

ROZWÓJ BADAŃ NAD KLIMATEM LOKALNYM KRAKOWA

Evolution of studies on local climate of Kraków

ANITA BOKWA* 

Zarys treści. Badania nad klimatem lokalnym Krakowa, realizowane po II wojnie światowej, opierały się na obserwacjach i pomiarach stacjonarnych na stacjach meteorologicznych i w punktach pomiarowych działających okresowo, na pomiarach mobilnych, a także na analizie danych sodarowych i satelitarnych. Zróżnicowana rzeźba terenu jest równie ważnym czynnikiem kształtującym klimat lokalny Krakowa jak użytkowanie/pokrycie terenu. Miejską wyspę ciepła należy rozpatrywać jako element struktury termicznej obszaru miasta i okolic w mezoskali, z uwzględnieniem inwersji temperatury powietrza i asymetrii termicznej doliny Wisły w Krakowie i okolicy. Pole opadów atmosferycznych jest znacząco zróżnicowane, głównie wskutek urozmaiconej rzeźby terenu. Sumy roczne opadu są wyższe w mieście niż poza miastem o ok. 80 mm, wyższa jest także liczba dni z opadem, ale dotyczy to tylko dni z sumą dobową poniżej 5 mm. Położenie Krakowa w dolinie Wisły i osłonięcie wypukłymi formami terenu od południa, północy i zachodu powoduje, że naturalna wentylacja pozioma i pionowa jest zła, co przyczynia się do częstego występowania ponadnormatywnych stężeń zanieczyszczeń powietrza. Średnia roczna prędkość wiatru w centrum miasta wynosi $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, a częstość cisz atmosferycznych sięga 30%.

Słowa kluczowe: klimat miasta, miejska wyspa ciepła, opady, promieniowanie słoneczne, rzeźba terenu, zdjęcia satelitarne

Abstract. Studies on local climate of Kraków conducted after the Second World War were based on observations and measurements at regular meteorological stations and at short-term measurement points, as well as on mobile measurements and analyses of sodar and satellite data. The diversified landform and the land use/land cover are equally important factors controlling the local climate of Kraków. The urban heat island should be studied as an element of the thermal structure of the city, in the meso-scale, including the impact of air temperature inversions and thermal asymmetry of the Vistula river valley in Kraków. Atmospheric precipitation is highly differentiated spatially due to the impact of relief. The annual totals are higher in the city than in the surrounding areas by about 80 mm; the number of days with precipitation is also greater but the latter is true only for daily totals below 5 mm. The location of Kraków in the Vistula river valley and the sheltering effect of the convex landforms to be found south, north and west of the city are the reason for poor natural horizontal and vertical ventilation, which in turn often generates air pollution concentrations above the acceptable levels. The mean annual wind speed in the city centre is $1.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, and the frequency of atmospheric calm reaches 30%.

Key words: urban climate, urban heat island, precipitation, solar radiation, land forms, satellite images

Wprowadzenie

Klimat miasta bywa rozumiany jako warunki klimatyczne określone na podstawie pomiarów z jednej stacji znajdującej się na terenie miasta, albo jako rozkład wybranych elementów meteorologicznych na obszarze miasta, lub też jako różnice w wartościach wybranych elementów między miastem i terenami pozamiejskimi (Warakomski 1984). W przypadku badań nad klimatem Krakowa stosowano wszystkie te podejścia. Niniejsza praca prezentuje rozwój koncepcji badawczych i metod stosowanych w badaniu klimatu Krakowa od XV w., kiedy poczyniono pierwsze udokumentowane ob-

serwacje warunków pogodowych w Krakowie, po czasy współczesne. Ponadto przedstawiono wybrane wyniki licznych badań, pozwalające scharakteryzować główne cechy klimatu Krakowa. Obecnie pojęcie „klimat miasta” jest definiowane głównie jako lokalne modyfikacje elementów klimatycznych pod wpływem oddziaływania zabudowy i funkcji miasta (np. Glossary of Meteorology 2018), co oznacza, że o klimacie miasta można mówić na podstawie pomiarów w co najmniej dwóch punktach: w mieście i poza miastem, dlatego też większa część niniejszej pracy będzie dotyczyć badań spełniających to założenie.

Najstarsze zapiski dotyczące pogody w Krakowie zostały poczynione przez Marcina Biema,

* Uniwersytet Jagielloński, Wydział Geografii i Geologii, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków; email: anita.bokwa@uj.edu.pl; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3809-7843>

