

ZRÓŻNICOWANIE TEMPERATURY POWIETRZA WEWNĄTRZ PARKU MIEJSKIEGO NA PRZYKŁADZIE PARKU LOTNIKÓW POLSKICH W KRAKOWIE

Differentiation of air temperature inside an urban park on the example of the Polish Aviators' Park (Park Lotników Polskich) in Cracow

KATARZYNA WRONA¹ 

Zarys treści. Zróźnicowanie temperatury powietrza w obrębie terenów zieleni miejskiej jest zagadnieniem stosunkowo rzadko poruszonym w literaturze przedmiotu. Celem niniejszego opracowania było częściowe uzupełnienie tej luki badawczej poprzez wykonanie własnych pomiarów klimatu lokalnego wewnątrz Parku Lotników Polskich w Krakowie. Dane pomiarowe obejmujące temperaturę powietrza gromadzono w obrębie pięciu stanowisk zlokalizowanych wewnątrz parku i jednego położonego w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Pozyskano je dla wybranych 18 dni radiacyjno-insolacyjnych oraz 12 dni ze znacznym stopniem zachmurzenia i słabym wiatrem z okresu od maja do września 2020 roku. Wyniki pokazują, iż wnętrze parku, gdzie występują gęstsze skupiska drzew, różni się pod względem mikroklimatycznym od strefy zewnętrznej parku, w której dominującą formą pokrycia terenu jest roślinność niska. Podczas dni pogodnych należy oczekiwać różnicy temperatury powietrza między stanowiskiem referencyjnym (zewnętrznym) a roślinnością wysoką wynoszącej średnio 1°C, a między stanowiskiem referencyjnym a roślinnością niską – około 0,5°C. W porze dziennej większe zróźnicowanie termiczne występowało między parkiem a jego otoczeniem, podczas gdy w porze nocnej rosły kontrasty w obrębie samego parku z uwagi na intensywne wychładzanie odsłoniętych powierzchni porośniętych trawą.

Słowa kluczowe: zieleń miejska, parki, klimat miasta, temperatura powietrza, Kraków

Abstract. Differentiation of air temperature within urban green areas is an issue relatively rarely discussed in the literature. The aim of this study was to partially fill this research gap by taking our own measurements of the local climate inside the Polish Aviators' Park (Park Lotników Polskich) in Cracow. Measurement data regarding air temperature was collected at five points located inside the park and one in the park's immediate vicinity. The sample period comprised of 18 days with high radiation and insolation and 12 days with a significant degree of cloud cover and weak wind, from May to September 2020. The results show that the interior of the park, where denser tree cover is present, differs in terms of microclimate from the exterior of the park, where low vegetation prevails. On sunny days, the air temperature differences were estimated to be on average 1 °C between the reference site (outside the park) and high vegetation and about 0.5 °C between the reference site and low vegetation. During the day, a greater thermal difference was noted between the park and its surroundings, while at night the contrasts became more pronounced within the park itself due to the intense cooling of the exposed grassy areas.

Key words: urban greenery, parks, urban climate, air temperature, Cracow

Wprowadzenie

Problem melioracji klimatu miasta za pośrednictwem terenów zieleni jest niezwykle ważny i aktualny. W związku ze zmianami klimatu, postępującymi obecnie w tempie szybszym niż sądzono jeszcze parę lat temu (IPCC 2021) oraz całym

szeregiem zjawisk, które zachodzą w przestrzeni miejskiej (m.in. dogęszczanie zabudowy i wzrost udziału powierzchni uszczelnionych, *urban sprawl*, czyli niekontrolowane rozrastanie się powierzchni miast, ogromne zużycie surowców i energii oraz generowanie znacznych ilości zanieczyszczeń) (Karaczun 2020; Kleszcz 2020), zapewnienie komfortu termicznego mieszkańcom

¹ Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków; e-mail: ka.wrona@doctoral.uj.edu.pl, ORCID: 0000-0002-3695-2447

miast już dziś stanowi poważne wyzwanie, z którym muszą mierzyć się władze lokalne, urbaniści oraz planiści przestrzenni. Zagadnienie to dotyczy również Polski – już około 60% populacji kraju zamieszkuje miasta (GUS 2021), a zjawiska wywołane przez zmiany klimatu, takie jak: wzrost częstości występowania dni gorących i upalnych, nocy tropikalnych, jak również fal upałów (Sulikowska i in. 2016; Graczyk i in. 2017), ulegają spotęgowaniu na terenach zurbanizowanych poprzez efekt miejskiej wyspy ciepła (MWC). Wykorzystywanie zieleni do walki z MWC i przegrzewaniem miast jest rozwiązaniem posiadającym szereg zalet, wynikających nie tylko z jego skuteczności, ale również ze względnie niskich kosztów wdrożenia oraz licznych dodatkowych korzyści: estetycznych, krajobrazowych i ekosystemowych (Szczepanowska 2015). Celem niniejszego opracowania jest ukazanie, jakie warunki termiczne panują w obrębie stosunkowo dużego i zwartej przestrzennie terenu zielonego, jakim jest Park Lotników Polskich w Krakowie.

Zieleń miejska a klimat miasta

Problematyka oddziaływania zieleni miejskiej na lokalne warunki klimatyczne w ostatnich latach stała się przedmiotem wzmoczonego zainteresowania w literaturze zagranicznej. Knight i in. (2021) dowiedli, iż liczba publikacji poruszających zagadnienie temperatury panującej w obrębie parków miejskich oraz wpływu zieleni w mieście na klimat i atmosferę wyraźnie wzrosła po 2013 roku i od tamtej pory utrzymuje się na poziomie około 30 nowych opracowań rocznie (nie wprowadzono ograniczenia co do kraju i języka publikacji). Średni „efekt termiczny terenów zieleni”, czyli wpływ zieleni miejskiej na redukcję temperatury powietrza (zazwyczaj rozpatrywany w relacji wnętrze-krawędź terenu zielonego lub mierzony w niewielkiej odległości od terenu zieleni), jest szacowany przez różnych autorów na: 0,94°C w dzień i 1,15°C nocą (Bowler i in. 2010), 0,5°C w ciągu doby (Giannakis i in. 2016) lub 0,78°C w ciągu doby (Knight i in. 2021). W kwestii temperatury radiacyjnej powierzchni (ang. *Land Surface Temperature* – LST), efekt termiczny terenów zieleni przybiera wartości podobne lub wyższe niż w odniesieniu do temperatury powietrza. Cao i in. (2010 za Aram i in. 2019) efekt ten oszacowali średnio na 1,16°C w porze letniej, Yu i in. (2017) na 1,78°C, a Du i in. (2017) na 3,02°C. Ponadto, Skelhorn i in. (2014) ustalili,

iż w warunkach klimatycznych Manchesteru, zwiększenie powierzchni zajmowanej przez roślinność o dodatkowe 5% terenu porośniętego starodrzewiem może skutkować obniżeniem temperatury powierzchni o 1,0°C.

W literaturze polskiej, tematyka wzajemnych interakcji między zielenią miejską a lokalnym mikroklimatem jest poruszana w publikacjach naukowych zdecydowanie rzadziej. Najwięcej tego typu opracowań powstawało w naszym kraju w ostatnich trzech dekadach XX wieku (np. Wójcicka 1971; Okołowicz, Kossowska 1974; Bednarek 1979, 1984; Makowiec 1981; Lewińska i in. 1982, 1990, 1995; Kopacz-Lembowicz i in. 1984 za Czerwieniec, Lewińska 2000; Olszewski 1978; Martyn 1978; Kossowska-Cezak 1983). Współcześnie, dość licznie powstają prace dotyczące korzyści płynących z posiadania terenów zielonych w mieście, w tym również korzyści klimatycznych (np. Bartnicka, Ullman 2009; Szumacher 2011; Szczepanowska 2015; Trzaskowska (red.) 2017), lecz niewiele prowadzi się badań empirycznych w tym zakresie. Przykładami współczesnych opracowań opartych na danych pomiarowych są prace magisterskie powstałe w Zakładzie Klimatologii Uniwersytetu Jagiellońskiego (Bobrowicz 2007; Czastkiewicz 2007; Rusin 2007; Strzelec 2007), wykorzystujące wyniki zebrane w ramach projektu „Wpływ struktury zieleni miejskiej na warunki klimatyczne”, koordynowanego przez Pawła Jezioro.

Na podstawie badań, które zostały przeprowadzone, można wysnuć wnioski, iż dzienne nagrzewanie się terenów parkowych, zwłaszcza tych cechujących się znacznym udziałem roślinności niskiej, postępuje w wielu przypadkach szybciej niż w terenie zabudowanym, a nocne ochładzanie jest silniejsze – co przyczynia się do zwiększenia dobowych amplitud temperatury powietrza wśród zieleni względem innych terenów w mieście. Natomiast średnia dobowa temperatura powietrza w przyziemnej warstwie powietrza wewnątrz terenu zielonego ulega obniżeniu, przede wszystkim wskutek wspomnianych już nocnych wychłodzeń (Czerwieniec, Lewińska 2000). Prawidłowość ta dotyczy jednak przede wszystkim porównania parków i terenów zabudowy – natomiast betonowe powierzchnie płaskie, jak place czy parkingi, będą odznaczały się jeszcze większymi dobowymi kontrastami termicznymi niż ma to miejsce w przypadku trawników. Istotna jest również wielkość terenu zielonego. Olszewski (1978) wykazał, że w godzinach przedpołudniowych wyższą temperaturą powietrza na wysokości 0,25 m n.p.g. oraz 1,5 m n.p.g. odznaczał się trawnik większy

(3000 m²), a po południu – trawnik mniejszy (1300 m²).

