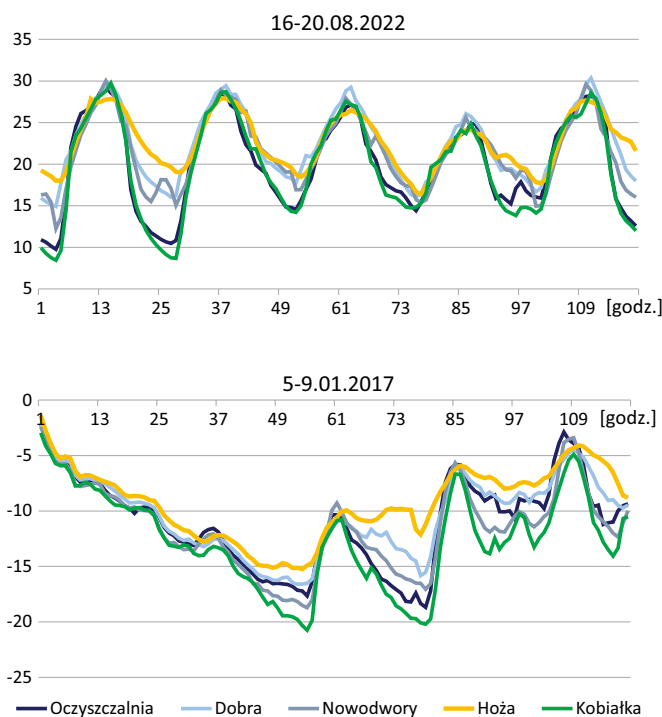
Ryc. 6. Rozkład różnic wartości temperatury 10-minutowej między centrum miasta (Hoża) a pozostałymi stacjami, Warszawa 2017-2022

Distribution of differences in values for 10-minute air temperatures between the city centre (Hoża) and the other stations, Warsaw 2017-2022

przypominają przebiegiem warunki na Hożej, cechując się jedynie nieco niższymi wartościami w porównaniu ze ścisłym centrum miasta (ryc. 7).

Przykład ze stycznia 2017 r. pokazuje początkowy brak zróżnicowania termicznego w mieście w czasie pogody niżowej i wzrost różnic wraz ze spadkiem temperatury. Nad ranem 8 stycznia różnice te osiągnęły, w stosunku do stanowiska na Hożej, następujące wartości: 8,3°C w Oczyszczalni, 6,4°C na Nowodworach i 4,4°C na Dobrej. W wybranym okresie zimowym średnie różnice termiczne między obrzeżami miasta a centrum były większe niż w analizowanym okresie letnim. Stanowisko na Dobrej w wybranym okresie jest wyraźnie chłodniejsze od Hożej i w przeciwieństwie do lata, przebieg temperatury jest tu bardziej zbliżony do pozostałych stanowisk położonych w dolinie Wisły niż do stanowiska w ścisłej zabudowie miejskiej (ryc. 7).

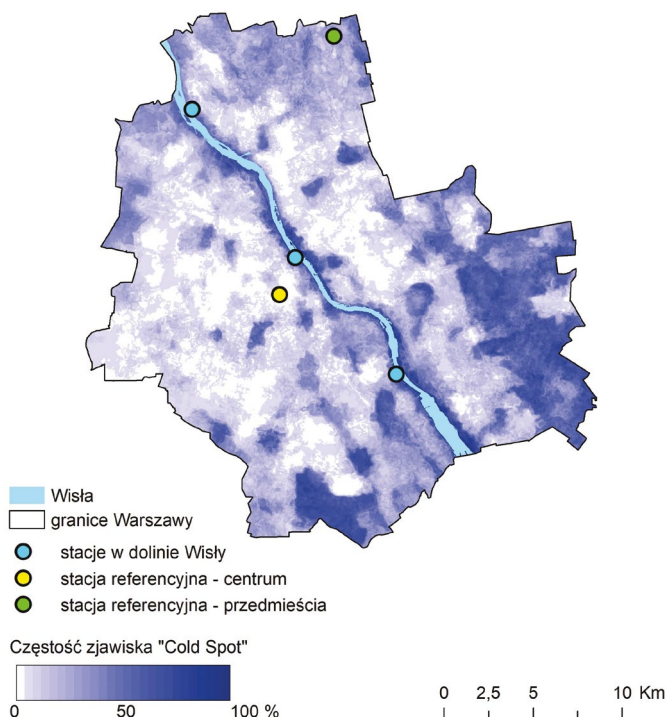
Dodatkową informacją o warunkach termicznych w dolinie Wisły może być analiza materiału zebranego w projekcie LIFE_ADAPTCITY_PL, na który składa się m.in. 25 obrazów termalnych z lat 2002-2018, zatem z okresu znacznie dłuższego niż analizowany w tym artykule. W latach 2002-2018 w granicach Warszawy w godzinach przedpołudniowych stwierdzono częste pojawianie się zjawiska „cold spot”, polegającego na występowaniu statystycznie istotnie niższej temperatury powierzchni czynnej w stosunku do najbliższego otoczenia (ryc. 8). Szczególnie wyróżniającym się obszarem jest dolina Wisły – wzdłuż