profesora Akademii Krakowskiej (obecnie: Uniwersytet Jagielloński), w latach 1499–1540. Prowadził on codzienne notatki o pogodzie po łacinie na marginesach kalendarzy astronomicznych, przykładowo, dla daty 15.01.1529 r.: „opad śniegu i silny mróz”, 1.04.1529 r.: „sucho, częściowe zachmurzenie” (Bokwa, Limanówka 2000; Bokwa i in. 2001, Limanówka 2001). Materiały te zostały wykorzystane do rekonstrukcji klimatu Europy w XVI w. (Glaser i in. 1999). Pomiary meteorologiczne rozpoczęto w Krakowie w 1792 r. i są one prowadzone cały czas w tym samym miejscu, w dawnym Obserwatorium Astronomicznym UJ znajdującym się w Ogrodzie Botanicznym UJ („stacja historyczna”, klatka przy północnym oknie drugiego piętra budynku, 12 m nad poziomem gruntu), dzięki czemu Kraków ma jedną z najdłuższych serii pomiarowych w Polsce i Europie (Trepńska 1997). Od 1958 r. funkcjonuje ogródek meteorologiczny na terenie Ogródu Botanicznego ($h = 206$ m n.p.m., $\varphi = 50^{\circ}04'N$, $\lambda = 19^{\circ}58'E$). Większość prac, które w tytule nawiązują do warunków klimatycznych Krakowa prezentuje wieloletnie zmiany wybranych elementów klimatycznych w tym właśnie miejscu (np. Twardosz 2005; Matuszko 2009; Piotrowicz 2010), znajdującym się obecnie w centrum miasta, ale reprezentatywnym dla parków śródmiejskich (Lewińska i in. 1982; Trepńska 1991). Badano także fluktuacje klimatyczne (np. Trepńska 1997), gdyż stację uznano za reprezentatywną dla Europy Środkowej (np. Kożuchowski, Trepńska 1986a, b). Omówienie tych badań wraz z obszerną bibliografią można znaleźć w opracowaniach przeglądowych, np. Obrębska-Starkłowa, Trepńska (1999) i Matuszko (2007), natomiast poniżej przedstawiono wybrane prace dotyczące różnic między klimatem obszaru miejskiego i pozamiejskiego Krakowa.

Badania dotyczące zróżnicowania przestrzennego warunków klimatycznych w Krakowie i okolicy

Pierwsze prace dotyczące klimatu lokalnego Krakowa, rozumianego jako zróżnicowanie przestrzenne warunków klimatycznych na terenie miasta i okolic, zostały opublikowane po II wojnie światowej przez M. Hessa. Opracował m.in. warunki termiczne Krakowa w latach 1780–1963, posługując się jedynie wynikami pomiarów ze stacji klimatologicznej UJ w Ogrodzie Botanicznym i traktując całą serię pomiarową jako jednorodną.

Nie brał pod uwagę wpływu rozwoju miasta na pomiary temperatury prowadzone na tej stacji. Hess (1967a, b, 1974b) uważał także, że na podstawie danych z tej stacji pomiarowej można określić wieloletnią zmienność klimatu całego Krakowa. Zróżnicowanie przestrzenne warunków klimatycznych na terenie miasta uważał zaś za niezmiennie i możliwe do określenia za pomocą swojej metody wypracowanej dla wyróżniania pięter klimatycznych w polskich Karpatach Zachodnich (Hess 1965), bez uwzględniania oddziaływania struktury urbanistycznej. Ponadto, korzystając m.in. z wcześniejszych prac innych autorów, wykonanych w różnych okresach, wykazał różnice w opadach śniegu, kierunkach i prędkości wiatru, wilgotności względnej, liczbie dni pogodnych i pochmurnych oraz liczbie dni z mgłą między Krakowem i miejscowościami położonymi w obszarze nazwanym podregionem miasta Krakowa (Hess 1969) lub aglomeracją krakowską (Hess 1974a), a obejmującym teren od Smrokowa na północy po górę Lubień na południu i od Krzeszowic na zachodzie po Uście Solne na wschodzie, o zróżnicowaniu wysokości bezwzględnej od 180 do 900 m n.p.m. W takim ujęciu wykazane różnice klimatyczne wynikają ze znacznego zróżnicowania środowiska poszczególnych mezo-regionów, głównie rzeźby terenu i uchwycenie modyfikacji klimatu lokalnego związanej z oddziaływaniem miasta jest praktycznie niemożliwe. Wpływ miasta na klimat został jedynie zasygnalizowany w aspekcie jakościowym poprzez sprecyzowanie antropogenicznych czynników klimatotwórczych. Wiekowe zmiany poszczególnych elementów klimatycznych dokumentują wielkoskalowe zmiany i wahania klimatu w Polsce południowej, nie zaś wpływ miasta na klimat lokalny. Wskazują na to jedynie porównania wartości wymienionych powyżej elementów z wartościami ze stacji pozamiejskich, ale położonych relatywnie blisko miasta lub porównania z wartościami ze stacji położonych w różnych częściach miasta. Dyskusyjne wydaje się także założenie o niezmienności struktury przestrzennej klimatu miasta, ponieważ zachodzą zmiany powierzchni terenów zabudowanych. Ponadto zastosowanie metody wypracowanej dla wyróżniania pięter klimatycznych w polskich Karpatach Zachodnich do badania zróżnicowania klimatu lokalnego Krakowa jest zwłaszcza obecnie nieuzasadnione, gdyż metoda ta nie uwzględnia ani występowania inwersji temperatury, ani modyfikującego temperaturę wpływu zabudowy. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że w czasach kiedy powstawały wspomniane opracowania wiele terenów należących do Krakowa, które obecnie są zabudowane, było terenami wiejskimi (Bokwa 2010b).