Odmienne wpływy na warunki mikroklimatyczne wykazują parki o zwartym zadrzewieniu, przypominające w swej strukturze las. Ich oddziaływanie polega w głównej mierze na zmniejszeniu kontrastów termicznych w ich wnętrzu względem otoczenia (Czerwieniec, Lewińska 2000; Wrona 2020). Różnice w rocznych amplitudach temperatury powietrza pomiędzy sąsiedztwem zadrzewionego parku a jego strefą wewnętrzną mogą sięgać 1°C, a ich główną przyczynę stanowi niższa temperatura maksymalna w obrębie terenu zielonego (Martyn 1978). Ustalono też, że najbardziej sprzyjające warunki do obniżania temperatury powietrza przez zielen występują w cieplej połowie roku, szczególnie latem (Bokwa 2010).

Na podstawie przedstawionych wyników badań można wnioskować, że roślinność niska i roślinność wysoka zupełnie inaczej reagują na dobowe i roczne zmiany temperatury powietrza, przez co wykazują się odmiennymi prawidłowościami mikroklimatycznym. Jednak, poza wspomnianymi pracami magisterskimi wykorzystującymi dane z projektu „Wpływ struktury zieleni miejskiej na warunki termiczne”, które dość ogólnie opisują różnice występujące pomiędzy stanowiskami reprezentującymi różne typy roślinności w parku, niewielu specjalistów podejmowało dotychczas badania w tym zakresie.

Stosunkowo nieliczne opracowania opisują też pionowy gradient temperatury powietrza w zbiorowisku roślinnym oraz podejmują problematykę temperatury koron drzew. Szczególne zasługi dla tej dziedziny klimatologii w Polsce ma Obrębska-Starkel (m.in. 1965, 1970, 1973, 2001, 2002), która przez wiele lat zajmowała się analizowaniem interakcji między roślinnością a klimatem w sąsiedztwie dawnej stacji Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Gaiku-Brzezowej. Wyniki badań wspomnianej Autorki wskazują, że w zależności od pory roku i stopnia ulistnienia należy wyróżniać na terenach leśnych dwie powierzchnie czynne: pierwotną, a więc dno lasu, oraz wtórną, czyli górną powierzchnię koron zbiorowiska. Wynika to z faktu, iż w fazie pełnego ulistnienia górna powierzchnia koron drzew zatrzymuje zdecydowaną większość (nawet do 80%) krótkofalowego promieniowania słonecznego. W wyniku tego zjawiska, temperatura powietrza warstwy przygruntowej wewnątrz zbiorowiska roślinnego, temperatura strefy koron drzew oraz temperatura ponad koronami mogą się znacznie od siebie różnić.

Badania zrealizowane m.in. przez Wilczyńskiego i Durło (2003) czy Kolendowicza i Bednorz (2010) wskazują, iż to w obrębie samych koron drzew oczekiwać należy najwyższej temperatury powietrza w całym pionowym przekroju zbiorowiska. Zróźnicowanie między temperaturą w obrębie koron a powyżej i poniżej nich jest szczególnie widoczne podczas dni z pogodą radiacyjno-insolacyjną. W porze nocnej najniższą temperaturą powietrza cechują się dolne, przygruntowe partie lasu, z kolei w godzinach popołudniowych najchłodniejszą częścią zbiorowiska są górne partie koron drzew.

Położenie powierzchni czynnej wtórnej zależy w głównej mierze od wysokości samych drzew, ich gatunków, jak również od zwartości zbiorowiska leśnego. Szczególnie to ostatnie kryterium jest pojęciem względnym, gdyż trudno zdefiniować precyzyjnie, czym jest zwarte zbiorowisko leśne. Wydaje się jednak, że Park Lotników Polskich w Krakowie, pomimo występowania w niektórych jego częściach dość gęstych skupisk roślinności wysokiej, nie może zostać za takowe uznany. Niemniej jednak, temperatura powietrza we wnętrzu formacji roślinności wysokiej występującej w parku nie może być także wprost porównywana z temperaturą powietrza mierzoną na otwartym terenie na standardowej wysokości, m.in. z uwagi na większe zacienienie czy spowalniającą rolę drzew w pionowej i poziomej wymianie ciepła z otoczeniem.

Dane i metody

W opracowaniu wykorzystano dane pomiarowe pochodzące z sześciu czujników typu Tree Talker (rys. 1), umieszczonych na pniach drzew, na wysokości około 3,5 m n.p.g., poniżej głównej części korony (tab. 1; rys. 2A,B). Urządzenia pomiarowe umieszczono po zacienionej, północnej stronie pni. Dokonywały one pomiarów temperatury powietrza w interwałach godzinnych. Pięć stanowisk wyznaczono wewnątrz Parku Lotników Polskich w Krakowie – terenu zieleni miejskiej o powierzchni około 43 ha, położonego w dzielnicy administracyjnej XIV Czyżyny. Wybrane stanowiska to: „Wejście”, „Przerzedzenie”, „Kępa drzew”, „Gęstwina” i „Muzeum Lotnictwa” (rys. 3). Ostatni czujnik umieszczono w pasie zieleni przyulicznej biegnącym wzdłuż al. Pokoju, na kłonie zwyczajnym, w odstępnie około 10 m od jezdni i 5 m od asfaltowej ścieżki rowerowej



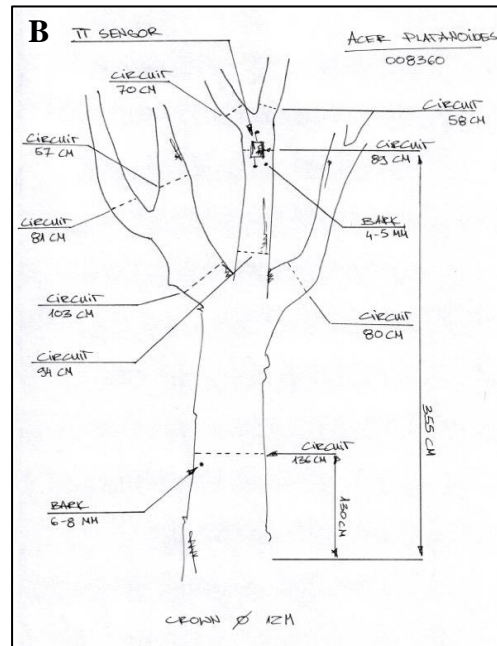
Rys. 1. Czujnik TreeTalker (fot. K. Wrona 2021)

The TreeTalker sensor

i betonowego chodnika. Odległość tego stanowiska od najbliższego czujnika zlokalizowanego wewnątrz parku to około 452 m od punktu „Wejście” (rys. 3).

Park Lotników Polskich jest terenem niejednolitym z punktu widzenia rodzaju i zwartości roślinności, która go porasta (rys. 4). W południowej części parku dominuje roślinność niska, a drzewa występują przede wszystkim w formie szpalerów wzdłuż alejek spacerowych. W obrębie jednego z nich, na pierwszym drzewie w rzędzie, mieścił się czujnik pomiarowy „Wejście”. W części środkowej, na północ od Tauron Areny Kraków i Ogrodu Doświadczeń im. S. Lema, pojawiają się coraz liczniejsze, lecz wciąż stosunkowo luźno rozmieszczone, skupiska drzew, a pomiędzy nimi znajdują się wolne przestrzenie porośnięte roślinnością niską. Wewnątrz jednego z takich zgrupowań drzew usytuowano stanowisko „Kępa drzew”, a leżący w pobliżu punkt „Przerzedzenie” jedynie od zachodu otaczała roślinność wysoka, natomiast od strony północnej i wschodniej dominowała roślinność niska. Część północna oraz wschodnia Parku Lotników Polskich jest natomiast tą, w obrębie której zagęszczenie drzew jest zdecydowanie największe. Niedaleko al. Jana Pawła II mieściły się stanowiska „Muzeum Lotnictwa” oraz „Gęstwina”, przy czym drugie z nich zlokalizowane było dalej na wschód i charakteryzowało się największą zwartością roślinności

wysokiej spośród wszystkich punktów pomiarowych. Gęstość zadrzewienia w obrębie Parku Lotników Polskich wzrasta zatem w przybliżeniu wzdłuż osi S-N (rys. 4).



