

DOROTA MATUSZKO, KATARZYNA PIOTROWICZ

Cechy klimatu miasta a klimat Krakowa

Zarys treści: W artykule przedstawione zostały cechy klimatu Krakowa. Analizie poddano usłonecznienie, temperaturę i wilgotność powietrza, zachmurzenie, opady atmosferyczne, pokrywę śnieżną i wiatr. Wartości głównych elementów klimatu przedstawiono i omówiono dla stacji miejskiej (Ogród Botaniczny) i pozamiejskiej (Balice).

Słowa kluczowe: klimat miasta, Kraków, miejska wyspa ciepła

Wprowadzenie

Klimat miasta w porównaniu z terenem pozamiejskim różni się wieloma cechami, z których jedne są bezsporne, a inne dyskusyjne. Do pierwszej grupy należą m.in. osłabienie natężenia promieniowania słonecznego, wyższa temperatura powietrza, mniejsze prędkości wiatru, krótsze zaleganie pokrywy śnieżnej czy większe zanieczyszczenie powietrza (m.in. Kratzer 1956; Landsberg 1981; Oke 1987; Lewińska 2000). Jak wynika z literatury klimatologicznej, kontrowersyjne są poglądy na temat warunków wilgotnościowych w mieście. Wielu autorów uważa (m.in. Bornstein; Oke 1987; Landseberg 1981; Tamulewicz 1997), że do atmosfery miasta dostają się dodatkowe ilości pary wodnej, które powodują tworzenie się chmur, zwiększenie ilości opadów i burz oraz wzrost częstości występowania mgieł. Jest też wielu zwolenników opinii, że miasto pełni rolę wysuszającą (m.in. Kratzer 1956; Yoshino 1975; Morawska-Horawska 1984; Wypych 2007). Według wymienionych autorów wynika to z wyższej temperatury powietrza i szybkiego spływu wód opadowych do sieci kanalizacyjnej, a zatem z ograniczonego parowania z podłoża.

Celem niniejszego opracowania jest charakterystyka wybranych cech klimatu Krakowa oraz próba wskazania, które z nich potwierdzają właściwości klimatu miasta.

W opracowaniu wykorzystano dane ze Stacji Naukowej Zakładu Klimatologii IGIiGP UJ oraz ze stacji synoptycznej IMGW-PIB w Balicach z lat 2001–2010 (seria usłonecznienia 2001–2006).

Stacja Naukowa Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego znajduje się przy ul. Kopernika 27 w dawnym Obserwatorium Astronomicznym na terenie Ogrodu Botanicznego ($\varphi=50^{\circ}04'N$, $\lambda=19^{\circ}58'E$, $H_s=206$ m n.p.m.) i reprezentuje warunki klimatyczne centrum miasta.

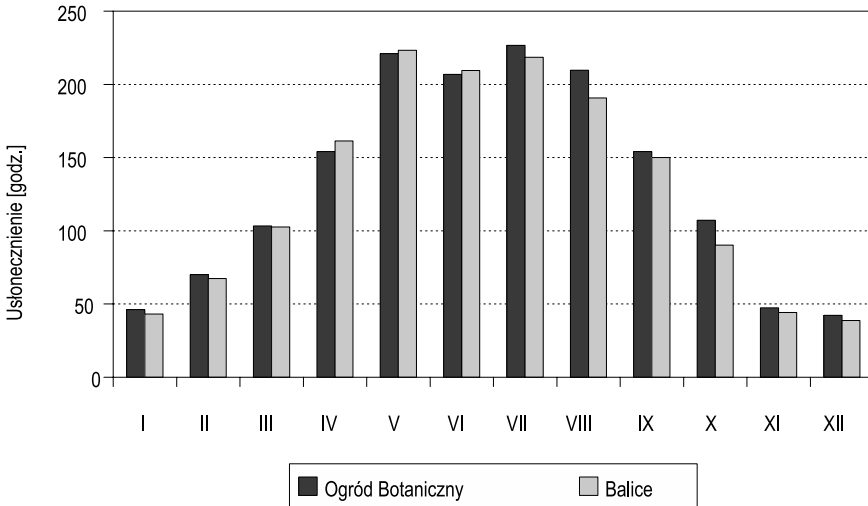
Stacja synoptyczna Kraków-Balice ($\varphi=50^{\circ}05'N$, $\lambda=19^{\circ}48'E$, $H_s=237$ m n.p.m.) położona jest na terenie Międzynarodowego Portu Lotniczego, około 11 km na zachód od centrum Krakowa, w otoczeniu terenów rolniczych Obniżenia Cholerzyńskiego i reprezentuje warunki pozamiejskie.

Usłonecznienie

Wśród klimatologów panuje pogląd, że obszary miejskie odznaczają się mniejszym usłonecznieniem niż tereny pozamiejskie (Kuczmarowski 1982; Morawska-Horawska 1984; Marciniak i Wójcik 1991). Straty te ocenia się na około 5–15% (Landsberg 1981; Lewińska 2000).

W Krakowie średnia roczna suma usłonecznienia rzeczywistego wynosi w Ogrodzie Botanicznym 1588,8 godzin, a w Balicach 1539,3 godzin. Najbardziej słoneczne jest lato, z maksimum w lipcu (240,0 h), a najmniej godzin ze słońcem jest w zimie, z minimum w grudniu (39,5 h).

W poszczególnych latach sumy roczne i miesięczne usłonecznienia w centrum Krakowa i na obrzeżach miasta niewiele się różnią (ryc. 1). Zazwyczaj usłonecznienie w Ogrodzie Botanicznym jest nieco większe niż w Balicach, jedynie w 2006 roku suma roczna usłonecznienia była większa na stacji pozamiejskiej. W kwietniu, maju i czerwcu w Balicach występuje niewielka przewaga sum miesięcznych usłonecznienia. W pozostałych miesiącach usłonecznienie jest większe w mieście. Różnice wahają się od niespełna jednej godziny w marcu do 19 godzin w sierpniu.



Ryc. 1. Sumy miesięczne uśłonecznienia rzeczywistego [godziny] w Krakowie na stacjach Ogród Botaniczny i Balice w latach 2001–2006

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IGiGP UJ i IMGW-PIP.