Ryc. 7. Średnia temperatura godzinowa w okresach szczególnych kontrastów termicznych latem (16-20.08.2022) i zimą (5-9.01.2017) na stacjach położonych w dolinie Wisły, w centrum oraz na obrzeżach Warszawy
Mean hourly air temperature in periods of marked temperature contrasts during summer (16-20.08.2022) and winter (5-9.01.2017) at the stations situated in the Vistula Valley, the city centre and the suburbs

całego odcinka rzeki w mieście, po obu jej stronach, zjawisko występuje na co najmniej 25% analizowanych scen. Ponadto, w najbliższym otoczeniu rzeki częstość zjawiska miejscami przekracza 88%. Powstawanie wyraźnych kontrastów spowodowane jest znacznie wolniejszym nagrzewaniem powierzchni naturalnych bądź z dużym udziałem powierzchni biologicznie czynnych w stosunku do terenów silnie przekształconych antropogenicznie, o dużo mniejszej pojemności cieplnej. Do pozostałych obszarów wyróżniających się częstym występowaniem zjawiska należą kompleksy leśne o różnej wielkości, takie jak Las Kabacki, Mazowiecki Park Krajobrazowy lub Lasek na Kole. Do mniejszych „cold spotów” włączone zostały również cmentarze (Powązkowski, Bródnowski) oraz niektóre parki miejskie, niekiedy wraz z otaczającą je zabudową cechującą się dużym udziałem zieleni (np. Park Skaryszewski, Łazienki Królewskie, Pole Mokotowskie).

Występowanie zjawiska „cold spot” zaobserwowano na każdej z trzech stacji zlokalizowanych w dolinie Wisły. Najczęściej miało ono miejsce na stacji na Dobrej – spośród 23 scen, na których stacja była w pełni widoczna, na 17 zaobserwowano obniżoną temperaturę powierzchni czynnej w stosunku do otoczenia (częstość 74%). Stacja Nowodwory została nim objęta na 12 z 20 obrazowań (częstość 60%). Zjawisko występowało najrzadziej na stacji Oczyszczalnia – mimo obecności na wszystkich 25 scenach, zjawisko „cold spot” miało miejsce 12 razy (częstość 48%). Na stacji Hoża zlokalizowanej w gęstej, wyso-



Ryc. 8. Częstość zjawiska „cold spot” w Warszawie na podstawie 25 scen z lat 2002-2018
Frequency of occurrence of the “cold spot” effect in Warsaw on the basis of 25 scenes over the years 2002-2018

Opracowanie własne na podstawie map LST z projektu LIFE_ADAPTCITY_PL (Dąbrowska-Zielińska et al., 2015, 2019) oraz Mapy Podziału Hydrograficznego Polski.