Rys. 2. Przykładowe umieszczenie czujników na drzewach – stanowisko „Wejście” (A) oraz stanowisko „Al. Pokoju” (B) (fot. K. Wrona 2021)

Źródło rysunku: Zarząd Zieleni Miejskiej w Krakowie

The example of the TreeTalker sensor's placement on trees – “Wejście” measurement point (A) and “Al. Pokoju” measurement point (B)

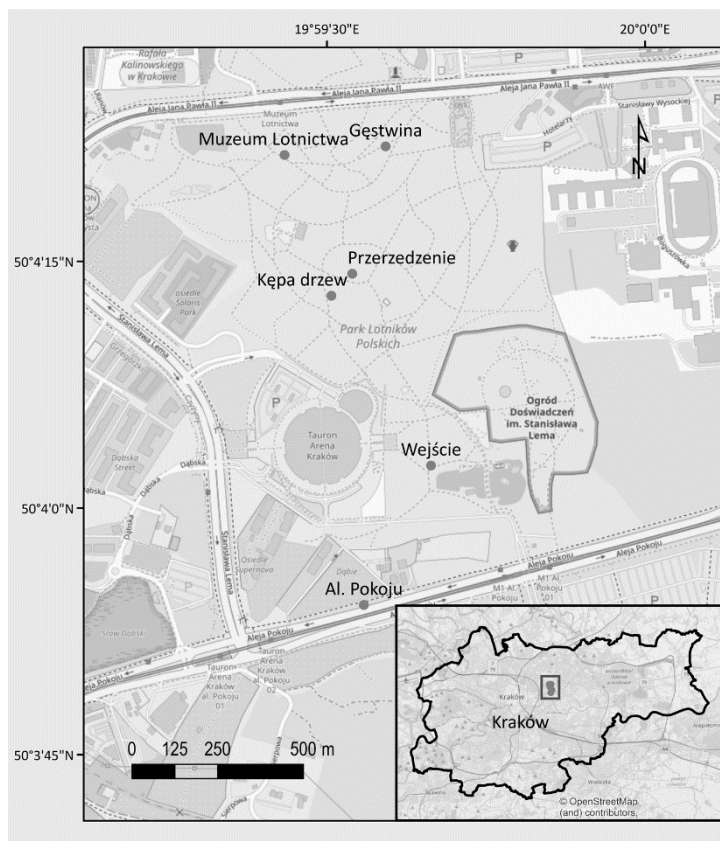
Graphic's source: Urban Greenery Management in Cracow

Tabela 1

Charakterystyka stanowisk pomiarowych i umieszczenia czujników TreeTalker
(źródło danych pomiarowych: projekt LIFE17 CCA/IT/000079 oraz Geoportal 2023)

Characteristic of the measurement points and the placement of the TreeTalker sensors
(data source: LIFE17 CCA/IT/000079 project and Geoportal 2023)

L.p.	Punkt pomiarowy/ Measurement point	Współrzędne geograficzne/ Geographical coordinates (WGS 84)	Wysokość/ Height [m n.p.m.]	Wysokość nad poziomem gruntu/ Height above the ground [m n.p.g.]	Gatunek drzewa/ Tree species	Szacunkowa wysokość drzewa/ Estimated height of the tree [m]
1.	Wejście	50° 03' 59'' N 19° 59' 40'' E	200	3,5	Klon zwyczajny	10–15
2.	Przerzedzenie	50° 04' 14'' N 19° 59' 32'' E	205	3,5	Kasztanowiec zwyczajny	10–15
3.	Kępa drzew	50° 04' 13'' N 19° 59' 30'' E	205	3,5	Klon zwyczajny	10–15
4.	Gęstwina	50° 04' 21'' N 19° 59' 26'' E	211	3,5	Kasztanowiec zwyczajny	25–30
5.	Muzeum Lotnictwa	50° 04' 22'' N 19° 59' 36'' E	209	3,5	Kasztanowiec zwyczajny	15–20
6.	Al. Pokoju	50° 03' 54'' N 19° 59' 33'' E	201	3,5	Klon zwyczajny	10–15



Rys. 3. Rozmieszczenie stanowisk pomiarowych
(źródło danych pomiarowych: projekt LIFE17 CCA/IT/000079; podkład: Open Street Map)

Localization of measurement points
(data source: LIFE17 CCA/IT/000079; base map: Open Street Map)



Rys. 4. Rozmieszczenie drzew (ciemne kropki) w Parku Lotników Polskich w Krakowie. Krzyżykami oznaczono lokalizację stanowisk pomiarowych (Life URBANGREEN Kraków 2023; podkład: Open Street Map)

Location of trees (dark dots) in Polish Aviators' Park in Cracow. Crosses represent the measurement points (Life URBANGREEN Cracow 2023; base map: Open Street Map)

Administratorem sieci pomiarowej, w ramach której funkcjonowały wyżej wymienione czujniki, jest Zarząd Zieleni Miejskiej w Krakowie. Sieć powstała w ramach projektu LIFE URBANGREEN „Innowacyjna platforma technologiczna usprawniająca zarządzanie terenami zielonymi w celu lepszej adaptacji do zmian klimatu”, współfinansowanego z programu Life Unii Europejskiej (nr projektu LIFE17 CCA/IT/000079), realizowanego w formie pilotażu w Krakowie i Rimini (Włochy) we współpracy z Uniwersytetem w Mediolanie. Informacje ze stanowisk pomiarowych pozyskano dla wybranych 18 dni radiacyjno-insolacyjnych (R-I), jak również 12 dni o znacznym zachmurzeniu i słabym wietrze (Z-S), wyznaczonych w okresie 01.05.2020–30.09.2020 roku. Pierwszą z tych grup tworzą dni, podczas których obserwowane zachmurzenie było niewielkie lub nie występowało i towarzyszyła mu niewielka prędkość wiatru lub cisza atmosferyczna (dni R-I wyselekcjonowane do badania: 13.06., 01.07., 05.07., 10.07., 14.07., 30.07., 02.08., 08.08., 09.08., 12.08., 13.08., 09.09., 11.09., 12.09., 14.09., 15.09., 21.09., 22.09.). Taki typ pogody najbardziej sprzyja powstawaniu różnic mikroklimatycznych, gdyż dzienne usłonecznienie jest wówczas wysokie, a każda powierzchnia czynna ogrzewa się i ochładza indywidualnie (Paszyński 1980; Korzeniowski i in. 2001). Z kolei 12 dni pochmurnych wybrano, aby sprawdzić, czy w warunkach znacznego zachmurzenia (lecz przy zachowaniu kryterium reprezentatywności temperatury powietrza

mierzonej w określonym miejscu dla konkretnego typu powierzchni czynnej), wpływ zieleni miejskiej na mikroklimat jest dostrzegalny (dni Z-S wyselekcjonowane do badania: 30.05., 31.05., 08.06., 09.06., 10.06., 14.06., 15.06., 16.06., 13.07., 05.08., 06.09., 17.09.). Szczegółowe kryteria doboru dni R-I oraz Z-S zostały zawarte w Załączniku 1 i 2. Selekcja poszczególnych dni opierała się także na uwzględnieniu kompletności wyników pomiarów, jednak pomimo to, wybrane dni R-I oraz Z-S nie były całkowicie wolne od luk w seriach czasowych (tab. 2). Dane pomiarowe analizowano przede wszystkim z wykorzystaniem oprogramowania MsExcel (wersja Professional Plus 2016), w programie tym przygotowano również wykresy. Prezentacje kartograficzne wykonano w programie ArcGIS firmy ESRI (wersja 10.8.1).

Wyniki

Dni radiacyjno-insolacyjne

W dniach R-I, średnio najwyższa temperatura powietrza została zmierzona na stanowisku „Przedziedzenie” – wynosiła 22,5°C. Należy jednak pamiętać o znacznej liczbie braków dotyczących pomiarów prowadzonych w tym punkcie (tab. 2), obejmujących m.in. wszystkie dni we wrześniu, kiedy to wartości temperatury powietrza notowane na pozostałych stanowiskach były wyraźnie

Tabela 2

Kompletność danych pomiarowych
Measurement data's completeness

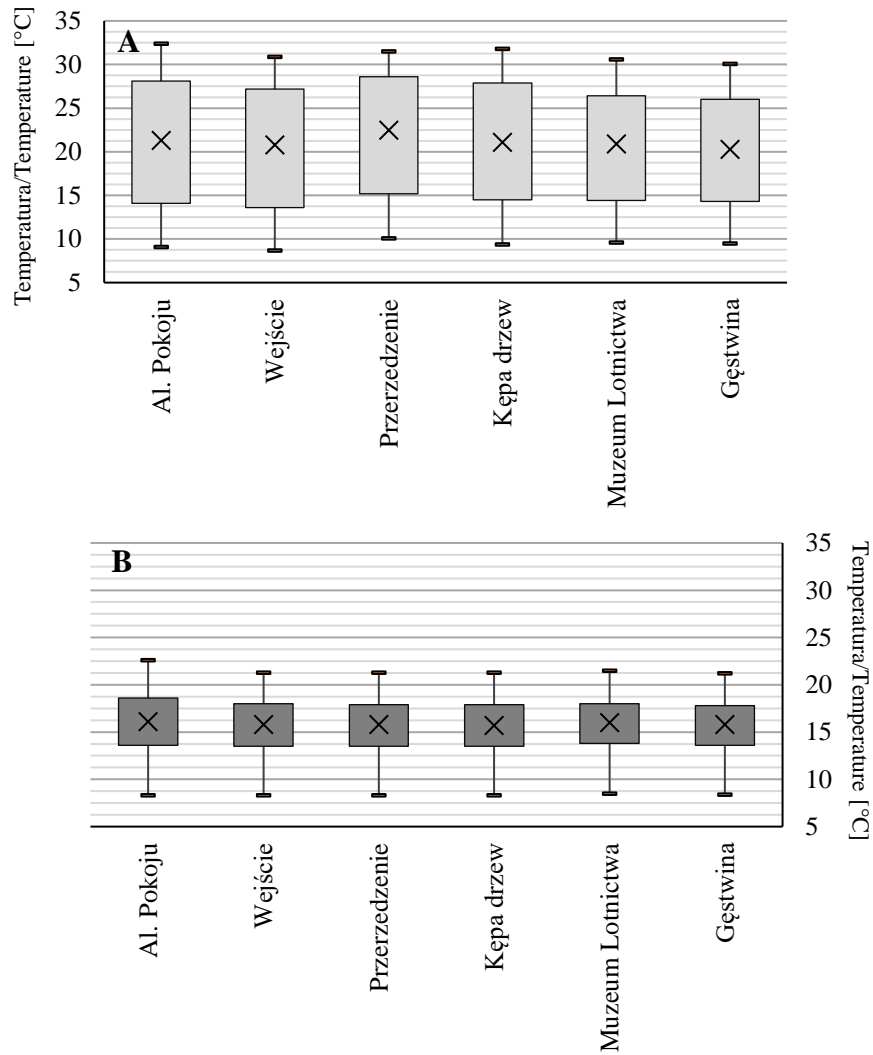
L.p.	Punkt pomiarowy/ <i>Measurement point</i>	Kompletność – dni R-I/ <i>Completeness – R-I days</i>	Kompletność – dni Z-S/ <i>Completeness – Z-S days</i>
1.	Wejście	97%	100%
2.	Przerzedzenie	59%	83%
3.	Kępa drzew	89%	100%
4.	Gęstwina	100%	100%
5.	Muzeum Lotnictwa	83%	100%
6.	Al. Pokoju	99%	99%