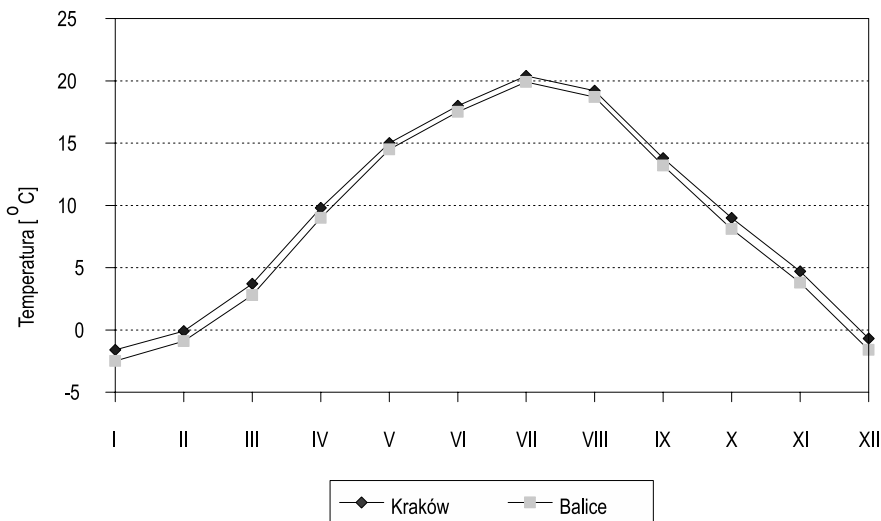
Temperatura powietrza

Najbardziej charakterystyczną cechą klimatu miasta jest występowanie wyższych wartości temperatury powietrza w centrum aglomeracji niż na ich peryferiach. Zjawisko to znane jest jako miejska wyspa ciepła (m.w.c.) (m.in. Lewińska 2000; Fortuniak 2003; Szymanowski 2004). Powstaje ona z powodu akumulacji ciepła przez materiały, z których zbudowane są budynki, place, ulice, oraz emisję ciepła antropogenicznego uwalnianego do atmosfery w wyniku procesów spalania m.in. węgla i gazu, a także z transportu samochodowego.

Miejska wyspa ciepła jest zjawiskiem dynamicznym. Charakteryzuje się dużą zmiennością natężenia (intensywnością) w ciągu doby i w roku. Największe różnice temperatury powietrza występują podczas bezchmurnych i bezwietrznych nocy, zwłaszcza zimą. Intensywność m.w.c. jest również związana z wielkością obszaru zurbanizowanego i liczbą zamieszkujących

ją osób (Oke 1973). W dużych miastach amerykańskich i przy sprzyjających warunkach pogodowych różnice temperatury między centrum a peryferiami mogą przekraczać 12°C , natomiast w polskich miastach najczęściej wynoszą do $7\text{--}10^{\circ}\text{C}$ (m.in. Wawer 1998; Kaszewski i Siwek 1999; Fortuniak 2003; Szymanowski 2004).

W Krakowie intensywność m.w.c. wynosi średnio $1,2^{\circ}\text{C}$, ale w skrajnych przypadkach może osiągać nawet wartości $5\text{--}7^{\circ}\text{C}$ (Kłysik 1985; Lewińska 1994/1995; Obrębska-Starkłowa i in. 1997). Z porównania przebiegu rocznego temperatury powietrza w Ogrodzie Botanicznym i w Balicach wynika, że centrum miasta w każdym miesiącu jest cieplejsze niż teren pozamiejski (ryc. 2). W analizowanych latach (2001–2010) średnia roczna temperatura powietrza wynosiła w centrum miasta $9,3^{\circ}\text{C}$ i była o $0,7^{\circ}\text{C}$ wyższa od temperatury w Balicach ($8,6^{\circ}\text{C}$). Różnice wartości w poszczególnych miesiącach wahały się od $0,5^{\circ}\text{C}$ w okresie maj – sierpień do $0,9^{\circ}\text{C}$ od października do stycznia (ryc. 2).



Ryc. 2. Średnie miesięczne wartości temperatury powietrza w Krakowie na stacjach Ogród Botaniczny i Balice w latach 2001–2010

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IGiGP UJ i IMGW-PIP.

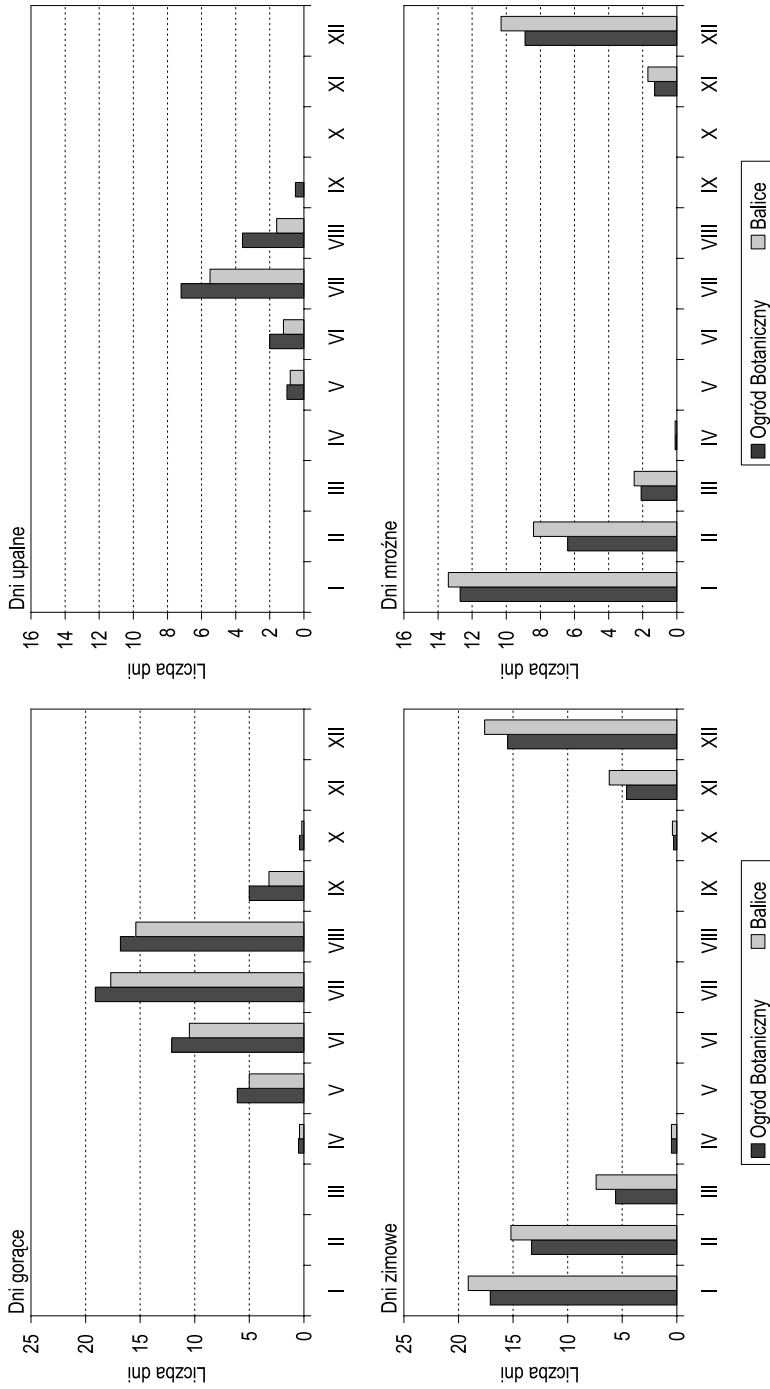
Wpływ miasta na temperaturę powietrza jest bardziej wyraźny w przypadku jej wartości minimalnych, aniżeli maksymalnych. O ile różnica między średnią miesięczną maksymalną temperaturą w Ogrodzie Botanicznym i Balicach wynosiła około $0,7^{\circ}\text{C}$, o tyle w przypadku minimalnej temperatury była prawie dwukrotnie wyższa ($1,2^{\circ}\text{C}$). Podobne prawidłowości, w dłuższym okresie badań, stwierdzili m.in. Lewińska i in. (1990), Obrębska-Starkłowa i in. (1997) oraz Michniewski (2000) i Bokwa (2010).