Dorobek krakowskich klimatologów w zakresie badania zróżnicowania klimatu lokalnego Krakowa w latach 70. i 80. XX w. podsumowali Niedźwiedz i Obrębska-Starkłowa (1987). Jedyną pozycją traktującą kompleksowo o mezoklimacie tego miasta to opracowanie Lewińskiej i in. (1982). Zostało ono wykonane w okresie najintensywniejszego rozwoju przemysłu, zwłaszcza ciężkiego, kiedy to niektóre czynniki kształtujące klimat lokalny miasta były znacząco odmienne niż obecnie. Niestety, w późniejszych latach badania takie nie były kontynuowane. Na podstawie trzyletniej (10.1975–09.1978 r.) serii pomiarów w 18 punktach rozmieszczonych na terenie Krakowa oraz obszarach sąsiednich określono zróżnicowanie przestrzenne i czasowe temperatury oraz wilgotności powietrza, wiatru, ochładzania, a także zanieczyszczenia powietrza. Wykorzystano również wyniki pomiarów aktynometrycznych ze stacji UJ w Ogrodzie Botanicznym (1976–1978) i opadów atmosferycznych z lat 1951–1960 (Lewińska 1967). Dziś prace te mają charakter głównie historyczny, jako dokumentacja warunków klimatycznych Krakowa sprzed kilkadziesiąt lat, natomiast trudno je bezpośrednio wykorzystywać np. w obecnie powstających opracowaniach planistycznych (Bokwa 2010b). Od roku 2007 Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ prowadzi badania zróżnicowania temperatury powietrza na obszarze Krakowa i okolic (Bokwa 2010b; Bokwa 2011a, b; Bokwa i in. 2015b). W latach 2008–2010 był realizowany przez Uniwersytet Wrocławski i krakowskie IMGW projekt badawczy pt. „Zróżnicowanie przestrzenne warstwy granicznej atmosfery na przykładzie Wrocławia i Krakowa” (N 305 099 32 /3408). W Krakowie zasięg konwekcji i inwersji temperatury jest wyższy niż we Wrocławiu. Zróżnicowana rzeźba terenu wpływa na to, że warstwy dolne charakteryzują się skomplikowaną strukturą, świadczącą o zmiennym gradientie temperatury w profilu pionowym oraz istnieniu silniejszej turbulencji w obrębie nocnej warstwy granicznej. W Krakowie inwersje są bardziej długotrwałe niż we Wrocławiu, rozpad nocnej warstwy zachodzi wolniej, natomiast w sprzyjających warunkach konwekcja występuje jeszcze po zachodzie Słońca. Termiczne warstwy hamujące w Krakowie występują zdecydowanie częściej niż we Wrocławiu i obserwowana jest znacznie większa frekwencja i natężenie inwersji temperatury w południowej części miasta niż w północnej. Sprawia to, że zasięg inwersji odbiega daleko od modelowego, nawiązującego do kształtu doliny, a zmienność wysokości inwersji przygrunтовой jest zdecydowanie większa niż we Wrocławiu. Rozkład wysokości inwersji nie daje się wyjaśnić ani wpływem miasta,

ani tworzeniem się zastoiska chłodnego powietrza w dolinie Wisły. W obrazie struktury warstwy inwersyjnej nad czynnikiem urbanistycznym dominuje czynnik topograficzny. Oprócz asymetrii termicznej występuje asymetria wysokości warstwy mieszanania. Prawidłowa ocena warunków dyspersji zanieczyszczeń dla Krakowa jest problematyczna ze względu na dużą zmienność przestrzenną zasięgu warstwy mieszanania (Projekt... 2010).