niższe niż w innych miesiącach. Wyłączając punkt „Przerzedzenie”, najwyższą temperaturę powietrza odnotowano na stanowisku „Al. Pokoju” – wynosiła 21,3°C. Najniższa wartość średniej temperatury powietrza dotyczyła natomiast punktu „Gęstwina” (20,3°C). Z uwagi na fakt, iż stanowisko „Gęstwina” mieściło się w głębi parku, w obrębie najbardziej zwartych skupisk drzew, można stwierdzić, że różnica w warunkach termicznych między wnętrzem parku a jego krawędzią osiągała średnio podczas wybranych dni R-I okresu badawczego 1,0°C. Z kolei pomiędzy punktem „Al. Pokoju” a strefą parku porośniętą w przeważającej mierze roślinnością niską, reprezentowaną przez stanowisko „Wejście”, różnica ta była dwukrotnie niższa i wynosiła około 0,5°C.

Gęsto zadrzewioną strefę wewnętrzną Parku Lotników Polskich cechowały też wyraźnie mniejsze kontrasty termiczne niż notowane w obrębie pozostałych stanowisk. Absolutna amplituda temperatury powietrza podczas dni R-I wynosiła na stanowisku „Gęstwina” 20,6°C, a amplituda średnich wartości temperatury maksymalnej (t_{max}) i minimalnej (t_{min}) z 18 analizowanych dób osiągnęła 11,7°C. Na stanowisku „Al. Pokoju” miary te przybierały odpowiednio 23,3°C oraz 14,0°C. W pozostałych punktach, wartości mieściły się pomiędzy tymi dwiema skrajnościami. Jeśli chodzi o średnie amplitudy, to w obrębie stanowisk „Al. Pokoju”, „Wejście”, „Przerzedzenie”

oraz „Kępa drzew” nie odbiegały one od siebie znacząco, mieszcząc się w przedziale o rozpiętości 0,6°C. Dopiero między stanowiskami „Kępa drzew” a „Muzeum Lotnictwa” i „Gęstwina” różnice stawały się większe. Spadek wartości między „Kępą drzew” a „Muzeum Lotnictwa” wynosił 1,4°C, a wartość w punkcie „Gęstwina” była o kolejne 0,3°C niższa (rys. 5A). Oznacza to, iż w częściach południowej i środkowej parku, które odznaczają się niewielką gęstością zadrzewienia, zieleń tylko nieznacznie wpływała na łagodzenie kontrastów termicznych oraz na obniżanie średniej dobowej temperatury powietrza w miesiące. Natomiast część północna i północno-wschodnia, o bardziej zwartym drzewostanie, była wyraźnie odrębna mikroklimatycznie, zarówno względem otoczenia parku, jak i od tej jego części, w której dominuje pokrycie terenu przez roślinność niską.

Pomimo, iż stanowisko „Al. Pokoju” w dniach R-I odznaczało się największą średnią i absolutną amplitudą temperatury powietrza, to notowano tam jedynie absolutne oraz średnie najwyższe wartości t_{max} na obszarze badawczym. Najniższe wartości t_{min} zmierzone zostały natomiast na stanowisku „Wejście” (rys. 5A). Wynika stąd, iż miejsca odsłonięte, porośnięte przez roślinność niską, są spośród analizowanych typów użytkowania najsilniej podatne na intensywne wychłodzenia. Potwierdzają to średnie wartości temperatury powietrza w porze nocnej dni R-I (18:00–



Rys. 5. Zmienność temperatury powietrza na stanowiskach pomiarowych w dniach radiacyjno-insolacyjnych (R-I) (A) oraz dniach o znacznym zachmurzeniu i słabym wietrze (Z-S) (B).
 Objasnienia: prostokąt – górna krawędź: średnia temperatura maksymalna (t_{\max}) podczas wszystkich dni R-I (A) lub Z-S (B); dolna krawędź: średnia temperatura minimalna (t_{\min}) podczas wszystkich dni R-I (A) lub Z-S (B); krzyżyk – średnia temperatura powietrza podczas wszystkich dni R-I (A) lub Z-S (B); linie pionowe – rozpiętość między najwyższą t_{\max} (górny znacznik) a najniższą t_{\min} (dolny znacznik) zmierzoną podczas dni R-I (A) lub Z-S (B)

Variation of air temperature in measurement points during radiative-insolative days (A) and mostly cloudy days with low wind speed (Z-S) (B)

Explanations: rectangle – upper edge: mean maximum temperature (t_{\max}) measured during all R-I (A) or Z-S (B) days; lower edge: mean minimum temperature (t_{\min}) measured during all R-I (A) or Z-S (B) days; cross – daily mean air temperature during all R-I (A) or Z-S (B) days; vertical lines – range of values between highest t_{\max} (upper marker) and lowest t_{\min} (lower marker) measured during R-I (A) or Z-S (B) days

–05:00 UTC), które na tym stanowisku były najniższe w obrębie obszaru badawczego – o $0,5^{\circ}\text{C}$ niższe niż w punktach „Al. Pokoju” i „Gęstwina” oraz o $0,7^{\circ}\text{C}$ niższe w porównaniu do średniej ze wszystkich stanowisk. Z kolei najcieplejszym punktem w porze nocnej było stanowisko „Przerzedzenie”, a przy jego wykluczeniu (z uwagi na istotne braki w danych) – „Kępa drzew”. Wskazuje to na zahamowanie nocnego wychładzania

w miejscach, w których pionowy przepływ powietrza jest blokowany przez korony drzew i jego wzmocnienie tam, gdzie takiej blokady nie ma. Bardziej istotną rolę niż jej zwartość odgrywa tu sama obecność roślinności wysokiej.

W porze dziennej natomiast (06:00–17:00 UTC), na stanowisku „Wejście” było średnio o $0,7^{\circ}\text{C}$ chłodniej niż przy al. Pokoju, w punktach „Kępa drzew” i „Muzeum Lotnictwa” – o $0,8^{\circ}\text{C}$

chłodniej, a na stanowisku „Gęstwina” – aż o 1,9°C chłodniej względem punktu zlokalizowanego poza Parkiem Lotników Polskich. Sama obecność parku, czyli terenu zielonego, przyczyniała się już zatem do obniżenia średniej dziennej temperatury powietrza o niecały 1°C. Z kolei, miejsca porośnięte zwartą roślinnością wysoką cechowały się jeszcze wyraźniejszą odrębnością termiczną od otoczenia.

W przebiegu godzinowym, około 05:00 UTC następowało przejście między termicznym reżimem nocnym, wedle którego w punkcie „Gęstwina” notowano takie same lub nieco wyższe wartości temperatury powietrza, co na stanowisku „Al. Pokoju”, do reżimu dziennego, w którym to stanowisko poza obszarem parku stawało się tym cieplejszym. Szybko postępujące poranne nagrzewanie na mniej izolowanym od otoczenia stanowisku „Al. Pokoju” skutkowało wzrastaniem różnic w wartościach temperatury powietrza względem stanowiska „Gęstwina” aż do 08:00, kiedy to ulegały one stabilizacji na poziomie około 2,0–2,3°C. Takie różnice temperatury między wnętrzem parku a jego otoczeniem utrzymywały się aż do godziny 16:00. Wówczas rozpoczynał się proces intensywnego wychładzania przy al. Pokoju. Około godziny 20:00, temperatura powietrza na obu stanowiskach ulegała zrównaniu i od tego momentu w punkcie „Gęstwina” notowano wartości nieznacznie wyższe (rys. 6).

Bardzo podobne prawidłowości odnośnie przebiegu dobowego temperatury powietrza dotyczyły też punktu „Muzeum Lotnictwa”. Dane pomiarowe z tego czujnika pokazywały jedynie szybsze nagrzewanie i wyższe wartości temperatury powietrza w godzinach porannych, a między 07:00 a 09:00 – wręcz najwyższe w obrębie obszaru badawczego (wyłączając punkt „Przerzedzenie”) (rys. 6). Ta sytuacja wywołuje podejrzenia co do możliwego nieprawidłowego umieszczenia czujnika, który pomimo teoretycznej ekspozycji północnej, jest we wskazanych godzinach narażony na dopływ bezpośredniego promieniowania słonecznego. Na podstawie posiadanych danych, nie jest możliwe jednoznaczne wskazanie źródła zaburzeń w dobowym przebiegu temperatury powietrza. Jednak odchylenia w pomiarach na stanowisku „Muzeum Lotnictwa” dotyczą wyłącznie wskazanego dwugodzinnego przedziału czasowego, natomiast wartości notowane przez resztę doby nie budzą większych zastrzeżeń co do ich reprezentatywności.