Wyższe wartości średniej temperatury powietrza w centrum miasta są wynikiem większej liczby dni gorących ($t_{\text{max.}} > 25^{\circ}\text{C}$) i upalnych ($t_{\text{max.}} > 30^{\circ}\text{C}$), a mniejszej liczby dni zimowych ($t_{\text{sr.}} < 0^{\circ}\text{C}$), mroźnych ($t_{\text{max.}} < 0^{\circ}\text{C}$) (ryc. 3) i bardzo mroźnych ($t_{\text{max.}} < -10^{\circ}\text{C}$).

W Balicach w pierwszej dekadzie XXI wieku było średnio w roku o około 8 dni gorących i 5 dni upalnych mniej niż w Ogrodzie Botanicznym. Największe różnice w średniej miesięcznej ich liczbie występowały od czerwca do września (dni gorące) oraz w lipcu i sierpniu w przypadku dni upalnych (ryc. 3). Dni charakteryzujących chłodną połowę roku było więcej poza miastem niż w centrum Krakowa (ryc. 3). Dni bardzo mroźne ($t_{\text{max.}} < -10^{\circ}\text{C}$) nie pojawiają się w Krakowie każdej zimy. W latach 2001–2010 było ich w Ogrodzie Botanicznym 11, a w Balicach 14, co również świadczy o wyższej temperaturze powietrza w centrum miasta.

Wilgotność powietrza

Wśród klimatologów panują różne poglądy na temat wilgotności w mieście. Zdaniem Lewińskiej (2000) różnice te wynikają z tego, jaki parametr określający wilgotność jest analizowany. Naukowcy oceniający wilgotność powietrza na podstawie wilgotności względnej uzyskali wyniki wskazujące na wysuszającą rolę miasta (Peterson 1971; Eagleman 1974; Yoshino 1975; Sisterson, Driks 1978; Morawska-Horawska 1984; Gluza, Kaszewski 1984; Wypych 2007). Natomiast w publikacjach, w których autorzy wykorzystują do analizy ciśnienie pary wodnej lub wilgotność bezwzględną, zwraca się uwagę na wyższą wilgotność w mieście (m.in. Bornstein i in. 1972; Goldreich 1974; Padmanabhamurty, Bahl 1982; Lewińska 2000). Panuje też pogląd o dobowej

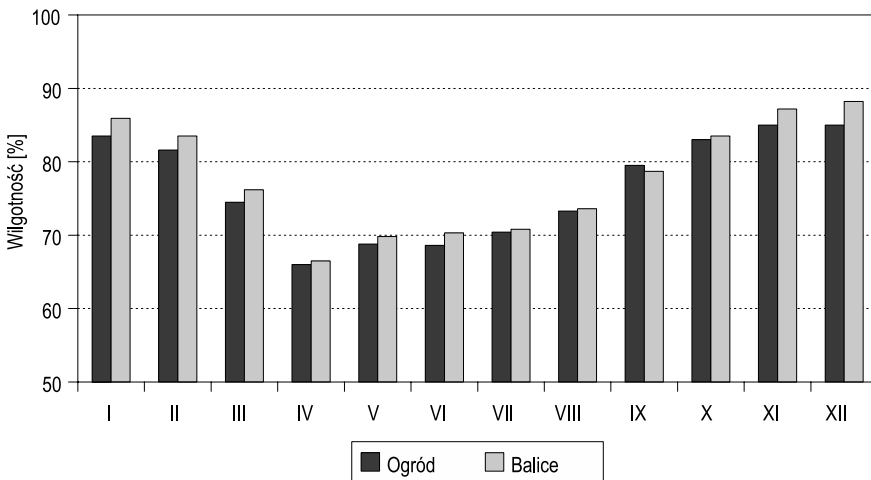


Ryc. 3. Średnia miesięczna liczba dni gorących, upalnych, zimowych i mroźnych w Krakowie na stacjach Ogród Botaniczny i Balice w latach 2001–2010

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IGiP UJ i IMGW-PIP.

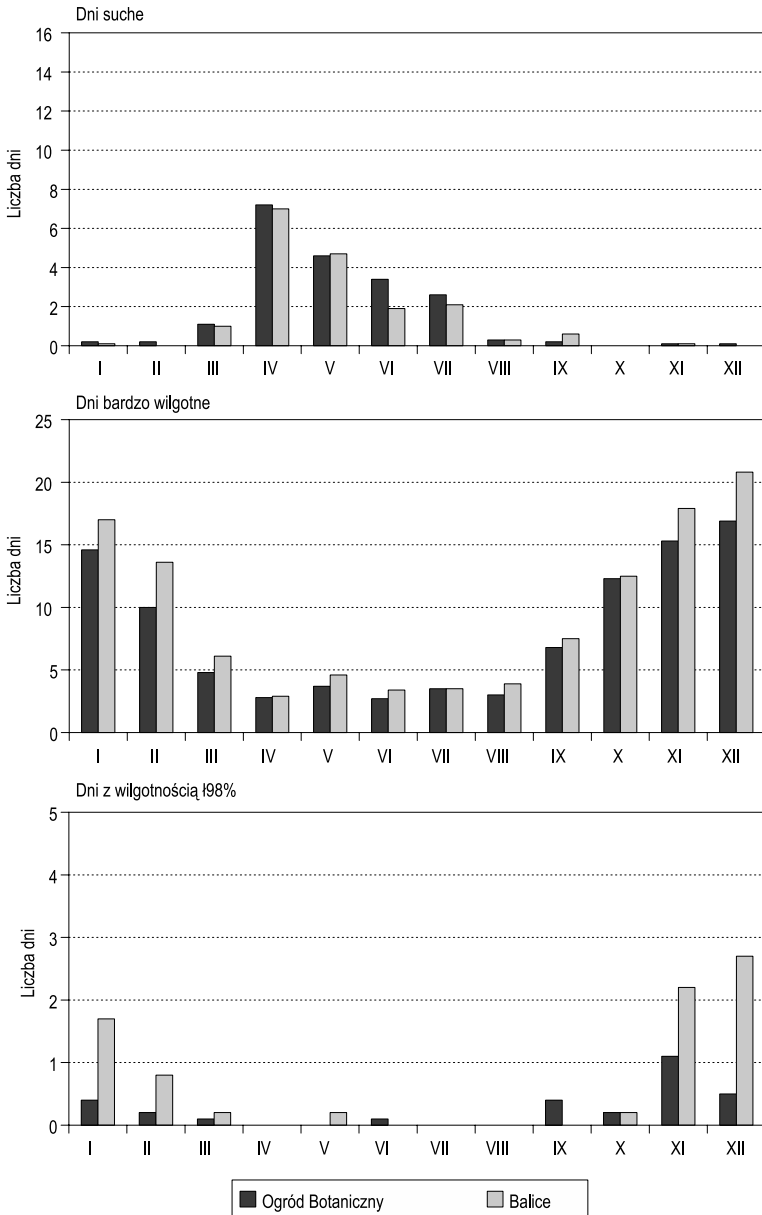
i rocznej zmienności wilgotności w terenach zurbanizowanych (Goldreich 1974; Oke 1987), a Lewińska (2000) dowodzi, że zawartość pary wodnej w powietrzu miasta nie jest jednakowa nad całym jego obszarem, lecz zależy od struktury zabudowy i osłabienia prędkości wiatru.