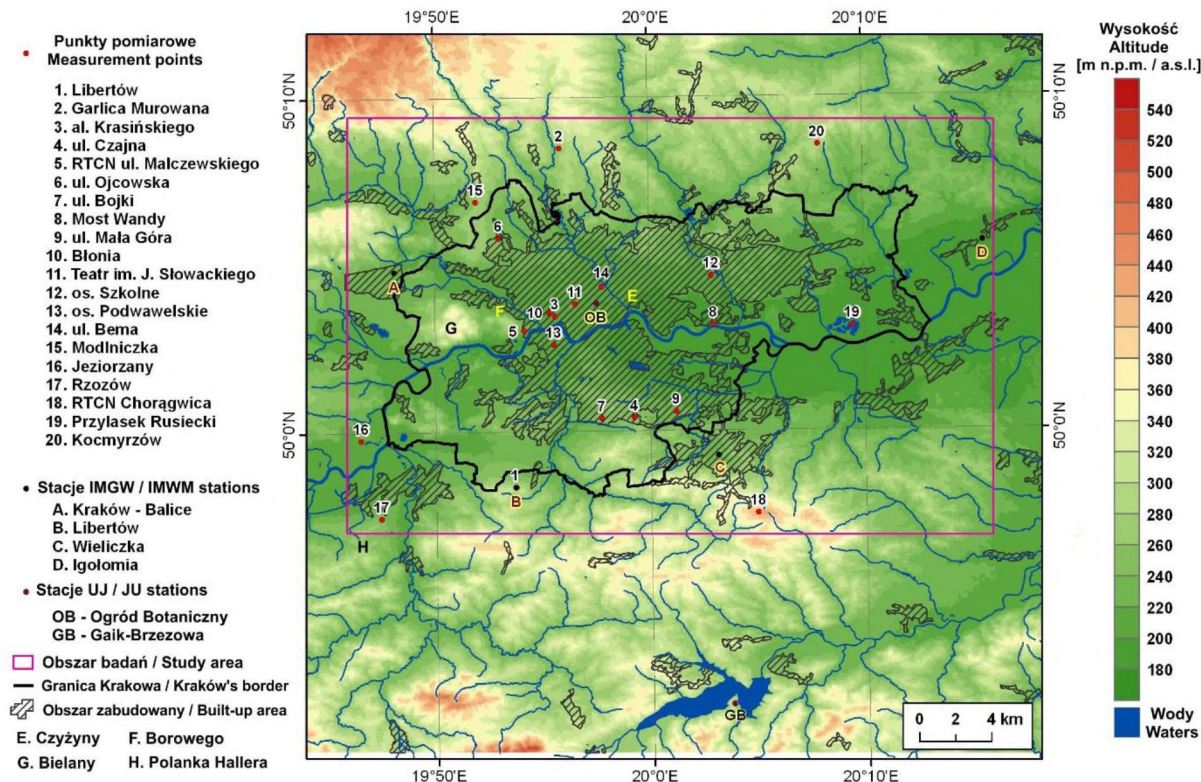
Miejska wyspa ciepła

Lewińska i Zgud (1980) na podstawie badań terenowych przeprowadzonych w latach 1975–1978 na 18 stacjach meteorologicznych rozmieszczonych na terenie Krakowa stwierdzili, że największe różnice temperatury występowały między zabudową śródmiejską a terenem pozamiejskim (do 2°C), mniejsze w przypadku zabudowy osiedlowej, najmniejsze dla parków (z wyjątkiem temperatury maksymalnej zimą). Amplitudy temperatury były w mieście znacznie niższe niż poza miastem. Termiczne lato trwało w śródmieściu o 25 dni dłużej niż poza miastem, zima zaś znacznie krócej niż na terenach zamiejskich. Wzrost intensywności miejskiej wyspy ciepła (MWC) wiązał się ze wzrostem amplitudy temperatury powietrza, wartości gradientu temperatury w profilu 100 m nad doliną oraz stężenia zanieczyszczeń pyłowych. Wzrost prędkości wiatru i zachmurzenia wywoływał spadek intensywności MWC, przy czym w zamkniętych układach urbanistycznych wpływ wiatru był nieistotny. Baścik i Zgud (1984) określili zróżnicowanie temperatury powietrza na ówczesnym osiedlu XXX-lecia w Krakowie na podstawie szczegółowych badań w ciepłym półroczu 1980 r., będących częścią projektu realizowanego w latach 1975–1980 i udokumentowanego w pracy Lewińskiej i in. (1982). Zauważyli tworzenie się w obrębie osiedla lokalnej MWC o strukturze komórkowej. Większe jej nasilenie miało miejsce nocą (do 2°C) niż w dzień (do 0,6°C).

Badania porównawcze temperatury powietrza między Ogrodem Botanicznym i Balicami (stacja lotniskowa, rys. 1) zostały wykonane na podstawie danych z lat 1966–1975 (Niedźwiedz i in. 1984). Średnie dobowe temperatury powietrza były w centrum miasta (Ogród Botaniczny) wyższe niż poza miastem (Balice): jesienią o 0,5°C i wiosną o 0,9°C. Średnie temperatury maksymalne były przez cały rok wyższe w centrum o 0,7°C, minimalne o 0,7–0,8°C. Poza miastem było o 6% więcej dni mroźnych zimą i 4–6% więcej przymrozków wiosną i jesienią na wysokości 200 i 5 cm n.p.g. Morawska-Horawska (1991) badając zmiany tempe-

ratury powietrza w Krakowie w latach 1881–1980 stwierdziła, że postępujący wzrost temperatury był skutkiem oddziaływania MWC i lokalnego efektu cieplarnianego, a nie wynikał z przyczyn o charakterze globalnym (np. globalnego ocieplenia). Do

podobnych wniosków doszedł później Kozuchowski (1995). Skrzypski i Kamiński (1998) stwierdzili natomiast, że MWC nie miała wpływu na wzrost wieloletnich wartości trendów zmian temperatury powietrza.



Rys. 1. Rozmieszczenie stacji meteorologicznych i punktów pomiarowych na terenie Krakowa i okolic (Bokwa 2010b, zmienione)

Location of meteorological stations and measurement points in Kraków and its vicinities (Bokwa 2010b, modified)