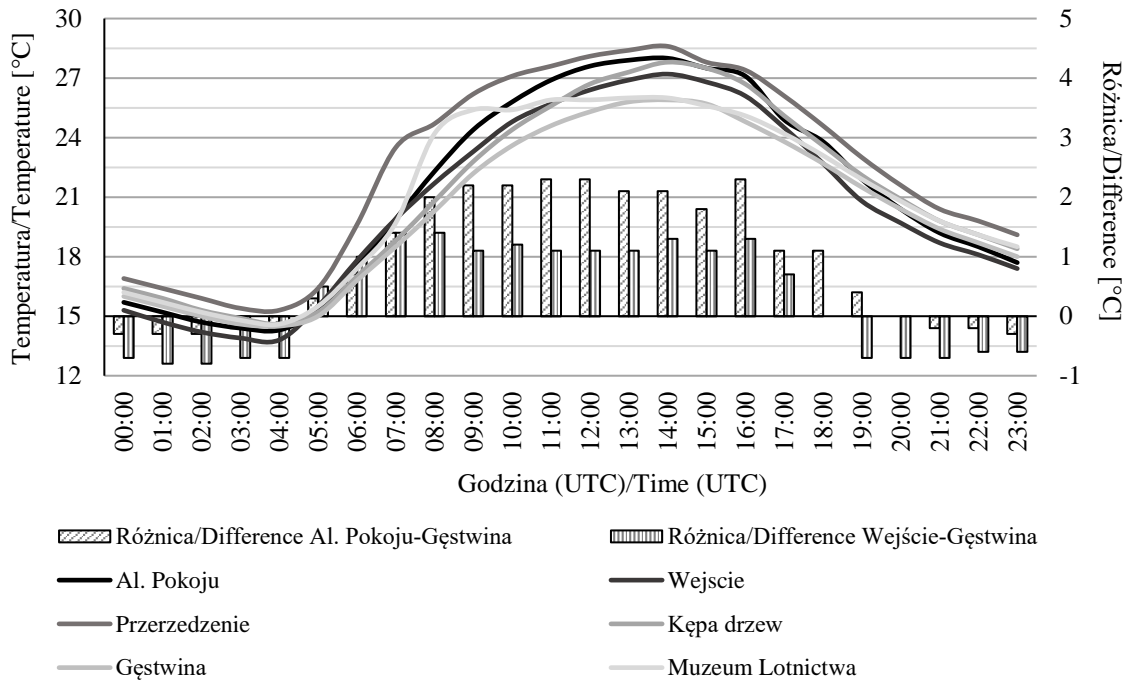
Wyraźnie niższe wartości temperatury powietrza niż w punktach „Al. Pokoju” czy „Gęst-

wina”, notowano nocą na stanowisku „Wejście”. Podobnie, jak w przypadku różnic między „Gęstwina” a „Al. Pokoju”, tak w odniesieniu do stanowisk „Wejście” i „Gęstwina” około 05:00 następowało przejście od nocnego reżimu termicznego do reżimu dziennego, charakteryzującego się niższymi wartościami temperatury powietrza mierzonymi w punkcie „Gęstwina”. Względnie wcześnie, ponieważ już około 06:00, następowała stabilizacja różnic na poziomie około 1,0–1,4°C. Takie rozbieżności utrzymywały się do godziny 16:00, natomiast o 18:00 wartości temperatury powietrza na obu stanowiskach ulegały wyrównaniu. Nocne różnice w wartościach temperatury powietrza między „Wejściem” a „Gęstwina” były średnio blisko dwa razy większe niż między „Al. Pokoju” a „Gęstwina”, natomiastienne – około dwa razy mniejsze. Ciekawym stanowiskiem z punktu widzenia dobowego przebiegu temperatury powietrza był punkt „Kępa drzew”, który w dzień pod względem warunków termicznych upodabniał się do punktu „Wejście”, natomiast w nocy przybierał wartości charakterystyczne raczej dla „Gęstwiny” i „Muzeum Lotnictwa” (rys. 6).

Dni ze znacznym zachmurzeniem i słabym wiatrem

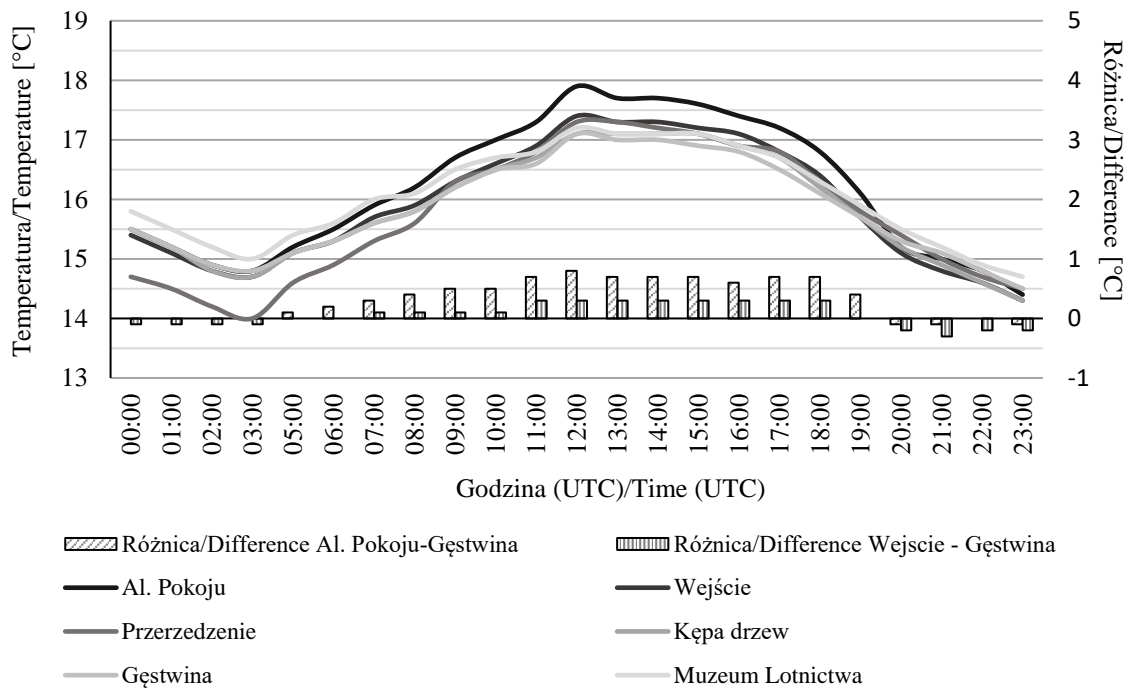
Podczas dni Z-S, obserwowane prawidłowości termiczne właściwie nie zmieniły się. Jedynie amplitudy i różnice między poszczególnymi punktami uległy zmniejszeniu względem tych, notowanych podczas dni R-I. Najwyższą średnią dobową temperaturą powietrza, jak i najwyższą amplitudą między t_{\max} a t_{\min} , odznaczał się punkt „Al. Pokoju”. Najmniejsze średnie oraz absolutne amplitudy temperatury powietrza odnotowano natomiast w punkcie „Gęstwina”, w tym pierwszym przypadku na równi ze stanowiskiem „Muzeum Lotnictwa”. Różnice w wartościach średniej dobowej temperatury powietrza w obrębie czterech stanowisk – „Wejście”, „Przerzedzenie”, „Kępa drzew” i „Gęstwina” – nie przekraczały 0,1°C. Uwzględniając wszystkie punkty pomiarowe, różnica ta wyniosła 0,4°C – była ona zatem o 0,6°C niższa niż w dniach R-I. Dostrzegalny jest znaczny spadek wartości t_{\max} oraz amplitud temperatury powietrza na wszystkich stanowiskach (rys. 5B).

Zarówno w porze dziennej (6:00–17:00 UTC), jak i nocnej (18:00–5:00 UTC), na wszyst-



Rys. 6. Dobowy przebieg temperatury powietrza w punktach pomiarowych oraz różnice między stanowiskami „Al. Pokoju” i „Gęstwina” oraz „Wejście” i „Gęstwina” podczas dni R-I

Diurnal course of air temperature in measurement points and differences between points “Al. Pokoju” and “Gęstwina” as well as “Wejście” and “Gęstwina” during R-I days



Rys. 7. Dobowy przebieg temperatury powietrza na stanowiskach pomiarowych oraz różnice między stanowiskami „Al. Pokoju” i „Gęstwina” oraz „Wejście” i „Gęstwina” podczas dni Z-S

Diurnal course of air temperature in measurement points and differences between points “Al. Pokoju” and “Gęstwina” as well as “Wejście” and “Gęstwina” during Z-S days

kich stanowiskach wewnątrz Parku Lotników Polskich notowano zazwyczaj niższą średnią temperaturę powietrza niż w punkcie „Al. Pokoju”. Wyjątek stanowił punkt „Muzeum Lotnictwa” w porze nocnej, nieznacznie cieplejszy (o 0,2°C) od kanionu ulicznego. Najwyższa różnica dotyczyła natomiast punktu „Gęstwina” i pory dziennej. W obrębie zwartej roślinności wysokiej temperatura powietrza była średnio o 0,6°C niższa niż na stanowisku „Al. Pokoju”. Zmierzone ochłodzenie było zatem ponad trzy razy słabsze niż podczas dni R-I, kiedy różnica w średniej dziennej temperaturze powietrza między tymi samymi stanowiskami wynosiła 1,9°C. W pozostałych punktach pomiarowych („Wejście”, „Przerzedzenie”, „Kępa drzew”) różnice wynosiły 0,4–0,5°C. To pokazuje, że podczas pogody pochmurnej, warunki termiczne wewnątrz samego parku stają się mniej zróżnicowane, a kontrasty między roślinnością wysoką i niską słabną – inaczej niż podczas pogody słonecznej, gdy struktura roślinności ma o wiele większe znaczenie dla termicznego różnicowania się terenów zielonych.