W centrum Krakowa średnia roczna wartość wilgotności względnej (f) wynosi 77%, a w Balicach 78%. Najwyższe średnie miesięczne wartości w ciągu roku ($f > 80\%$) występują jesienią oraz w zimie (ryc. 4). Wiosną następuje szybki spadek wilgotności do minimum w kwietniu (66%), przy czym największa zmiana zachodzi na przełomie marca i kwietnia (spadek wartości o 8–10%). Średnia roczna liczba dni suchych ($f \leq 55\%$) w centrum miasta jest większa (20 dni) niż na peryferiach (17,8 dni). Występują one głównie w półroczu ciepłym, jako pojedyncze dni lub ciągi dwudniowe. W Balicach, w analizowanym dziesięcioleciu nie było ani jednego dnia suchego w lutym, październiku i grudniu (ryc. 5). Więcej natomiast w ciągu całego roku było dni bardzo wilgotnych ($f \geq 86\%$) i z wilgotnością względną $f \geq 98\%$ (ryc. 5).



Ryc. 4. Średnie miesięczne wartości wilgotności względnej [%] w Krakowie na stacjach Ogród Botaniczny i Balice w latach 2001–2010

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IGiGP UJ i IMGW-PIP.



Ryc. 5. Średnia miesięczna liczba dni suchych, bardzo wilgotnych i z wilgotnością względną $\geq 98\%$ w Krakowie na stacjach Ogród Botaniczny i Balice w latach 2001–2010

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IGiGP UJ i IMGW-PIP.

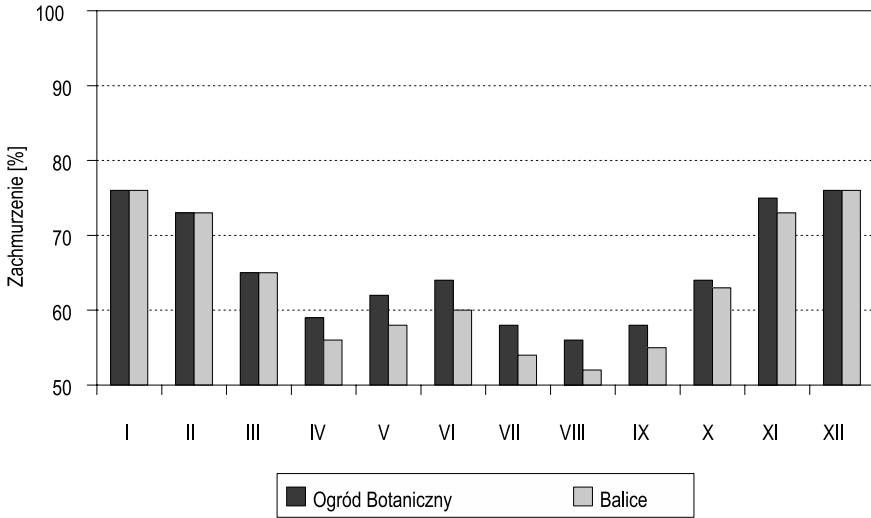
W centrum Krakowa średnia roczna liczba dni z mgłą wyniosła 24 (od 15 do 30 dni w roku), natomiast w Balicach ich liczba jest ponad dwukrotnie większa (52 dni). Zdecydowanie więcej dni z mgłą notowanych było w miesiącach półroczna chłodnego – od października do stycznia. Mgły w centrum miasta występują przede wszystkim rano (około 87% wszystkich przypadków). W Balicach ich liczba jest dużo wyższa nie tylko w porannym terminie obserwacyjnym, ale również w południowym, co świadczy też o tym, że mgły w obszarze pozamiejskim utrzymują się dłużej niż w centrum miasta.

Zachmurzenie

Wzajemne powiązania między miastem a zachmurzeniem nie są do końca wyjaśnione ze względu na istnienie sprzężeń zwrotnych w atmosferze (Matuszko 1996). U. Kossowska-Cezak (1978) uważa, że kompleks miejski wpływa na zachmurzenie w sposób mechaniczny i termiczny. Powoduje wzrost zachmurzenia nad jego obszarem, ale w pewnych warunkach (rano przy niskiej temperaturze, wieczorem przy ogólnie dużym zachmurzeniu) może sprzyjać zmniejszonemu rozwojowi chmur. Badania Kuczmarckiego (1982) i Matuszko (2001, 2003) wskazują na spadek zachmurzenia w Krakowie w przebiegu wieloletnim.

Mniej dyskusyjny jest wpływ miasta na strukturę zachmurzenia (Matuszko 2001, 2003). Wzrasta częstość występowania chmur konwekcyjnych (*Cumulus*, *Cumulonimbus*), a zmniejsza się obecność chmur warstwowych (*Stratus*, *Nimbostratus*, *Altostratus*), co tłumaczy się emisją ciepła antropogenicznego i zamianą naturalnych terenów zielonych na betonowe i asfaltowe. Według Lewińskiej (2000) nad obszarem miasta chmury kłębiaste tworzą się na poziomie 300–600 m wyżej niż nad terenami pozamiejskimi. Często chmury *Cumulus* pojawiają się nad obiektami emitującymi ciepło i parę wodną (elektrownie cieplne, kombinaty metalurgiczne).