kiej zabudowie, zjawisko nie wystąpiło w ogóle, z kolei stacja na peryferiach w Kobiałce znalazła się w zasięgu „cold spotu” na 6 z 24 scen (częstość 25%). Wynika to z faktu, że analiza zjawiska „cold spot” obejmuje znacznie większy obszar niż najbliższe otoczenie punktu, w przeciwieństwie do temperatury powietrza czy samej temperatury powierzchni czynnej. Na powstawanie „cold spotu” wpływa nie tylko rzeka, lecz właściwości tkanki miejskiej. Bardzo częste jego występowanie na Dobrej wskazuje na silne kontrasty temperatury powierzchni czynnej między pobliską rzeką i sąsiadującą z nią bezpośrednio gęstą zabudową i dużymi powierzchniami asfaltowych dróg. Różnice temperatury powierzchni czynnej między pozostałymi stacjami położonymi w dolinie, a sąsiadującą z nimi luźniejszą niż w centrum zabudową, są znacznie mniejsze. Wraz z rosnącym udziałem powierzchni biologicznie czynnej i mniejszą gęstością zabudowy, mniej widoczne staje się oddziaływanie rzeki na najbliższe sąsiedztwo.

Zasięg obniżonej temperatury powierzchni czynnej względem otoczenia w dolinie Wisły nie jest równomierny na całym odcinku rzeki. Przez wszystkie stacje zlokalizowane w dolinie przeprowadzono trzy profile prostopadłe do rzeki łączące zasięg występowania „cold spotów” o częstości ponad 25% po jej obu stronach. Profil przeprowadzony na wysokości Oczyszczalni jest najszerszy – wynosi 1635 m. Część profilu na prawym brzegu Wisły, licząc od granicy koryta, wynosi aż 934 m, podczas gdy na lewym zaledwie 473 m. Profil przeprowadzony na wysokości Dobrej jest najwęższy – 1300 m. Rozkład po lewej i prawej stronie rzeki jest tu najbardziej równomierny, wynosząc odpowiednio 596 m i 387 m. Szerokość profilu na wysokości Nowodworów wynosi 1308 m, a różnice zasięgu między brzegami są największe. Po lewej stronie Wisły wynosi 729 m, z kolei po prawej tylko 209 m. W przypadku profili przeprowadzonych przez stację w Oczyszczalni i w Nowodworach czynnikiem ograniczającym występowanie zjawiska jest obecność dużych ciągów komunikacyjnych oraz zabudowy o średniej wysokości. Mimo obecności tych samych elementów w najbliższym otoczeniu Dobrej, sytuacja jest odmienna. Tutaj zjawisko obejmuje zarówno szeroką drogę, jak i sąsiadujące budynki, a głównym czynnikiem ograniczającym jest dalszy wzrost intensywności zabudowy i zmniejszanie powierzchni terenów zieleni wraz oddalaniem się od rzeki.

Podsumowanie i dyskusja wyników

Na podstawie porównania wyników z 3 stacji położonych w południowej, środkowej i północnej części doliny w obrębie Warszawy ze stacją śródmiejską oraz położoną na obrzeżach miasta wykazano zarówno wyraźny wpływ Wisły na kształtowanie reżimu termicznego, jak i różnice między opisywanymi częściami doliny.

Najchłodniejszym stanowiskiem w dolinie jest Oczyszczalnia, leżąca na południu, najcieplejszym zaś Dobra, położona w Śródmieściu. Największe różnice między stanowiskami związane są z wychładzaniem terenu, a nie z nagrzewaniem, dlatego też najsilniej różnicuje stanowiska T_{min} , szczególnie od czerwca do września, choć największe absolutne różnice T_{min} między doliną a centrum miasta zanotowano w marcu (11,8°C między stanowiskami Hoża i Oczyszczalnia w dniu 5.03.2018). Liczba dni gorących jest bardzo podobna na wszystkich pięciu stacjach, ale dni upalnych jest wyraźnie najwięcej w części śródmiejskiej doliny. Zimą stacja w północnej części doliny jest wyraźnie cieplejsza od stanowiska

położonego na południu, na co wpływ ma prawdopodobnie pobliski okap koron wysokich drzew i sąsiedztwo wału przeciwpowodziowego osłaniającego czujnik od zachodu.

Jednoczesne różnice wartości 10-minutowych między ścisłym centrum a doliną są znacznie mniejsze niż różnice T_{min} i rzadko przewyższają 6°C (4,8% dni na południu doliny, 1,9% dni na północy). Ogólnie południe doliny jest chłodniejsze od zabudowy w centrum w 82% pomiarów, północ doliny w 85,5%, zaś stanowisko śródmiejskie w 70%.