Dobowy przebieg temperatury powietrza w dniach Z-S był zbliżony na wszystkich stanowiskach. Wyróżniały się jedynie: „Al. Pokoju”, jako punkt wyraźnie cieplejszy od pozostałych w ciągu dnia, oraz „Przerzedzenie”, będące najchłodniejszym stanowiskiem obszaru badawczego w godzinach od 00:00 do 08:00 (rys. 7). W tym drugim przypadku, rozbieżności mogą wynikać częściowo z braków w danych pomiarowych (tab. 1), ale również stąd, że położenie punktu „Przerzedzenie” (podobnie jak w przypadku stanowiska „Wejście”) sprzyja kumulacji i stagnacji chłodu w porze nocnej. Usytuowane częściowo w cieniu drzew, ale eksponowane na tereny otwarte, otoczone przez luźne zgrupowania roślinności wysokiej, a ponadto położone na niższej wysokości bezwzględnej niż stanowiska w północnej części parku, otoczenie punktu „Przerzedzenie” mogło stać się naturalnym miejscem spływu i akumulacji chłodnego powietrza z terenów sąsiednich, jak również samo w sobie podlegało dość szybkiej radiacyjnej utracie ciepła z powodu niewielkiego przesłonięcia horyzontu.

Dyskusja i wnioski

Przeprowadzona analiza pozwala na wyciągnięcie wniosków dotyczących prawidłowości termicznych obserwowanych wewnątrz parku podczas

pogody radiacyjno-insolacyjnej, jak również w trakcie dni pochmurnych. Dowiedziono, że w obu tych grupach dni różnice w warunkach mikroklimatycznych między poszczególnymi stanowiskami pomiarowymi przybierają podobny kierunek, natomiast odbiegają od siebie pod względem notowanych wartości. Wyniki badań przeprowadzonych w ramach realizacji prezentowanego opracowania pozwalają na sformułowanie kilku wniosków:

- Podczas dni R-I różnica w średniej dobowej temperaturze powietrza między stanowiskiem zlokalizowanym przy ulicy poza parkiem (punkt „Al. Pokoju”) a gęsto zadrzewionym wnętrzem Parku Lotników Polskich (punkt „Gęstwina”) wynosiła 1,0°C. Podczas dni Z-S, analogiczna różnica była równa 0,3°C. Punkt „Al. Pokoju” był też przeciętnie najcieplejszym stanowiskiem na obszarze badawczym podczas dni R-I (po wykluczeniu punktu „Przerzedzenie”, z którego dane cechują liczne braki) i Z-S, natomiast punkt „Gęstwina” – najchłodniejszym w obu tych grupach dni;
- W odniesieniu do roślinności niskiej, reprezentowanej przez punkt „Wejście”, wartości średniej dobowej temperatury powietrza były o 0,5°C niższe podczas dni R-I i o 0,3°C niższe podczas dni Z-S niż na stanowisku „Al. Pokoju”;
- W obu grupach dni pomiarowych, w punkcie „Al. Pokoju” notowano największe amplitudy temperatury powietrza. Amplituda absolutna podczas dni R-I była o 9°C wyższa niż podczas dni Z-S (23,3°C względem 14,3°C). Najmniejsze amplitudy występowały z kolei w punkcie „Gęstwina” we wnętrzu parku. Różnica pomiędzy wartością amplitudy absolutnej na tym stanowisku w dniach R-I i Z-S osiągnęła 7,8°C (20,6 °C względem 12,8°C);
- W porze dziennej zróżnicowanie termiczne w obrębie parku było większe niż w porze nocnej. Największe różnice w wartościach temperatury powietrza w dzień występowały między parkiem a jego bezpośrednim otoczeniem, natomiast w nocy – między stanowiskami w parku reprezentującymi roślinność niską i wysoką. Różnice te były o wiele bardziej widoczne podczas dni R-I, kiedy w dzień średnia różnica między „Al. Pokoju” a „Gęstwina” wynosiła 1,9°C, podczas, gdy w dniach Z-S tylko 0,6°C;
- Dobowy przebieg temperatury powietrza na badanych stanowiskach w dniach R-I i Z-S wskazuje, że w porze nocnej najniższa tem-

peratura powietrza panowała w obrębie roślinności niskiej oraz rzadkich skupisk drzew, jednak po wschodzie słońca miejsca te nagrzewały się najszybciej w obrębie parku. Jednocześnie, wieczorem powietrze na tych stanowiskach dość szybko ulegało wychłodzeniu, podczas gdy w obrębie gęstszych zadrzewień zmiany temperatury powietrza przebiegały w wolniejszym tempie.

W literaturze przedmiotu występują znaczne rozbieżności w uzyskiwanych wynikach pomiarów i w szacunkach modelowych dotyczących warunków mikroklimatycznych panujących w obrębie terenów zieleni miejskiej. Wiąże się to z licznymi czynnikami modyfikującymi skalę oddziaływania terenów zieleni na klimat miasta. Najważniejszymi z nich są: lokalizacja obszaru badawczego (strefa geograficzna, typ klimatu), pora roku, warunki pogodowe, wielkość terenu zielonego, długość jego krawędzi, czyli złożoność kształtu, udział powierzchni sztucznych (drogi, chodniki) w odniesieniu do powierzchni pokrytych roślinnością, jak również obecność zbiornika wodnego, jako elementu zagospodarowania parku dodatkowo przyczyniającego się do redukcji temperatury powietrza i powierzchni w jego obrębie (Bowler i in. 2010; Aram i in. 2019; Knight i in. 2021).

Warto zauważyć, iż średnia różnica temperatury powietrza między wnętrzem a skrajem terenu zielonego, oszacowana w niniejszym opracowaniu na 1°C podczas dni R-I, mieści się w szerokich ramach wyznaczanych w dotychczasowych publikacjach. Należy jednak zwrócić uwagę, że metody badań zastosowane w każdej z prac nieco różniły się od siebie, stąd też porównania mają charakter względny. Dostrzeżone zostało opisywane przez innych autorów zjawisko silniejszego oddziaływania na temperaturę powietrza skupisk roślinności wysokiej względem roślinności niskiej, szczególnie w porze dziennej, kiedy to w obrębie zadrzewionej części parku obserwowano wyraźnie niższe wartości temperatury powietrza niż na pozostałych stanowiskach pomiarowych. Z kolei, różnica w średniej dobowej wartości temperatury powietrza między fragmentem parku pokrytym roślinnością niską a stanowiskiem referencyjnym, wynosząca około 0,5°C, jest zgodna z ustaleniami Kossowskiej-Cezak (1983), wedle której minimalna wielkość trawnika konieczna do wykształcenia się w jego obrębie strefy obniżonej temperatury powietrza to 0,3 ha. Obszar roślinności niskiej w otoczeniu punktu „Wejście” obejmuje natomiast około 16 ha.

Względnie nowym zagadnieniem, które dotąd nie było szerzej rozpatrywane w literaturze przedmiotu, są spostrzeżenia dotyczące różnic w wartościach temperatury powietrza nie tylko między parkiem a jego otoczeniem, ale również pomiędzy stanowiskami ulokowanymi w obrębie tego samego terenu zielonego, jednak reprezentującymi różne typy roślinności. Za wstępne opracowania w tym zakresie można uznać prace magisterskie obronione na Wydziale Geografii i Geologii Uniwersytetu Jagiellońskiego, które powstały w ramach projektu „Wpływ struktury zieleni miejskiej na warunki klimatyczne”, koordynowanego przez Pawła Jezioro (m.in.: Bobrowicz 2007; Cząstkiewicz 2007; Rusin 2007; Strzelec 2007). Wyniki przedstawione we wskazanych publikacjach opierały się na pojedynczych dniach pomiarowych rozłożonych w ciągu całego roku, dlatego trudno porównywać je z wynikami prezentowanymi w niniejszym artykule. Dowiedziono jednak intensywniejszego nagrzewania się powietrza nad poletkami pokrytymi roślinnością niską w okresie letnim w porze dziennej względem poletek otoczonych przez drzewa, a w porze nocnej – silnego wychładzania się miejsc porośniętych przez roślinność niską. Dnia 20 lipca 2006 roku, w porze dziennej (od 08:00 do 19:00 CEST) średnie różnice w nagrzewaniu się powietrza nad łąką w stosunku do powietrza pod koronami drzew wynosiły 1,6°C w Parku Jordana w Krakowie (Rusin 2007), ale tylko 0,1°C w Ogrodzie Botanicznym – gdyż tam w godzinach wieczornych trawnik uległ bardzo szybkiemu wychłodzeniu (Bobrowicz 2007). Z kolei, w Parku Lotników Polskich dzienna różnica między temperaturą powietrza w punkcie „Wejście” a temperaturą w punkcie „Gęstwina” w dniach R-I była równa 1,2°C. Potwierdzony został też szybki spadek temperatury powietrza w godzinach wieczornych nad roślinnością trawiastą, prowadzący do występowania na stanowisku „Wejście” w godzinach nocnych i wczesnoporannych najniższych wartości temperatury powietrza na obszarze badawczym.