W centrum miasta średnie roczne zachmurzenie wynosi 66% i jest o 3% większe niż na peryferiach (ryc. 6). Przy wizualnych obserwacjach taka różnica nie ma praktycznego znaczenia. Nieco większe różnice w wielkości zachmurzenia (około 4%) widoczne są w cieplej części roku (od maja do



Ryc. 6. Średnie miesięczne zachmurzenie [%] w Krakowie na stacjach Ogród Botaniczny i Balice w latach 2001–2010

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IGiGP UJ i IMGW-PIP.

sierpnia), a w zimie i w marcu są równe 0 (ryc. 6). Tendencja w przebiegu rocznym zachmurzenia na stacjach w Ogrodzie Botanicznym i w Balicach jest zachowana, maksimum przypada na styczeń i grudzień (76%), a minimum na sierpień (56%).

Dni bezchmurne występują stosunkowo rzadko, średnio około 6 dni w roku. Stosunkowo dużo (około 66) jest dni z całkowitym zachmurzeniem (średnie zachmurzenie = 100%), zwłaszcza w grudniu i styczniu. Największy udział w zachmurzeniu Krakowa mają chmury *Stratocumulus* (27%) i *Alto cumulus* (18%), najrzadziej widoczne są *Cirrostratus* (2%) oraz *Cumulonimbus* (3%) (Matuszko i in. 2014).

Niestety z powodu braku porównywalnych danych dotyczących rodzajów chmur ze stacji w Balicach nie można ocenić różnicy w strukturze zachmurzenia w centrum miasta i na terenie pozamiejskim. Prawdopodobnie przewaga (ryc. 6) wielkości zachmurzenia w Ogrodzie Botanicznym, widoczna głównie w cieplej połowie roku (kwiecień-wrzesień), związana jest z występowaniem

chmur o budowie pionowej, które nie utrudniają dopływu promieniowania słonecznego i nie powodują zmniejszenia usłonecznienia.

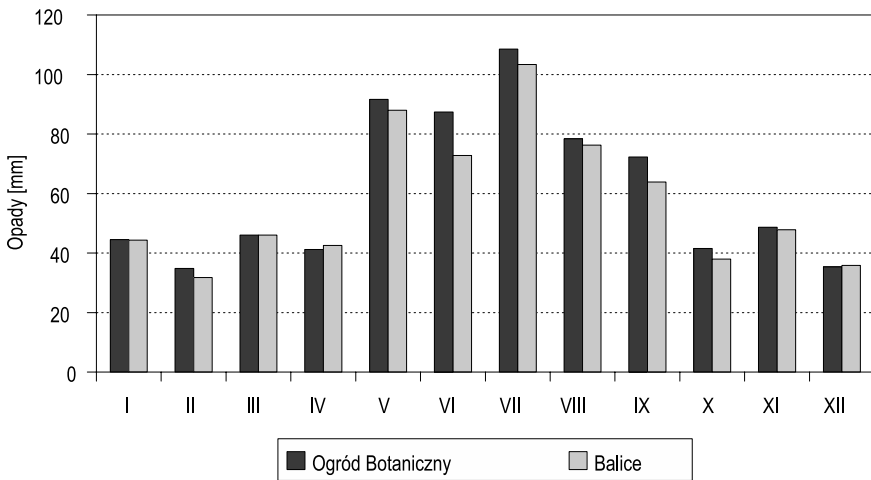
Opady atmosferyczne i burze

Według literatury (Huff, Vogel 1978; Lewińska 2000) wpływ miasta na opady przejawia się wzrostem: sum opadów, liczby dni z opadem, opadów o dużym natężeniu oraz częstości występowania burz i gradu. Rolę czynników antropogenicznych w kształtowaniu słabych opadów udokumentowano w pracach Morawskiej-Horawskiej (1980) i Twardosza (1996), natomiast wzrost liczby dni z opadem burzowym w pracach m.in. Niedźwiedzia i in. (1984) oraz Obrębskiej-Starkłowej i in. (1997).

Według Lewińskiej (2000) głównymi przyczynami wzrostu opadów w mieście są:

- konwekcja termiczna i silne prądy wstępujące;
- miejska wyspa ciepła i związana z nią równowaga chwiejna powietrza;
- turbulencja mechaniczna;
- wzrost zanieczyszczeń powietrza, stanowiących aktywne jądra kondensacji;
- wzrost pary wodnej.

Na obszarze Krakowa opady atmosferyczne większe są w centrum miasta (Ogród Botaniczny 730 mm) niż na peryferiach (Balice 690 mm). W przebiegu rocznym wyraźnie zaznacza się maksimum opadów w lipcu. Suma opadów w okresie letnim jest prawie 3 razy większa niż w porze zimowej, co świadczy o znacznym stopniu kontynentalizmu pluwialnego w Krakowie (ryc. 7). Opady atmosferyczne w Ogródzie Botanicznym są wyższe od opadów w Balicach o około 6%. Znajduje to odzwierciedlenie także w średniej rocznej liczbie dni z opadem ($\geq 0,1$ mm), która w przypadku Ogródu Botanicznego jest większa o 3% od wartości z Balic (Matuszko i in. 2014). W centrum Krakowa opady ($\geq 0,1$ mm) pojawiają się średnio przez 180 dni w roku, w tym występuje 19 dni z opadem silnym, powyżej lub równym 10,0 mm (Balice odpowiednio 175 i 18 dni). Różnice w liczbie dni z opadem między rozpatrywanymi stacjami są widoczne przede wszystkim w przypadku opadów dobowych nieprzekraczających 5 mm. Potwierdza to hipotezę o większej częstości opadów słabych

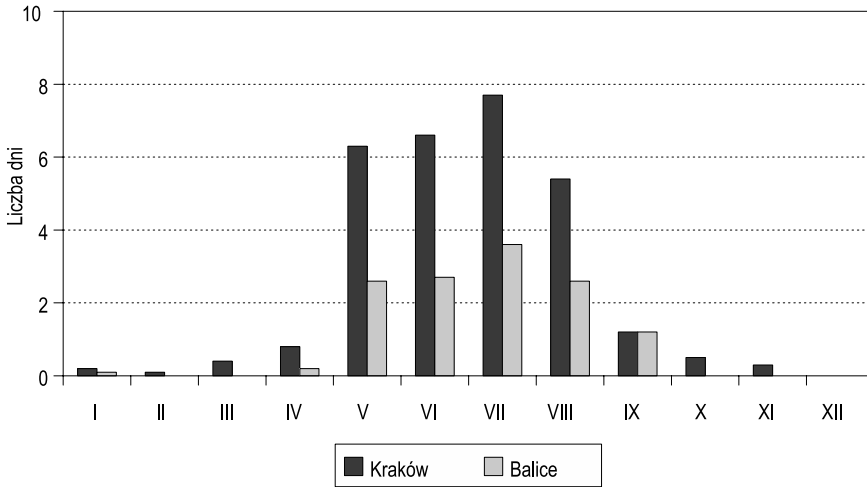


Ryc. 7. Średnie miesięczne sumy opadów atmosferycznych [mm] w Krakowie na stacjach Ogród Botaniczny i Balice w latach 2001–2010

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IGiGP UJ i IMGW-PIP.

w obszarach zurbanizowanych zwłaszcza w okresie zimowym, kiedy występuje większa koncentracja w powietrzu zanieczyszczeń gazowych i pyłowych (Matuszko i in. 2014).