Surowe warunki termiczne notowane na otwartej przestrzeni stacji w Oczyszczalni znajdują potwierdzenie w pracy Błażejczyka (2002) dotyczącej klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej. Wykorzystano w niej roczną serię pomiarów temperatury (2001/2022) na stacji w Siekierkach, leżącej w polu, na tarasie zalewowym, blisko Oczyszczalni, jednak w większej odległości od koryta rzeki. Stacja Siekierki była najchłodniejszą z wszystkich analizowanych w pracy stacji leżących w granicach Warszawy.

Analizując efekt chłodzący rzeki Hathway i Sharples (2012) zaobserwowali istotny wpływ rzeki Don w Sheffield na najbliższe otoczenie doliny w okresie wiosenno-letnim w porze dziennej. Rzeka w mieście przypomina kanał o szerokości ok. 20 m, którego obydwa brzegi są ściśle zabudowane. Jej efekt chłodzący wyniósł 1°C przy wartościach temperatury powietrza powyżej 20°C oraz do 1,5°C-2,0°C w okresie upalnym. Zatem w Warszawie średni efekt chłodzący jest o 0,5-1°C większy, a w okresie upalnym sięga 9,6°C. Ochładzający wpływ rzek stwierdzono w wielu innych publikacjach międzynarodowych, dotyczących jednak głównie obszarów o cieplejszym klimacie: w Japonii (Murakawa et al., 1991), Korei Południowej (Kim et al., 2008; Park et al., 2019) czy Chinach (Huang et al., 2008). Oddziaływanie Jangcy w mieście Wuhan (obniżenie temperatury powietrza do 3,5°C) sięga do 1740 m od brzegu rzeki (Wang et al., 2022). Często prace te oparte są jednak na krótszych seriach niż warszawska, czasem zaledwie jednodniowych kampaniach pomiarowych.

Wraz z rosnącą gęstością zabudowy i spadkiem terenów biologicznie czynnych wokół punktu pomiarowego maleje wyraźnie średnia amplituda dobową temperatury powietrza. Północna i południowa część doliny na odcinku warszawskim cechuje się taką samą średnią dobową amplitudą temperatury powietrza, zaś wartość na Dobrej jest znacząco niższa. W powyższych analizach wyraźnie widać wpływ, jaki na warunki termiczne ma najbliższe sąsiedztwo punktu – otoczenie płaskimi powierzchniami sztucznymi, sąsiedztwo dużych arterii ulicznych i dodatkowe ciepło emitowane z poruszających się po nich pojazdów. Sąsiedztwo to powoduje, że stanowisko w dolinie bywa momentami cieplejsze niż najgęściej zabudowany obszar miasta.

Wpływ zagospodarowania terenu na zasięg oddziaływania rzeki jest szczególnie widoczny w przypadku temperatury powierzchni czynnej, poruszanej w artykule w postaci „cold spotów”. W mieście Shenyang (Mandżuria) w dzielnicach nad rzeką Hun stwierdzono wyraźne ochłodzenie w odległości do 2500 m (Guo et al., 2023). Podobnie jak stwierdzono w niniejszej publikacji, wraz ze wzrastającą odległością od rzeki zwiększa się tam wpływ roślinności i gęstości zabudowy na temperaturę powierzchni czynnej w mieście. W publikacji Barat et al. (2001) zbadano wpływ Gangesu na powierzchnię miejską wysp ciepła w nadrzecznych miastach. Gdy wiatr wiał od rzeki w kierunku miasta, intensywność zjawiska się zmniejszała, z kolei wzrastała, gdy kierunek był odwrotny. W badaniu otoczenia rzeki Huangpu w Szanghaju zaobserwowano wpływ rzeki na temperaturę powierzchni czynnej sięgający 9,1°C o zasięgu oddziaływania od 72 m do 465 m (Jiang et al., 2021). Na obszarach z niską zabudową, intensywność chłodzenia była większa, a duża gęstość

dróg prostopadłych do brzegu rzeki zwiększała zasięg jej oddziaływania. Stwierdzono, iż wpływ rzeki na obszary o intensywnej zabudowie jest zdecydowanie większy niż w przypadku terenów o dużej powierzchni biologicznie czynnej. Wyniki te, choć na podstawie zaledwie 1 sceny termicznej, są zgodne z rezultatami prezentowanymi w niniejszej publikacji pochodzącymi z 25 obrazowań, wskazującymi na najczęstsze występowanie „cold spotu” w śródmiejskiej części doliny. W otoczeniu nagrzewających się silnie powierzchni sztucznych oddziaływanie Wisły jest częściej widoczne niż tam, gdzie z doliną sąsiadują tereny zieleni, choć zakres tego oddziaływania jest mniejszy z racji szybko rosnącej intensywności zabudowy na lewym brzegu Wisły na wysokości Śródmieścia.