Drużkowski (1992) na podstawie danych z lat 1976–1985 z Ogrodu Botanicznego, Balic, Libertowa i Polanki Hallera (rys. 1) stwierdził, że MWC jest najintensywniejsza w zimie w dzień (śr. roczna $0,8^{\circ}\text{C}$). Małe różnice temperatury nocą były spowodowane położeniem stacji w Ogródku Botanicznym, gdzie mają miejsce sploty i stagnacja chłodnego powietrza. Oddziaływanie MWC było większe niż rzeźby terenu, czego dowodził zanik inwersji temperatury charakterystyczny dla wklęsłych form terenu. Kozuchowski (1995) porównując zmiany temperatury powietrza w Krakowie, Bochni, Wieliczce i Tarnowie w latach 1951–1990 ustalił, że średnia roczna temperatura Krakowa wzrastała o $0,24^{\circ}\text{C}$ na 10 lat, z $8,4^{\circ}\text{C}$ w 1951 r. do $9,4^{\circ}\text{C}$ w 1990 r. Różnica między średnią roczną temperaturą Krakowa a średnią dla pozostałych stacji wzrastała do końca lat 70. XX w., potem

nieco zmalała, co może być związane z panującym wtedy kryzysem gospodarczym (przy czym Lewińska (1996) interpretuje zmniejszenie się różnicy temperatury minimalnej między Krakowem a Wieliczką w latach 1951–1980 jako dowód na rozwój przestrzenny krakowskiej MWC). Poszerzenie analizy o dane z lat 1851–1950 pozwoliło stwierdzić, że w tym okresie, czyli przed rozwojem przemysłu Kraków był zazwyczaj chłodniejszy niż pozostałe stacje, zaś potem tendencja ta uległa odwróceniu. W świetle cytowanej powyżej pracy Drużkowskiego można zatem stwierdzić, że przed okresem intensywnego rozwoju przemysłowego główną rolę w kształtowaniu klimatu Krakowa odgrywała rzeźba terenu, natomiast później wpływy antropogeniczne. Kozuchowski (1995), w przeciwieństwie do Drużkowskiego (1992), twierdził, że MWC była w Krakowie najintensywniejsza latem,

gdyż wtedy występowały największe średnie miesięczne różnice temperatury między Krakowem a pozostałymi stacjami, przy czym Kozuchowski wykorzystywał dane ze Stacji Historycznej w Ogrodzie Botanicznym, zaś Drużkowski – z ogródka meteorologicznego tej stacji. Lewińska (1996) określiła średnią roczną intensywność krakowskiej MWC na $1,2^{\circ}\text{C}$, choć sporadycznie może ona osiągać nawet $5\text{--}7^{\circ}\text{C}$. Największa intensywność MWC występowała w chłodnej porze roku nocą (wg Drużkowskiego (1992) było to w zimie w dzień, a wg Kozuchowskiego (1995) – latem). Michniewski (2000) stwierdził, że średnia roczna temperatura minimalna w Ogrodzie Botanicznym i Balicach (rys. 1) w latach 1966–1995 wynosiła odpowiednio $4,5^{\circ}\text{C}$ i $3,7^{\circ}\text{C}$ i wykazywała podobne tendencje zmian z roku na rok, zawsze wyższe wartości występowały w Ogrodzie Botanicznym. W latach 1970–1974 prowadzono pomiary temperatury równocześnie na 3 stacjach w obrębie Krakowa: Bielany, ul. Borowego (siedziba krakowskiego oddziału IMGW) i Ogród Botaniczny (rys. 1). Najniższą średnią roczną temperaturę odnotowano na Bielanych ($8,1^{\circ}\text{C}$), najwyższą w Ogrodzie Botanicznym ($8,9^{\circ}\text{C}$), zaś na ul. Borowego średnia roczna temperatura powietrza wyniosła $8,3^{\circ}\text{C}$. Ujawnił się zatem zarówno wpływ rzeźby terenu, jak też MWC (Morawska-Horawska, Lewik 2003). Olejniczak (2001) porównał dobowe przebiegi temperatury powietrza w Ogrodzie Botanicznym w Krakowie i w Gaiku-Brzezowej na Pogórzu Wielickim (rys. 1) w latach 1991–1995. Miasto okazało się cieplejsze o około 2°C przede wszystkim wiosną i latem, w godzinach popołudniowych, a zatem są to wyniki znacząco odmienne od uzyskanych wcześniej przez Lewińską, co najprawdopodobniej wynika z usytuowania stacji w Ogrodzie Botanicznym (mało reprezentatywnym dla miasta).

Prekursorem studiów nad tworzeniem się inwersji termicznych nad Krakowem był W. Milata, co opisała w swojej pracy z 1959 r. jego żona (Milata 1959), także zaangażowana w te badania. Porównywał on dane z centrum Krakowa z danymi z Libertowa (rys. 1), dostrzegając problemy metodyczne wynikające ze specyficznego usytuowania stacji. Stwierdził występowanie inwersji przez około 200 dni w roku, przy średnim ich natężeniu $1,3^{\circ}\text{C}$ (Milata 1959). Dalsze prace realizowane w Krakowie w latach 70. i 80. XX w., a dotyczące roli inwersji temperatury w kształtowaniu poziomu zanieczyszczeń powietrza, były częścią badań dotyczących meteorologicznych uwarunkowań jakości powietrza w miastach i miały charakter prekursora w Polsce. Badania struktury termicznej dolnej części troposfery nad Krakowem, sięgającej do