W centrum Krakowa średnio w roku występuje około 30 dni z burzą (ryc. 8). Najwięcej burz jest w lipcu (8 dni), ale dosyć często zdarzają się też w maju i czerwcu (powyżej 6 dni). Porównanie liczby dni z burzą w Ogrodzie Botanicznym i w Balicach wskazuje na przewagę występowania burz w mieście. Na peryferiach burze występują ponad 2 razy rzadziej niż w Ogrodzie Botanicznym (ryc. 8). W odróżnieniu od terenów pozamiejskich pojedyncze burze pojawiają się w centrum miasta także w chłodnej części roku, co może wskazywać na antropogeniczne pochodzenie tego zjawiska, ponieważ sztuczne ciepło emitowane przez miasto, szczególnie w okresie grzewczym, może być przyczyną wzmocnienia konwekcji.



Ryc. 8. Liczba dni z burzą w Krakowie na stacjach Ogród Botaniczny i Balice w latach 2001–2010

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IGiGP UJ i IMGW-PIP.

Pokrywa śnieżna

Na występowanie na danym obszarze pokrywy śnieżnej ma wpływ temperatura powietrza, suma opadów atmosferycznych, a zwłaszcza opady w postaci stałej, warunki solarne, anemologiczne oraz cyrkulacja atmosferyczna (Falarz 2007). Charakteryzując występowanie tego elementu meteorologicznego, należy analizować nie tylko średnie i skrajne daty jego występowania, ale również m.in. liczbę dni w poszczególnych miesiącach i sezonach oraz jej wysokość (grubość). O ile wyższe wartości temperatury powietrza występujące w centrum miasta niewątpliwie zmniejszają długość zalegania i grubość pokrywy śnieżnej, to jednak wyższe sumy opadów mogą wpływać na jej wzrost. Niestety z powodu braku serii porównawczej poszczególnych parametrów pokrywy śnieżnej na obszarach peryferyjnych Krakowa nie było możliwości przeprowadzenia szczegółowej analizy tego elementu. Wcześniejsze badania Falarz (1998) i Pajek (2000–2001) wskazują, że:

- istnieje duża zgodność przebiegu poszczególnych charakterystyk pokrywy śnieżnej w Krakowie i oddalonym o około 25 km na południe Gaika-Brzezowej; średnia data pojawienia się pokrywy śnieżnej w latach 1975/1976 i 1994/1995 była w centrum miasta taka sama jak w Gaiku-Brzezowej (23 listopada), natomiast w poszczególnych latach wahała się od jednego (30% zim) do maksymalnie czterech dni (5%), przy czym w 50% sezonów daty były identyczne;
- było nieco większe zróżnicowanie dat końca okresu śnieżnego; średnio w centrum Krakowa pokrywa śnieżna zanikała 9 dni wcześniej niż na terenie wiejskim;
- w latach 1975/1976 i 1994/1995 potencjalny okres występowania pokrywy śnieżnej w Ogrodzie Botanicznym wynosił od 70 dni (1988/1989) do 170 dni (1981/1982), natomiast w Gaiku-Brzezowej również od 70 do 171 w sezonach odpowiadających krakowskiemu;
- pod względem grubości pokrywy śnieżnej zimy w Gaiku-Brzezowej były bardziej śnieżne niż w centrum Krakowa; sezonowe sumy grubości w centrum Krakowa stanowiły średnio 78% wartości z Gaika-Brzezowej, ale w czterech latach badanego wielolecia zimy w Krakowie były jednak nieco bardziej śnieżne;
- wpływ czynników naturalnych na zróżnicowanie pokrywy śnieżnej jest silniejszy niż czynników antropogenicznych, czyli na parametry występowania pokrywy śnieżnej w większym stopniu oddziałuje sytuacja synoptyczna niż istnienie miasta; nie stwierdzono, aby m.w.c. miała jednoznaczny wpływ na pokrywę śnieżną.

Wiatr

Obszary zurbanizowane tworzą charakterystyczną „rzeźbę miasta” (zmienna wysokość i kształt budynków), która bardzo silnie zwiększa szorstkość podłoża i wpływa na osłabienie prędkości wiatru. Na podstawie badań w różnych miastach zauważono wyraźną redukcję prędkości wiatru w centrum miasta w porównaniu z terenami pozamiejskimi (Fortuniak, Kłysik 2008). W przypadku średniej rocznej prędkości wiatru wynosi ona około 20–30%

(Lee 1979). Ta ogólna prawidłowość dotyczy zwłaszcza dnia, kiedy notowane są większe prędkości wiatru niż w nocy.

W specyficznych warunkach meteorologicznych dochodzi do zwiększenia prędkości wiatru w centrum miasta. Takie sytuacje powstają w nocy, podczas występowania słabego wiatru i wyraźnie zaznaczonej m.w.c. (Fortuniak 2003). Wyższa temperatura powietrza w centrum miasta inicjuje cyrkulację bryzową (tzw. bryza miejska), która zaznacza się nieco wyższymi prędkościami na tle słabego pola wiatru na obszarze pozamiejskim. Drugim przypadkiem, gdy prędkość wiatru w mieście może być większa niż w obszarach o rozproszonej zabudowie, jest sytuacja, kiedy powstaje wiatr tunelowy. W kanonie miejskim dochodzi też do wzrostu prędkości wiatru np. między wieżowcami i/lub w wyniku różnicy ciśnienia atmosferycznego związanego z nagrzanymi i pozostającymi w cieniu fragmentami ulic (Fortuniak 2003).

W Krakowie i okolicach kierunek wiatru jest silnie zależy od rzeźby terenu – przebiegu dna doliny Wisły (wschód – zachód), ograniczonej od południa i północy wzniesieniami, z których w bezchmurne noce następuje spływ chłodnego powietrza. W centrum miasta przeważają wiatry zachodnie (19,7%), natomiast w Balicach zachodnio-południowo-zachodnie (21,5%). Średnia prędkość wiatru w Ogrodzie Botanicznym w latach 2001–2010 wynosiła $1,8 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$ i była o $1 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$ niższa niż w Balicach ($2,8 \text{ m}\times\text{s}^{-1}$). Analiza maksymalnych prędkości wiatru notowanych w poszczególnych terminach pomiarowych wykazała, że w Balicach były one ponad dwukrotnie większe niż w centrum miasta (Matuszko i in. 2014).