Aby spróbować rozdzielić oddziaływanie najbliższego otoczenia punktu od położenia na lewym lub prawym brzegu rzeki przedstawiona w artykule wstępna charakterystyka termiczna doliny Wisły będzie w przyszłości uzupełniona o analizę zależności między wskaźnikami urbanistycznymi, opisującymi sąsiedztwo stacji, a temperaturą powietrza. Planowana jest dokładniejsza analiza zjawiska „cold spotów” w dolinie. Opracowane zostaną także dane dotyczące wilgotności powietrza, a w przypadku zwiększenia bazy pomiarowej, możliwe będzie poznanie klimatu odczuwalnego doliny Wisły na terenie największego miasta, przez które przepływa.

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

Piśmiennictwo

- Allahyari, H., Salehi, E., Zebardast, L., & Jafari, H. (2023). Investigating the Influence of Urban River Valleys on Meteorological Parameters at the Local Scale as a Factor for urban sustainability – Case study: Farahzad River Valley. *Pollution*, 9(2), 839-855. <https://doi.org/10.22059/poll.2023.350003.1663>
- Barat, A., Parth Sarthi, P., Kumar, S., Kumar, P., & Sinha, A.K. (2001). Surface Urban Heat Island (SUHI) Over Riverside Cities Along the Gangetic Plain of India. *Pure Appl. Geophys.*, 178, 1477-1497. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02701-6>
- Bartnik, A. (2017). *Mała rzeka w dużym mieście*. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Błażejczyk, K. (2002). *Znaczenie czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej*. Dokumentacja Geograficzna, 26. Warszawa: IGiPZ PAN.
- Błażejczyk, K., Kuchcik, M., Milewski, P., Dudek, W., Kręcisz, B., Błażejczyk, A., Szmyd, J., Degórska, B., & Pałczyński, C. (2014). *Miejska wyspa ciepła w Warszawie: uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne*. Warszawa: Wydawnictwo Akademickie SEDNO, IGiPZ PAN.
- Cruz, J.A., Blanco, A.C., Garcia, J.J., Santos, J.A., & Moscoso, A.D. (2021). Evaluation of the cooling effect of green and blue spaces on urban microclimate through numerical simulation: A case study of Iloilo River Esplanade, Philippines. *Sustainable Cities and Society*, 74, 103184. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103184>
- Dąbrowska-Zielińska, K., Gurdak, R., Grzybowski, P., & Olszewski, D. (2019). *Opracowanie końcowe określające stan ekosystemu m.st. Warszawy w kontekście zmian klimatu w ramach projektu LIFE_ADAPTCITY_PL*. Warszawa: Instytut Geodezji i Kartografii, Centrum Teledetekcji.