Podsumowanie

Analiza zawarta w artykule miała na celu ukazanie zróżnicowania termicznego w obrębie terenu zielonego w zależności od charakteru i zwartości porastającej go pokrywy roślinnej. Przedstawiony został także wpływ parku na klimat lokalny miasta poprzez porównanie pomiarów wykonywanych

w obrębie terenu zielonego z pomiarami ze stanowiska referencyjnego, położonego poza granicami parku. Aby móc dokładniej prześledzić stosunki mikroklimatyczne panujące w parku, okres badawczy podzielono na dni cechujące się pogodą radiacyjno-insolacyjną (R-I), jak również dni odznaczające się znacznym stopniem pokrycia nieba przez chmury oraz niską prędkością wiatru (Z-S). Podczas tych pierwszych oczekiwano największych kontrastów termicznych między poszczególnymi stanowiskami, a wobec drugiej grupy zakładano mniejsze zróżnicowanie w wartościach temperatury powietrza.

Na podstawie analizy zgromadzonych danych pomiarowych ustalono, że podczas dni R-I należy spodziewać się dużych rozbieżności w warunkach termicznych między wnętrzem parku, porośniętym roślinnością wysoką, a jego otoczeniem (około 1°C) i nieco mniejszych między skrajem parku, gdzie dominowała roślinność niska, a otoczeniem (około 0,5°C). Zgodnie z przewidywaniami, podczas dni Z-S kontrasty te stawały się słabsze, szczególnie wewnątrz samego parku. To świadczy o tym, iż typ roślinności ma decydujące znaczenie w kształtowaniu warunków termicznych przede wszystkim podczas dni odznaczających się wysokim usłonecznieniem. Dostrzeżono też intensywne nocne wychłodzenia w obrębie roślinności niskiej, doprowadzające do tego, iż kontrasty termiczne wewnątrz samego parku w porze nocnej stawały się większe niż w relacji park–otoczenie. Niniejsza analiza przyczynia się do lepszego zrozumienia sposobu funkcjonowania miejskich terenów zielonych z punktu widzenia warunków mikroklimatycznych.

Podziękowania

Autorka opracowania składa serdeczne podziękowania Zarządowi Zieleni Miejskiej w Krakowie za udostępnienie danych pomiarowych zbieranych w ramach projektu LIFE URBANGREEN „Innowacyjna platforma technologiczna usprawniająca zarządzanie terenami zielonymi w celu lepszej adaptacji do zmian klimatu”, współfinansowanego z programu Life Unii Europejskiej (nr projektu LIFE17 CCA/IT/000079). Dane stanowią własność Gminy Kraków.

Literatura

- Aram F., Higuera García E., Solgi E., Mansournia S. 2019. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon* 5: 01339. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e01339.
- Bartnicka M., Ullman I. 2009. Wykorzystać wszystkie atuty zieleni. *Architecturae et Artibus* 2: 17-22.
- Bobrowicz M. 2007. Boddźcowość termiczno-wilgotnościowa w Ogrodzie Botanicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego na podstawie pomiarów mikroklimatycznych w 2006 roku (niepublikowana praca magisterska). Uniwersytet Jagielloński, Kraków.
- Bokwa A. 2010. Wieloletnie zmiany struktury mezoklimatu miasta na przykładzie Krakowa. IGiGP UJ, Kraków.
- Bowler D.E., Buyung-Ali L., Knight T.M., Pullin A.S. 2010. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97: 147-155. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.05.006.
- Cząstkiewicz A. 2007. Sezonowe zróżnicowanie warunków mikroklimatycznych w Parku Bednarskiego w Krakowie na podstawie pomiarów w 2006 roku (niepublikowana praca magisterska). Uniwersytet Jagielloński, Kraków.
- Czerwieniec M., Lewińska J. 2000. Zieleń w mieście. Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Warszawa.
- Du H., Cai W., Xu Y., Wang Z., Wang Y., Cai Y. 2017. Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing data. *Urban Forestry and Urban Greening* 27: 24-31. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.06.008.
- Geoportal. 2023. Geoportal Infrastruktury Informacji Przestrzennej. Online: https://mapy.geoportal.gov.pl/imap/Imgp_2.html?gpmmap=gp0 (data ostatniego dostępu: 24.03.2023).
- Giannakis E., Bruggeman A., Poulou D., Zoumides C., Eliades M. 2016. Linear Parks along Urban Rivers: Perceptions of Thermal Comfort and Climate Change Adaptation in Cyprus. *Sustainability* 8: 1023. DOI: 10.3390/su8101023.
- GUS. 2021. Główny Urząd Statystyczny. Rocznik Demograficzny. Online: <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/roczniki-statystyczne/rocz>

- niki-statystyczne/rocznik-demograficzny-2021,3,15.html (data ostatniego dostępu: 18.06.2022).
- Graczyk D., Pińskwar I., Choryński A., Szwed M., Kundzewicz Z.W. 2017. Wpływ fal upałów na zdrowie w największych polskich miastach. W: Z.W. Kundzewicz, H. Øystein, T. Okruszko (red.) *Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce*. Poznań: 199-212.
- IPCC. 2021. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Online: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf (data ostatniego dostępu: 10.06.2022).
- Karaczun Z. 2020. Miasta wobec kryzysu klimatycznego. Materiały konferencyjne XVI e-Konferencji Naukowo-Technicznej Zieleń miejska – naturalne bogactwo miasta pt. Miasto zieleni – miasto przyszłości, Toruń, 08.10.2020.
- Kleszcz J. 2020. Miejska przyroda zmniejszająca skutki kryzysu klimatycznego. O tym, jak silniejszy związek architektury z naturą może nas uratować w sytuacjach kryzysowych. Materiały konferencyjne XVI e-Konferencji Naukowo-Technicznej Zieleń miejska – naturalne bogactwo miasta pt. Miasto zieleni – miasto przyszłości, Toruń, 08.10.2020.
- Knight T. Prince S., Bowler D., Hookway A., King S., Konno K., Richter R.L. 2021. How effective is ‘greening’ of urban areas in reducing human exposure to ground-level ozone concentrations, UV exposure and the ‘urban heat island effect’? An updated systematic review. *Environmental Evidence* 10: 12. DOI: 10.1186/s13750-021-00226-y.
- Kolendowicz L., Bednorz E. 2010. Warunki mikroklimatyczne we wnętrzu boru sosnowego na Mierzei Łebskiej. *Badania Fizjograficzne, seria Geografia Fizyczna* A61: 157-168.
- Korzeniowski J., Trapp J.A., Wyszowski A. 2001. Problem granic typów topoklimatu w świetle wyników badań prowadzonych na Pojezierzu Kaszubskim. W: M. Kuchcik (red.) *Współczesne badania topoklimatyczne. Dokumentacja Geograficzna* 23: 153-162.
- Kossowska-Cezak U. 1983. Wpływ zieleni miejskiej na warunki termiczno-wilgotnościowe. *Prace i Studia Geograficzne*, 4: 55-67.
- Life URBANGREEN Kraków. 2023. *Tereny Zieleni. Park Lotników Polskich*. Online: <https://krakow.lifeurbangreen.eu/pl/green-ar-eas/#/district/947> (data ostatniego dostępu: 24.03.2023).
- Martyn D. 1978. Wpływ śródmiejskiego parku na warunki termiczno-wilgotnościowe powietrza (na przykładzie Ogrodu Saskiego w Warszawie. *Prace i Studia IG UW* 26: 37-80.
- Matuszko D. 2007. Usłonecznienie. W: D. Matuszko (red.), *Klimat Krakowa w XX wieku*. IGiGP UJ, Kraków: 87-97.
- Matuszko D. 2011. O problemach terminologicznych z zakresu zachmurzenia. Online: http://www.klimat.org.pl/pliki/terminologia_zachm.pdf (data ostatniego dostępu: 24.01.2022).
- Obrębska-Starkel B. 1965. Charakterystyka reżimu termicznego powietrza w lesie lipowym i jodłowym przy niektórych sytuacjach pogodowych. *Czasopismo Geograficzne* 36(3): 275-290.
- Obrębska-Starkel B. 1970. Wpływ zespołu Tilio-Carpinetum na stosunki termiczno-wilgotnościowe powietrza. *Folia Geographica, Series Geographica-Physica* 4: 103-127.
- Obrębska-Starkel B. 1973. Stosunki termiczne powietrza w przygruntowej warstwie w zespole Tilio-Carpinetum w Gaiku-Brzezowej. *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne* 32: 89-103.
- Obrębska-Starkel B. 2001. Wpływ zmian użytkowania ziemi w dolinie Raby na warunki termiczne zbiorowiska leśnego Tilio-Carpinetum. *Dokumentacja Geograficzna* 23: 59-73.
- Obrębska-Starkel B. 2002. Influence of the water reservoir on the transformation of the ecoclimate of the Foothill OakHornbeam forest Tilio-Carpinetum in Gaik-Brzezowa. W: B. Obrębska-Starkel (red.) *Topoclimatic and geocological changes in the Wieliczka Foothills in the surroundings of the Dobczyce Reservoir. Prace Geograficzne IGiGP UJ* 109: 111-197.
- Olszewski K. 1978. Rola trawników w kształtowaniu warunków termiczno-wilgotnościowych w mieście. *Prace i Studia IG UW. Klimatologia* 26(11): 93-115.
- Paszyński J. 1980. Metody sporządzania map topoklimatycznych. W: M. Kluge (red.) *Metody opracowań topoklimatycznych. Dokumentacja Geograficzna* (3): 13-28.
- Rusin E. 2007. Wpływ zieleni miejskiej na sezonowe zróżnicowanie warunków termiczno-wilgotnościowych w Parku Jordana w Krakowie w 2006 roku (niepublikowana praca magisterska). Uniwersytet Jagielloński, Kraków.