O wyraźnej redukcji prędkości wiatru w mieście świadczy również częstość występowania cisz atmosferycznych. W Krakowie w ostatnim dziesięcioleciu (2001–2010) średnio w roku stanowiły one 16,8%, a w Balicach 12,6%. Najwięcej cisz występowało w godzinach porannych (24,9% w centrum miasta i 18,9% w obszarze pozamiejskim) i wieczornych (odpowiednio 21,0% i 15,4%). W godzinach okołopołudniowych, w związku z największą turbulencją powietrza, cisy atmosferyczne występują z najmniejszą częstością, choć również w centrum miasta jest ich nieco więcej niż poza obszarem zurbanizowanym (w Ogrodzie Botanicznym – 4,5%, a w Balicach 3,5%) (Matuszko i in 2014).

Wnioski

Porównanie wartości głównych elementów klimatu ze stacji miejskiej (Ogród Botaniczny) i pozamiejskiej (Balice) pozwoliło na zweryfikowanie właściwości klimatu miasta na podstawie danych z Krakowa.

Ważna cecha klimatu miasta, dotycząca osłabienia dopływu promieniowania słonecznego w terenach zurbanizowanych, nie znalazła potwierdzenia w Krakowie, ponieważ usłonecznienie w Ogrodzie Botanicznym było średnio w roku nieznacznie większe niż w Balicach. Tylko w jednym roku i średnio w trzech miesiącach wiosennych usłonecznienie w centrum miasta miało mniejsze wartości niż na terenie pozamiejskim. Prawdopodobnie jest to związane z częstymi mgłami występującymi w Obniżeniu Cholerzyńskim lub przewagą występowania w mieście chmur o budowie pionowej.

W pełni potwierdzono prawidłowość występowania w Krakowie m.w.c., o czym świadczy wyższa temperatura powietrza w centrum niż na peryferiach, większa liczba dni gorących i upalnych, a mniejsza mroźnych i bardzo mroźnych.

Porównanie warunków wilgotnościowych w Ogrodzie Botanicznym i Balicach potwierdza wysuszającą rolę miasta, polegającą na niższych wartościach wilgotności względnej oraz większej liczbie dni suchych, a mniejszej dni z mgłą. Prawdopodobnie jest to związane z nasileniem antropopresji będącej skutkiem dynamicznego rozwoju miasta. Wzrost gęstości zabudowy, zamiana powierzchni naturalnych na betonowe i asfaltowe, ubytek powierzchni biologicznie czynnej doprowadził do redukcji retencji wód opadowych i szybkiego spływu powierzchniowego. W lecie utrudniony został przebieg procesów parowania i transpiracji, a w zimie wzrosła emisja sztucznego ciepła do atmosfery.

W Krakowie obserwuje się nieznacznie większe zachmurzenie w centrum miasta w porównaniu z terenem pozamiejskim, zwłaszcza w ciepłej połowie roku, które związane jest ze wzrostem częstości występowania chmur konwekcyjnych. One z kolei powodują większą liczbę dni z burzą i większe sumy opadów. Natomiast większa liczba dni z opadem związana jest z częstym występowaniem opadów śladowych, wywołanych zanieczyszczeniami stanowiącymi jądra kondensacji. Zatem potwierdzono prawidłowość, że cechą

klimatu miejskiego jest zwiększenie sum opadów, liczby dni z opadem, opadów o dużym natężeniu oraz wzrost częstości występowania burz.

Pokrywa śnieżna jest elementem trudnym do analizy w Krakowie, ponieważ nie ma danych porównawczych z Balic. Wyniki badań prowadzonych w Gaiku-Brzezowej nie wskazują jednak na jednoznaczny wpływ miasta na długość zalegania pokrywy śnieżnej i jej grubość.

Dane z Krakowa potwierdzają kolejną właściwość klimatu miasta, a mianowicie osłabienie prędkości wiatru w centrum w porównaniu z terenem pozamiejskim, o czym świadczy także zdecydowanie większa liczba cisz w terenie zabudowanym.

Literatura

- Błażejczyk K., 2013, *Klimat i jego lokalne zróżnicowanie*, [w:] B. Degórska, M. Baścik (red.), *Środowisko przyrodnicze Krakowa. Zasoby – Ochrona – Kształtowanie*, IGiGP UJ, Kraków, 61–68.
- Bokwa A., 2010, *Wieloletnie zmiany struktury mezoklimatu miasta na przykładzie Krakowa*, IGiGP UJ, Kraków.
- Bornstein R.D., Lorenzen A., Johnson D., 1972, *Recent observations of urban effects on winds and temperatures in and around New York City*, Conf. Urban Environ. Second Conf. Biometeorol., American Meteorological Society, 28–33.
- Bornstein R.D., Oke T.R., 1979, *Influence of pollution and urbanization on urban climates*, Advances in Environmental Science and Engineering.
- Eagleman J.R., 1974, *A comparison of urban climatic modifications in three cities*, *Atmospheric Environment*, 8 (11), 1131–1142.
- Falarz M., 1998, *Wieloletnia zmienność pokrywy śnieżnej w Krakowie na tle zmian w obszarach podmiejskich*, Acta Geographica Lodziensia, Folia Geographica Physica, 3, 473–481.
- Falarz M., 2007, *Potencjalny okres występowania pokrywy śnieżnej w Polsce i jego zmiany w XX w.*, [w:] K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych*, IGiGP UJ, 205–213.
- Fortuniak K., 2003, *Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.

- Fortuniak K., Kłysik K., 2008, *Osobliwości klimatu miast na przykładzie Łodzi*, [w:] K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 477–488.
- Głuz A.F., Kaszewski B.M., 1984, *Zróżnicowanie temperatury i wilgotności powietrza w Lublinie*, Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji *Klimat i Bioklimat miast*, Uniwersytet Łódzki, 107–113.
- Goldreich Y., 1974, *Observation on the urban humidity island in Johannesburg*, Israel Journal of Earth Sciences, 23, 39–46.
- Huff F.A., Vogel J.L., 1978, *Urban, topographic and diurnal effects on rainfall in the St. Louis region*, Journal of Applied Meteorology, 17, 565–577.
- Kaszewski B.M., Siwek K., 1999, *Cechy przebiegu dobowego temperatury powietrza w centrum i na peryferiach Lublina*, [w:] K. Kłysik (red.), *Klimat i bioklimat miast*, Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica, 3, 213–220.
- Kłysik K., 1985, *Wpływ struktury termiczno-wilgotnościowej przyziemnych warstw powietrza na klimat lokalny w wybranych warunkach terenowych*, Acta Geographica Lodziensis, 49, 104–109.
- Kossowska-Cezak U., 1978, *Próba określenia wpływu zabudowy miejskiej na wielkość zachmurzenia (na przykładzie Warszawy)*, Prace i Studia IG UW, 25, Klimatologia, 10, 55–64.
- Kratzer P.A., 1956, *The climate of cities*, Braunschweig, Vieweg.
- Kuczmarowski M., 1982, *Usłonecznienie i zachmurzenie w Krakowie*, Przegląd Geofizyczny, 27 (3–4), 241–249.
- Landsberg H.E., 1981, *The urban climate*, International Geophysics Series, 28, Academic Press, New York.
- Lee D.O., 1979, *The influence of atmospheric and the urban heat Island on urban-rural wind speed differences*, Atmospheric Environment, 13, 1175–1180.
- Lewińska J., 1994/1995, *Geneza i rozwój miejskiej wyspy ciepła w Krakowie oraz możliwości jej minimalizacji*, Folia Geographica, seria Geographica-Physica, 26–27.
- Lewińska J., 2000, *Klimat miasta, zasoby, zagrożenia, kształtowanie*, IGPIK, Kraków.
- Lewińska J., Zgud K., Baścik J., Wiatrak W., 1990, *Klimat obszarów zurbanizowanych*, IGPIK, Warszawa.
- Marciniak K., Wójcik G., 1991, *The variation of sunshine duration in the middle part of northern Poland during the period 1946–1989*, Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, 396, 109–115.