- Dąbrowska-Zielińska, K., Hościło, A., Tomaszewska, M., & Kiryła, W. (2015). LIFE ADAPTCITY PL – Przygotowanie strategii adaptacji do zmian klimatu miasta metropolitalnego przy wykorzystaniu mapy klimatycznej i partycypacji społecznej, Sprawozdanie z realizacji projektu. Warszawa: Instytut Geodezji i Kartografii, Centrum Teledetekcji.
- Fortuniak, K. (2003). Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Gołaszewski, D. (2004). Próba oceny wpływu dolin rzecznych na kształtowanie się wybranych parametrów meteorologicznych. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 13(2), 55-64.
- Gunawardena, K.R., Wells, M.J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. *Science of The Total Environment*, 584-585, 1040-1055.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>
- Guo, F., Xu, S., Zhao, J., Zhang, H., Liu, L., Zhang, Z., & Yin, X. (2023). Study on the mechanism of urban morphology on river cooling effect in severe cold regions. *Front. Public Health*, 11, 1170627.
<https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1170627>
- Halaś, A., Czarnecka, K., Piasecki, K., & Łaszewski, M. (2019). Przestrzenne i sezonowe zróżnicowanie wybranych parametrów jakości wody w zlewni zurbanizowanej na przykładzie Potoku Służewieckiego. *Przegląd Geograficzny*, 91(1), 121-138. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2019.1.6>
- Hathway, E.A., & Sharples, S. (2012). The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Building and Environment*, 58, 14-22.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.013>
- Holmer, B., Postgård, U., & Eriksson, M. (2001). Sky view factors in forest canopies calculated with IDRISI. *Theoretical and Applied Climatology*, 68, 33-40. <https://doi.org/10.1007/s007040170051>
- Howard, L., (1833). *The Climate of London*. Harvey & Darton, 1ton & Dart.
- Huang, L., Zhao, D., Wang, J., Zhu, J., & Li, J. (2008). Scale impacts of land cover and vegetation corridors on urban thermal behavior in Nanjing, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 94, 241-257. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0359-4>
- Information Report No. 111. (1958). Floor Area Ratio. *American Society of Planning Officials*. Chicago, Illinois.
- Jiang, L., Liu, S., Liu, C., & Feng, Y. (2021). How do urban spatial patterns influence the river cooling effect? A case study of the Huangpu Riverfront in Shanghai, China. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102835. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102835>
- Kim, Y.H., Ryoo, S.B., Baik, J.J., Park, I.S., Koo, H.J., & Nam, J.C. (2008). Does the restoration of an inner-city stream in Seoul affect local thermal environment? *Theoretical and Applied Climatology*, 92, 239-248. <https://doi.org/10.1007/s00704-007-0319-z>
- Kossowska, U. (1973). Osobliwości klimatu wielkomiejskiego na przykładzie Warszawy. *Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW*, 12, 141-185.
- Kossowska-Cezak, U. (1978). *Wpływ dużego kompleksu zieleni miejskiego na warunki termiczno-wilgotnościowe (na przykładzie warszawskiego Ogródu Zoologicznego)*. Prace i Studia Instytutu Geograficznego UW, 26. Warszawa: Uniwersytet Warszawski.
- Kowalska, A., Affek, A., Regulska, E., Wolski, J., Kruczkowska, B., Kołaczkowska, E., Zawiska, I., & Baranowski, J. (2019). Łęgi jesionowo-wiązowe w dolinie środkowej Wisły – stan ekosystemów pozbawionych zalewów i wytyczne do działań ochronnych. *Przegląd Geograficzny*, 91(3), 295-323.
<https://doi.org/10.7163/PrzG.2019.3.1>
- Kozłowska-Szczęsna, T., Błażejczyk, K., & Krawczyk, B. (1996). Środowisko fizycznogeograficzne w Warszawie – niektóre zagadnienia. W: *Atlas Warszawy*, 4. Warszawa: IGI PAN.