wysokości 3000 m, zostały przeprowadzone w latach 1970 i 1972 z wykorzystaniem samolotu PZL 101 „Gawron”. Przyziemne termiczne warstwy hamujące mogą występować w Krakowie we wszystkich terminach pomiarowych. W układach wyżowych sięgają 50–800 m n.p.g., w niżowych 100–600 m n.p.g. Najczęściej osiągają miąższość 200 m (Morawska-Horawska 1978b). Na podstawie badań z lat 1975–1976 stwierdzono, że MWC redukowała dolne inwersje temperatury lub powodowała podniesienie ich pułapu. Nie stwierdzono znaczącego wpływu rzeki na pole temperatury w mieście z uwagi na znaczne podwyższenie temperatury wody na skutek zrzutów ciepłych wód z elektrociepłowni w Skawinie (Lewińska 1979). Zasięg pionowy MWC był badany w 1976 r. z wykorzystaniem meteorografu zainstalowanego na pokładzie samolotu. Ustalono, że latem sięgała ona około 200 m n.p.g., a około południa zanikała (Morawska-Horawska, Cebulak 1981). W latach 1978 i 1979 wykonywano w Krakowie badania struktury termicznej powietrza nad miastem w oparciu o sondy niskotroposferyczne wykonane przy użyciu balonu na uwięzi, w centrum miasta i na terenie pozamiejskim, do wysokości 500 m n.p.g. oraz pomiarów naziemnych na stacjach rozmieszczonych na różnych wysokościach ponad dnem doliny (Lewińska, Zgud 1980; Lewińska 1984). Obie metody dały zbliżone rezultaty. Ustalono, że MWC i inwersja temperatury mogą występować równocześnie. Zasięg MWC w Krakowie wynosił 100–200 m w półroczu chłodnym i powyżej 200 m w półroczu ciepłym. Wysokość warstwy inwersyjnej osiągnęła maksymalnie 300 m rano i 100 m wieczorem. Emisja ciepła antropogenicznego w warstwie dachowej powodowała wzrost częstości niskich (około 50 m) inwersji temperatury powietrza nad miastem, nawet w godzinach okołopołudniowych, czego nie zaobserwowano na terenach pozamiejskich. Badania struktury pionowej powietrza na terenie Krakowa prowadzone do początku lat 90. XX w. podsumował Walczewski (1994). Podkreślił, że różni autorzy zwracali uwagę na częste występowanie w Krakowie inwersji całodobowych, a średnią miąższość inwersji dolnych oceniano na 60–200 m. Obserwacje sodarowe prowadzone od 1980 r. przez Zakład Teledetekcji Atmosfery IMGW w Krakowie-Czyżynach pozwoliły stwierdzić, że nawet przez 20% dni w roku może w Krakowie występować całodzienna dolna inwersja temperatury lub nisko położona inwersja wzniesiona. Szczególnie często zdarza się to zimą, przy czym wskaźniki te wykazują duże wahania z roku na rok. Nocą w dolinie Wisły najczęściej występuje równowaga stała atmosfery i dlatego w 86% przypadków obserwo-

wano inwersje temperatury. Podczas pozostałych 14% nocy panowała równowaga obojętna. W Krakowie przeważały niskie inwersje sięgające 150–300 m, powyżej których obserwowano inwersje wzniesione. Niskie położenie warstwy inwersyjnej jest charakterystyczne głównie dla półroczia chłodnego, zaś latem przy intensywnej konwekcji warstwa ta mogła występować nawet na wysokości 800 m (Walczewski 1984, 1994; Walczewski i in. 2000). Dębicka (1998) analizując wyniki kompleksowego eksperymentu „Kraków 94/95”, ustaliła, że w latach 1994–1995 w Krakowie w 200-metrowej warstwie powietrza równowaga stała występowała w 65% przypadków zimą i w 70% latem, natomiast dane z lat 1991–1997, dotyczące częstości występowania dni z zaleganiem warstwy dolnej od wschodu do zachodu Słońca (w procentach czasu obserwacji) wykazały, że całodienne warstwy dolne występują przede wszystkim w porze chłodnej (do 54%), a w pozostałych miesiącach sięgają 7% czasu obserwacji (Dębicka 1999). Analiza danych sodarowych z miejskiej stacji meteorologicznej IMGW w Krakowie (Czyżyny) z lat 2003–2008 potwierdziła, że najczęściej obserwuje się równowagę stałą atmosfery, a udział takich sytuacji sięga od ok. 50% w miesiącach letnich do ponad 70% w miesiącach zimowych (Hajto, Rozwoda 2010). Badania Godłowskiej i in. (2008) pozwoliły stwierdzić spadek wysokości stężeń zanieczyszczeń powietrza w Krakowie wraz ze wzrostem wysokości konwekcji i inwersji dolnych. Największe stężenia obserwowano przy inwersjach dolnych nakrytych inwersjami wzniesionymi o wysokości poniżej 150 m. Występowanie opadu odgrywa ograniczoną rolę w obniżaniu imisji zanieczyszczeń. Pionowe gradienty temperatury w warstwie powietrza 12 m n.p.g. w Ogrodzie Botanicznym badano w sezonie jesienno-zimowym w I i II terminie pomiarowym, w latach 1988–1998, w zależności od typów cyrkulacji atmosferycznej. Inwersja w całym profilu o godz. 06 UTC występowała przy sytuacjach cyklonalnych i antycyklonalnych z adwekcją powietrza z kierunków S i W. Rano przeważało uwarstwienie inwersyjne, w południe insolacyjne (Trepińska, Skublicka 2001; Skublicka 2003a, b).