- Skelhorn C., Lindley S., Levermore G. 2014. The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning* 121: 129-140. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.09.012.
- Strzelec A. 2007. Sezonowe zróżnicowanie warunków mikroklimatycznych na Błoniach w Krakowie na podstawie pomiarów w 2006 roku (niepublikowana praca magisterska). Uniwersytet Jagielloński, Kraków.
- Sulikowska A., Wypych A., Woszczyk I. 2016. Fale upałów latem 2015 roku i ich uwarunkowania cyrkulacyjne. *Badania fizjograficzne* 7(A67): 205-223. DOI: 10.14746/bfg.2016.7.16.
- Szczepanowska H.B. 2015. Zieleń w mieście jako sposób na miejskie wyspy ciepła. W: A. Kalinowska (red.). *Miasto idealne – miasto zrównoważone. Planowanie przestrzenne terenów zurbanizowanych i jego wpływ na ograniczenie skutków zmian klimatu*, Uniwersyteckie Centrum Badań nad Środowiskiem Przyrodniczym i Zrównoważonym Rozwojem, Uniwersytet Warszawski, Warszawa: 81-95.
- Szumacher I. 2011. Funkcje terenów zieleni miejskiej a świadczenia ekosystemów. *Prace i studia geograficzne* 46: 169-176.
- Trzaskowska E. (red.). 2017. *Roślinność pasów przydrożnych Lublina. Potencjał i zagrożenia*. Urząd Miasta Lublin, Lublin.
- Wilczyński S., Durło G. 2003. Temperatura w profilu pionowym drzewostanu. *Sylvan* 8: 19-28.
- Wrona K. 2020. Klimat lokalny osiedla Pod Telegrafem w Kielcach (niepublikowana praca licencjacka). Uniwersytet Warszawski, Warszawa.
- Yu Z., Guo X., Jørgensen G., Vejre H. 2017. How can urban green spaces be planned for climate adaptation in subtropical cities?. *Ecological Indicators*, 82: 152-162, DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.07.002.

Summary

This paper's aim was to show thermal differentiation within a green area, depending on the type and density of vegetation cover. Also, the discrepancy of thermal conditions between the park area and its nearby surroundings was investigated. In order to accurately trace the microclimatic relations, the research period was divided into days characterised by high night-time radiation and day-time insolation (R-I) as well as days characterised by a significant cloudiness and low wind speed (Z-S). These were chosen from the period May–September 2020; detailed criteria of their selection are available in Appendix 1 and 2. The choice was also made considering the measurement results' completeness, but nevertheless the chosen R-I and Z-S days were not entirely free of gaps in the time series (Tab. 2). Measurement

data were analysed using mainly Excel software (Professional Plus 2016 version); map analysis was prepared in ESRI's ArcGIS environment (version 10.8.1). During the R-I days, expected thermal contrasts within and between individual surfaces were expected to be highest, whereas the Z-S days were expected to exhibit smaller variations in thermal conditions. The main data source incorporated in this research were in-situ measurement data collected from six TreeTalker sensors (Fig. 1) located in the Polish Aviators' Park in Cracow and in its immediate vicinity (Fig. 3). The sensors were placed on tree trunks, below the main leaf canopy (Fig. 2, Tab. 1). The stationary measurement network was created and is administrated by the Urban Greenery Management in Cracow for the purposes of the project LIFE URBANGREEN 'Innovative technological platform to improve management of green areas for better climate adaptation' (project number: LIFE17 CCA/IT/000079). As a result of this ana-

lysis, it was established that, during the R-I days, a large discrepancy in thermal conditions should be expected between the interior of the park, which is covered with high vegetation, and the point outside of the park boundaries (1.0 °C in the values of daily average air temperature and 1.9 °C in the values of daytime average air temperature) and slightly lower between the edge of the park, where low vegetation predominates, and the outside of the park (0.5 °C in the values of the daily average air temperature and 0.7 °C in the values of the daytime average air temperature) (Fig. 5A). As expected, during the Z-S days, these contrasts became smaller, especially inside the park itself (Fig. 5B). This proves that the type of vegetation is of decisive im-

portance in shaping the thermal conditions, especially during days characterised by long sunshine duration. Another important finding is that, during daytime, the highest thermal contrasts typically occur between the point outside of the park and the densest vegetation cover in the park, whereas, during night-time, the differences begin to grow in the park itself, surpassing the contrasts observed with the surrounding area. The results obtained via point measurement of air temperature in Polish Aviators' Park correspond with the previous authors' findings on the subject, as described in literature. The contents of this paper contribute to an even better understanding of how urban green spaces work from a microclimate perspective.

Kryteria wyboru dni R-I

Criteria for the selection of R- days

Kryterium/ <i>Criterion</i>	Wartość progowa/ <i>Threshold value</i>	Uzasadnienie/ <i>Argumentation</i>
Usłonecznienie	>12h w maju, czerwcu i lipcu; >11h w sierpniu; >9h we wrześniu	Wg Matuszko (2007) średnie usłonecznienie w Krakowie w latach 1901–2000 wynosiło (w zaokrągleniu do pełnych godzin): w maju, czerwcu i lipcu – 7 godzin, w sierpniu – 6 godzin, we wrześniu – 5 godzin. Przyjęte wartości dla dni R-I przekraczają te średnie o 5 godzin celem wyodrębnienia istotnie ponadprzeciętnie pogodnych dni. Wyjątkiem jest wrzesień, podczas którego liczba godzin ze słońcem gwałtownie maleje w ciągu miesiąca i próg powyżej 10 godzin byłby trudny do spełnienia, stąd przyjęto próg 9 godzin i o 4 godziny więcej od średniej
Średnie dzienne* zachmurzenie	Średnie dzienne $\leq 3/8$; średnie dzienne w piętrze niskim $\leq 2/8$	Z uwagi na mnogość kryteriów wyznaczania dni pogodnych wyróżnianych w literaturze (Matuszko 2011) przyjęto ogólny próg średniego dziennego zachmurzenia nieprzekraczającego $3/8$ oraz dodano nieuwzględniany w wyznaczaniu dni pogodnych parametr zachmurzenia w piętrze niskim, które nie powinno przekraczać $2/8$. Wyjątkiem był dzień 02.08.2020, który zaliczono do dni R-I, pomimo iż średnie zachmurzenie ogólne wyniosło 4,2 oktanta. Jednak miało to miejsce przy zupełnym braku zachmurzenia w piętrze niskim oraz zachmurzeniem w piętrze średnim wynoszącym tylko 0,4 oktanta
Zachmurzenie terminowe	ogólne $\leq 4/8$; piętra niskiego $\leq 3/8$	Analiza warunków termicznych w poszczególnych dniach wykazała, że przy takich wartościach zachmurzenia terminowego występował przebieg dobowy temperatury powietrza charakterystyczny dla dni radiacyjno-insolacyjnych. Wyjątkiem był dzień 02.08.2020, który zaliczono do dni R-I, pomimo iż podczas dwóch terminów pomiarowych zostały przekroczone dopuszczalne wartości ogólnego zachmurzenia terminowego – stało się to jednak przy braku zachmurzenia w piętrze niskim, co nie przeszkodziło w wykształceniu się wyraźnego dobowego przebiegu temperatury powietrza
Średnia dzienna* prędkość wiatru	$\leq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Z uwagi na konieczność zachowania reprezentatywności wartości temperatury powietrza, przyjęto maksymalne wartości progowe średniej dziennej i terminowej prędkości wiatru. Przyjęcie bardziej restrykcyjnych progów skutkowałoby zbyt małą liczbą dni badawczych, natomiast wyższe wartości prędkości wiatru powodowały już zaburzenie dobowego przebiegu temperatury powietrza
Terminowa prędkość wiatru	$\leq 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	

*średnie dzienne zostały obliczone jako średnie arytmetyczne z pomiarów wykonywanych na stacji meteorologicznej Kraków-Observatorium (Ogród Botaniczny UJ) podczas pięciu terminów pomiarowych: 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00.

Day's mean values were calculated as arithmetical means from the measurements conducted in the Cracow-Observatorium meteorological station (Jagiellonian University's Botanical Garden) during five measurement times: 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00.

Kryteria wyboru dnia Z-S

Criteria for the selection of Z-S days

Kryterium/ <i>Criterion</i>	Wartość progowa/ <i>Threshold value</i>	Uzasadnienie/ <i>Argumentation</i>
Usłonecznienie	$\leq 2h$	Niskie usłonecznienie uniemożliwia wytworzenie się wyraźnego, dobowego przebiegu temperatury powietrza z maksimum w godzinach wczesnopołudniowych
Średnie dzienne* zachmurzenie	$\geq 6/8$	Jak w przypadku dni R-I – mnogość kryteriów wyznaczania dni pochmurnych (Matuszko 2011) doprowadziła do przyjęcia ogólnego założenia, iż nie może być ono niższe niż 6 oktantów
Średnia dzienna* prędkość wiatru	$\leq 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Z uwagi na konieczność zachowania reprezentatywności wartości temperatury powietrza, progi dotyczące średniej dziennej i terminowej prędkości wiatru zostały przyjęte analogicznie jak w przypadku dni R-I
Terminowa prędkość wiatru	$\leq 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	

*jak w Załącznik 1/as in Appendix 1