- Kozłowska-Szczęsna, T., Krawczyk, B. & Błażejczyk, K. (2001). *Charakterystyczne cechy klimatu Warszawy*. Prace Geograficzne, 180. Warszawa: IGI PAN.
- Landsberg, H.E. (1981). *The urban climate*. New York: Academic Press.
- Lewińska, J. (2000). *Klimat miasta, zasoby, zagrożenia, kształtowanie*. Kraków: Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej.
- Mavrakou, T., Polydoros, A., Cartalis, C. & Santamouris, M. (2018). Recognition of thermal hot and cold spots in urban areas in support of mitigation plans to counteract overheating: application for Athens. *Climate*, 6(1). <https://doi.org/10.3390/cli6010016>
- Merecki, R. (1915). *Klimatologia ziem polskich*. Warszawa: Drukarnia i Litografia „Jan Cotty”
- Murakawa, S., Sekine, T., Narita, K., & Nishina, D. (1991). Study of the effects of a river on the thermal environment in an urban area. *Energy and Buildings*, 16(3-4), 993-1001. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90094-J](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90094-J)
- Nowacka-Rejzner, U. (2009). Doliny rzeczne w systemie przyrodniczym Małopolski i ich znaczenie dla krystalizacji struktury wybranych miast. *Czasopismo Techniczne*, 106(10, 2-A), 95-104.
- Oke, T.R. (1987). *Boundary Layer Climates*. London: Routledge.
- Pancewicz, A. (2003). Rola rzek w rozwoju przestrzennym historycznych miast nadrzecznych. W: *Woda w przestrzeni przyrodniczej i kulturowej*. Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego, T. II, 275-285.
- Park, C.Y., Lee, D.K., Asawa, T., Murakami, A., Kim, H.G., Lee, M.K., & Lee, H.S. (2019). Influence of urban form on the cooling effect of a small urban river. *Landscape and Urban Planning*, 183, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.022>
- Stewart, I.D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31(2), 200-217.
- Studium Uwarunkowań i Kierunków Zagospodarowania Przestrzennego m.st. Warszawy ze zmianami (SUiKZP). (2006). Ujednoliconą formą Załącznika Nr 1 do Uchwały Nr LXXXII/2746/2006 Rady m.st. Warszawy z dnia 10.10.2006 r. z wyróżnieniem zmian. Pobrane z: https://www.bip.warszawa.pl/dokumenty/radamiasta/uchwaly/2018-2023/1611_uch_zal_1_tekst_studium.pdf (01.03.2023).
- Szulczewska, B., Giedych, R., Borowski, J., Kuchcik, M., Sikorski, P., Mazurkiewicz, A., & Stańczyk, T. (2014). How much green is needed for a vital neighbourhood? In search for empirical evidence. *Land Use Policy*, 38, 330-345. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.11.006>
- Szymanowski, M. (2004). Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu. *Acta Universitatis Wratislaviensis, Studia Geograficzne*, 77.
- Tsichritzis, L., & Nikolopoulou, M. (2019). The effect of building height and façade area ratio on pedestrian wind comfort of London. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 191, 63-75. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.05.021>
- Wang, Y., Ouyang, W., Zhan, Q., & Zhang, L. (2022). The Cooling Effect of an Urban River and Its Interaction with the Littoral Built Environment in Mitigating Heat Stress: A Mobile Measurement Study. *Sustainability*, 14(18), 11700. <https://doi.org/10.3390/su141811700>
- Wawer, J. (1997). Miejska wyspa ciepła w Warszawie. W: M. Stopa-Boryczka (red.), *Nowe metody badań klimatu Polski*, Prace i Studia Geograficzne, 20, 145-197.
- Wrzesiński, D. (2010). Detekcja zmian reżimu hydrologicznego Warty w profilu Poznania w latach 1822-2005. W: D. Wrzesiński (red.), *Odpływ rzeczny i jego regionalne uwarunkowania* (s. 135-152). Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe.

- Xu, Y., Ren, C., Ma, P., Ho, J., Wang, W., Ka-Lun Lau, K., Lin, H., & Ng, E. (2017). Urban morphology detection and computation for urban climate research. *Landscape and Urban Planning*, 167, 212-224. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.06.018>
- Yu, Z., Yang, G., Zuo, S., Jørgensen, G., Koga, M., & Vejre, H. (2020). Critical review on the cooling effect of urban blue-green space: A threshold-size perspective. *Urban Forestry & Urban Greening*, 49, 126630. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126630>

Summary

Rivers flowing through cities and their valleys serve many functions, having also a special role in the amelioration of the urban climate. Within the city limits of Poland's capital city, Warsaw, the River Vistula flows over a distance of 31.5 km, in a valley of maximum width 2 km. The river is regulated and enclosed within flood embankments. Its left bank, in the districts of Śródmieście and Żoliborz especially, is high and partly built over with boulevards; while the right bank is low and natural, with sandy beaches and walking and cycling paths. Despite the long-term transformation, the Vistula Valley still has an extremely valuable role in the natural system. Most of it enjoys *Natura 2000* protection (from the points of view of flora, fauna and the Valley itself). While the Vistula Valley in Warsaw certainly constitutes the city's main and most effective area of ventilation and air regeneration, knowledge of its thermal conditions remains scant. That is somewhat paradoxical, given worldwide study of urban climate since the 1830s, with considerable urban-focused interest among Polish climatologists also not leading to much elucidation of the river-valley climate within the city.