Bokwa (2010b) podjęła badania terenowe (parz: punkty pomiarowe, rys. 1) i analizy, które pokazały, że MWC w przypadku Krakowa należy rozpatrywać jako element struktury termicznej obszaru miasta i okolic w mezoskali, z uwagi na znaczny wpływ rzeźby terenu na kształtowanie stosunków termicznych obszaru. W pracy Bokwy i in. (2015b) zaprezentowano koncepcję R_{MUHI} (*Relief-modified UHI*). Największa intensywność

MWC, wyznaczana osobno dla poszczególnych stref wysokościowych miasta, występuje nocą, latem – przy pogodzie bezchmurnej i bezwietrznej, i osiąga wtedy średnio od 6,6°C (dno doliny, różnica temperatury między zabudową śródmiejską a obszarem pozamiejskim w zachodniej części doliny) do 1,4°C (50 m powyżej dna doliny, północna część miasta, różnica: zabudowa willowa – obszar pozamiejski w zachodniej części doliny). Natomiast na podstawie wspomnianych pomiarów IGiGP UJ w latach 2010–2014 można stwierdzić, że średnia roczna intensywność MWC wynosi odpowiednio: 1,3°C i 0,4°C. Niewielka zmiana lokalizacji stacji w Balicach w sierpniu 2005 r. spowodowała zerwanie homogeniczności serii niektórych elementów meteorologicznych, np. temperatury powietrza, co utrudnia wykorzystanie danych z tej stacji pozamiejskiej do badania MWC (Bokwa 2016). Bokwa i in. (2018a) przeanalizowali wpływ występowania mgły na MWC w Krakowie. Stwierdzono, że mgła obniża intensywność MWC o ok. 1°C, ale jedynie w czasie pogody bezchmurnej lub z małym zachmurzeniem, z ciszą atmosferyczną lub słabym wiatrem, w czasie wyżowych sytuacji synoptycznych i tylko w dnie doliny Wisły. Wraz ze wzrostem zachmurzenia i prędkości wiatru, rola mgły maleje i jest podobna we wszystkich strefach wysokościowych miasta.

Zjawisko MWC kształtowane jest przede wszystkim przez oddziaływanie podłoża na temperaturę powietrza, a można je rozpatrywać jako MWC atmosferyczną i powierzchniową. Rozwój technik satelitarnych pozwolił na podjęcie analiz zróżnicowania przestrzennego temperatury powierzchni Krakowa i okolic. Matuszko i Wojkowski (2007) przedstawili rozkład temperatury radiacyjnej powierzchni Krakowa w dniu 6.07.2001 r. w godzinach okołopołudniowych i stwierdzili, że najcieplejszy był obszar Starego Miasta i Nowej Huty, zaś najchłodniejsze – akweny wodne i tereny zalesione. Wojkowski (2008) udokumentował istotne związki pomiędzy typem użytkowania i pokryciem terenu a temperaturą radiacyjną powierzchni ziemi na terenie Krakowa. Walawender i Hajto (2009) porównali obrazy uzyskane z analizy materiałów pochodzących z czterech różnych satelitów, przedstawiające temperaturę podłoża w Krakowie i w sąsiadujących z nim mezoregionach w dniu 22.07.2007 r. Zdjęcia wykonano przed południem i porównanie wyników wskazuje na znaczące różnice między analizowanymi materiałami, zależne od wykorzystanych algorytmów. Wszystkie obrazy pokazują jednak, że na obszarze Krakowa najcieplejsze podłoże obserwowano na Starym Mieście

i w Nowej Hucie. Wskazują one także, że poza Krakowem, na obszarach rolniczych, temperatura podłoża może być równie wysoka. Podstawowym problemem z punktu widzenia badania klimatu miasta jest brak danych satelitarnych z godzin nocnych, a weryfikacja przydatności wspomnianych algorytmów wymaga porównania otrzymanych obrazów z pomiarami naziemnymi. Walawender i in. (2014) wykorzystali dane Landsat ETM+ do określenia zróżnicowania termicznego terenu Krakowa i okolic. Stwierdzono, że ok. 30% obszaru miasta można określić jako termicznie stabilne, ok. 16% powierzchni miasta jest zawsze cieplejsze niż otoczenie, a kolejne 16% – chłodniejsze. Wyodróżniono i przeanalizowano 7 regionów miasta zaklasyfikowanych jako gorące i zimne.