- Matuszko D., 1996, *Wpływ czynników antropogenicznych na zachmurzenie w Krakowie*, [w:] A. Jankowski (red.), *Metody badań wpływu czynników antropogenicznych na warunki klimatyczne i hydrologiczne w obszarach zurbanizowanych*, Polskie Towarzystwo Geofizyczne, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Uniwersytet Śląski, Katowice, 97–108.
- Matuszko D., 2001, *Wpływ miasta na zachmurzenie i opady (na przykładzie Krakowa)*, [w:] K. German, J. Balon (red.), *Przemiany środowiska przyrodniczego Polski a jego funkcjonowanie*, Problemy Ekologii Krajobrazu, 10, IGiGP UJ, Kraków, 529–536.
- Matuszko D., 2003, *Cloudiness changes in Cracow in the 20th Century*, International Journal of Climatology, 23 (8), 975–984.
- Matuszko D., Piotrowicz K., Kowanetz L., 2014, *Klimat*, [w:] B. Degórska, M. Baścik (red.), *Środowisko przyrodnicze Krakowa. Zasoby – Ochrona – Kształtowanie*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 81–108.
- Michniewski A., 2000, *The comparison of the minimum temperature values in Cracow at the Botanical Garden and Balice Airport stations for the period 1966–1995*, Prace Geograficzne IGiGP UJ, 105, 125–136.
- Morawska-Horawska M., 1980, *Przypadek wystąpienia opadów atmosferycznych wywołanych czynnikami antropogennymi*, Przegląd Geofizyczny, 1, 67–70.
- Morawska-Horawska M., 1984, *Współczesne zmiany w zachmurzeniu i usłonecznieniu Krakowa na tle 120-lecia*, Przegląd Geofizyczny, 3, 271–284.
- Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B., Olecki Z., 1984, *Stosunki bioklimatyczne Krakowa*, Problemy Uzdrowiskowe, 1/2, 143–151.
- Obrębska-Starkłowa B., Olecki Z., Trepńska J., 1997, *Uwarunkowania klimatyczne w aspekcie rozwoju terytorialnego i przemysłowego Krakowa*, [w:] *Geografia. Człowiek. Gospodarka*, Instytut Geografii, Kraków, 233–243.
- Oke T.R., 1973, *City size and the urban heat island*, Atmospheric Environment, 7, 769–779.
- Oke T.R., 1987, *Boundary Layer Climates*, Routledge, 2nd edition, chapter 8, 262–303.
- Padmanabhamurty B., Bahl H.D., 1982, *Some physical features of heat and humidity islands at Delhi Isothermal and isohyetal patterns of Delhi as a sequel of urbanization*, Mausam, 33, 211–216.
- Pajek M., 2000–2001, *Charakterystyka pokrywy śnieżnej w obszarze miejskim i wiejskim na przykładzie Krakowa i Gaika-Brzezowej*, Folia Geographica, seria Geographica-Physica, 31–32, 85–99.

- Peterson J.T., 1971, *Climate of the city*, Man's impact on the environment, Mc Graw Hill, 131–154.
- Sisterson D.L., Driks R.A., 1978, *Structure of the daytime urban moisture field*, Atmospheric Environment, 12 (10), 1943–1949.
- Szymanowski M., 2004, *Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu*, Studia Geograficzne, 77, Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław.
- Tamulewicz J., 1997, *Pogoda i klimat Ziemi*, [w:] *Wielka encyklopedia geografii świata*, Wydawnictwo Kurpisz, Poznań.
- Twardosz R., 1996, *Wpływ obszarów zurbanizowanych na liczbę dni z opadem śladowym na przykładzie Krakowa*, [w:] A. Jankowski (red.), *Metody badań wpływu czynników antropogenicznych na warunki klimatyczne i hydrologiczne w obszarach zurbanizowanych*, Polskie Towarzystwo Geofizyczne, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Uniwersytet Śląski, Katowice, 175–183.
- Wawer J., 1998, *Zależność miejskiej wyspy ciepła od cyrkulacji atmosferycznej*, Acta Universitatis Lodzianensis, Folia Geographica Physica, 3, 45–50.
- Wypych A., 2007, *Wilgotność powietrza*, [w:] D. Matuszko (red.), *Klimat Krakowa w XX w.*, IGiP UJ, 113–125.
- Yoshino M., 1975, *Climate in a small area – an introduction to local meteorology*, University of Tokyo Press.

Characteristics of urban climate and the climate of Krakow

Summary

The objective of this study is to describe selected characteristics of the climate prevailing in Krakow, Poland, and to determine which of them reflect the features of urban climate. To achieve this, the paper draws on daily values of selected meteorological elements recorded between 2001 and 2010 at an urban weather station (Botanical Garden) and at a station located outside the city (Balice).

The key findings of the study include the fact that an essential property of urban climate, i.e. less solar radiation received by urban areas, was not observed in Krakow. On the other hand, the study did confirm the occurrence of the urban heat island and lower wind speeds in the city centre when compared to non-urban areas, which is attested to by the significantly higher number of calms in built-up areas. The data from Krakow also validate another distinguishing characteristic of urban climate, i.e. its drying nature, which is related to lower relative humidity values, a greater number of dry days and fewer days with fog. The study also revealed the occurrence of slightly

greater cloudiness in the city centre as compared to non-urban areas, which in turn translates into a higher number of days with storms and higher precipitation totals.

Keywords: urban climate, Krakow, urban heat island

Dorota Matuszko

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej

Uniwersytet Jagielloński

ul. Gronostajowa 7

30-387 Kraków

d.matuszko@uj.edu.pl

Katarzyna Piotrowicz

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej

Uniwersytet Jagielloński

ul. Gronostajowa 7

30-387 Kraków

k.piotrowicz@uj.edu.pl