With a view to rectifying that situation, air-temperature monitoring was commenced with in 2016, at 3 points, i.e. in the south of the city (at the Oczyszczalnia measurement station), in the city centre on the left bank (at Dobra), and in the north on the right bank of the river (at Nowodwory). This article offers analysis of 10-minute data from the 6 years 2017-2022, in regard to sites in the Vistula Valley compared and contrasted with stations operated since 2006 in the very centre of the city (Hoża), and on its outskirts (Kobiałka). In so doing, this paper is the first to address thermal differences in the Vistula Valley in the area of Warsaw (Fig. 1).

All the sites around measurement stations were described by the most-common urban indicators, such as Floor Area Ratio, Ratio of Biologically Active Areas, Maximum and Mean Building Height and Sky View Factor (Plates 1 and 2, Table 1).

The general thermal characterisation of the Vistula Valley on the above basis includes: average values (contrasting the warmest site – Dobra – with a yearly air-temperature average of 11.3°C, with the coolest – Oczyszczalnia – 10.2°C), thermally characteristic days, the frequency of occurrence of minimum-temperature differences and differences in 10-minute values between the city centre (Hoża) and other stations, and examples of summer and winter courses for air temperature (Table 2, Fig. 3).

While the northern and southern parts of the Valley in its Warsaw section are found to be characterised by the same average daily air-temperature amplitude (of 8.6°C), the value at Dobra (presumably due to its higher intensity of development and large surrounding asphalt surface) is significantly lower by 0.8°C. Equally, hot and very hot days are noted most often at the Dobra site, surrounded as it is by artificial surfaces, but also expe-

riencing more-limited horizon limitation than the Hoża site, as situated in a small shaded yard surrounded by tall houses. The number of hot days is the lowest to be observed among the places analysed. The greatest differences between sites thus reflect the process of cooling of an area, rather than warming, ensuring that minimum air temperature differentiates the sites most, especially in the period from June through to September. When it comes to frosty days at the valley station in the city centre (Dobra) – there are just half or even a quarter as many of these as there are in other parts of Valley (Fig. 4).

Differences in T_{min} between the Hoża (city-centre) station and stations located in the Valley reached: -11.8°C (Oczyszczalnia – March 5, 2018), -8.6°C (Nowodwory – March 22, 2022), -8.9°C (Dobra – March 5, 2018), and -12.1°C in relation to the north-eastern outskirts of the city (Kobiałka – March 5, 2018) (Fig. 5).

Taking into account the differences of all measured 10-minute values at stations in the Vistula Valley and suburbs as set against those measured within the area of contiguous and intensive urban construction, the frequencies of occurrence of differences exceeding 1°C were 40% in the southern part of the Valley (Oczyszczalnia), 17.5% (for the left bank in the centre), 43% (for the northern part of the Valley represented by the Nowodwory station) and 47.7% (in the case of the northern outskirts of Warsaw). To further exemplify thermal differences between stations, reference was also made to graphs of average hourly air temperature during hot and cold 5-day periods (Fig. 7).

This paper also turns its attention to the phenomenon of so-called “cold spots” (Fig. 8). The frequency with which these arose in the immediate vicinity of the Vistula exceeded 88% of analysed thermal images in some cases. Through every site it proved possible to define profiles connecting the range of occurrence of “cold spots” with high frequency of occurrence on both sides of the river. The range of “cold spots” in the city centre was smallest, while the range in the southern part of the Valley was widest, and that in the north the most asymmetrical (729 metres on the left bank of the river and only 209 on the right).

Through the work carried out it proved possible to demonstrate differences in the thermal regime in Warsaw’s Vistula Valley, depending on the location and the immediate vicinity of the studied point. The amplitude in average daily air temperature is lower where density of buildings is greater, and where the ratio for the presence of biologically active areas is lower. The northern and southern parts of the Valley in Warsaw are characterised by similar thermal conditions, while the downtown part differs clearly from these places, being much warmer, but also much more likely to play host to the “cold spot” phenomenon.

The research presented here will be continued, and augmented by statistical analysis *vis-à-vis* the impact on air temperature of urbanisation indicators characterising the vicinity of stations. It is also intended for the aforementioned “cold-spot” phenomenon to be examined in greater detail.