Warunki radiacyjne

Hess i in. (1980) porównali warunki aktywności w centrum Krakowa i na terenie pozamiejskim, w Gaiku-Brzezowej (rys. 1), w latach 1968–1975. Przezroczystość atmosfery w mieście była znacznie mniejsza niż poza miastem. Wpływ zanieczyszczenia powietrza na stosunki radiacyjne określono dokonując pomiarów w warunkach pogody bezchmurnej. Stwierdzono zmniejszenie natężenia bezpośredniego promieniowania słonecznego w Krakowie w porównaniu z terenem pozamiejskim o 12–13% latem, 19% jesienią i 26% zimą. Jednocześnie zanotowano zwiększenie natężenia promieniowania rozproszonego o 10–14% wiosną i jesienią oraz 17–20% latem i zimą. Promieniowanie całkowite było w Krakowie mniejsze o 3–6% w półroczu letnim, o 8% jesienią i 14% zimą. Niedźwiedz i in. (1984) wykonali badania porównawcze natężenia promieniowania słonecznego na stacjach w Ogrodzie Botanicznym i w Balicach w latach 1966–1975. Do centrum miasta docierało o 3–6% mniej promieniowania całkowitego latem, 8% na wiosnę i jesienią oraz 15% w zimie. Promieniowanie bezpośrednie było w centrum mniejsze o 12–13% latem, 19% w przejściowych porach roku i 26% w zimie. Promieniowanie rozproszone było w centrum większe o 10–14% na wiosnę i w jesieni oraz 17–20% w zimie i latem. Hess i Olecki (1990a, b) stwierdzili, że w latach 1968–1985 promieniowanie bezpośrednie było w Krakowie o 17% mniejsze niż w Gaiku-Brzezowej (latem 15%, zimą 40%), promieniowanie rozproszone większe o 7% (latem 20%), całkowite zaś mniejsze o 10–25% zimą i 2–7% latem. Olecki (1992) zbadał zmiany współczynnika przezroczystości atmosfery w Krakowie i na stacji pozamiejskiej w Gaiku-Brze-

zowej w latach 1968–1985. W Gaiku-Brzezowej występowały regularne zmiany w ciągu roku (wyższe wartości zimą), bez wyraźnej tendencji wieloletniej. W Krakowie przezroczystość powietrza była cały rok mniejsza, nie zaobserwowano zmian sezonowych, a wartości współczynnika były silnie zależne od zanieczyszczenia powietrza. Badania usłonecznienia w Krakowie w latach 1884–1990 (Obrębska-Starkłowa i in. 1997) dowiodły, że w drugiej połowie XX w. sumy roczne usłonecznienia były o ponad 110 godzin mniejsze niż poza miastem (10%). Zimą różnica ta wzrosła do 40%. Prawdopodobnie główną przyczyną były zanieczyszczenia powietrza osłabiające dopływ promieniowania bezpośredniego.

W pracy Bokwy i Matuszyka (2007) porównano dane dotyczące natężenia promieniowania całkowitego w Krakowie i Gaiku-Brzezowej z lat 1966–1975 (pomiaru tradycyjne) i z 2004 r. (pomiaru automatyczne). W pierwszym okresie w Krakowie występowało duże zanieczyszczenie powietrza, a stacja w Gaiku-Brzezowej znajdowała się wtedy w dnie doliny. W 2004 r. stan aerosanitarny powietrza w Krakowie był znacznie lepszy, zaś stacja w Gaiku była już przeniesiona na wierzchowinę, znajdującą się nad brzegiem Zbiornika Dobczyckiego. W 2004 r. wyższe wartości promieniowania całkowitego w Gaiku niż w Krakowie występowały tylko przez część doby, w godzinach południowych i popołudniowych, podczas gdy we wcześniejszym okresie – najczęściej przez cały dzień. W przebiegu rocznym w 2004 r. nie ma wzrostu wartości różnic między stacjami w miesiącach zimowych, charakterystycznego dla wcześniejszego okresu. Matuszko (2009) przeanalizowała zmienność usłonecznienia i natężenia promieniowania słonecznego w centrum Krakowa w okresie 1884–2007, w zależności od zachmurzenia, w kontekście regionalnym.

Opady i osady atmosferyczne, pokrywa śnieżna

Zróżnicowanie przestrzenne opadów w Krakowie i okolicy w latach 50. i 80. XX w. było badane głównie przez J. Lewińską (Lewińska 1967; Lewińska i in. 1990). W latach 1956–1960 prowadzono pomiary opadów w 65 punktach zlokalizowanych na terenie miasta i do 20 km od jego granic, zaś w latach 1983–1984 liczba punktów pomiarowych zmniejszyła się do 36. Chociaż w latach 80. XX w. Kraków miał dwukrotnie więcej mieszkańców niż w latach 50. i trzykrotnie większy obszar, wyniki z obu okresów pomiarowych są zbliżone. Największe roczne sumy opadów zano-

towano na wypukłych formach terenu w zachodniej i południowej części obszaru oraz w centrum miasta. W obrębie doliny Wisły stwierdzono różnicę rzędu 100 mm między otrzymującą więcej opadów częścią zachodnią i otrzymującą ich mniej częścią wschodnią. W samym mieście opady także były znacznie zróżnicowane, od 600 do 850 mm rocznie (wartości średnie z okresu 1956–1960). Wielkość różnicy między opadami w mieście i poza miastem przyjmowała różne wartości, zależnie od tego, jakie stacje miejskie i pozamiejskie porównywano. Lewińska wyjaśniła zaobserwowane zróżnicowanie przestrzenne opadów wpływem miasta, ale podkreśliła, że wpływ rzeźby terenu jest czynnikiem o większym znaczeniu niż obecność obszaru zurbanizowanego.

Prace innych badaczy potwierdziły wyniki uzyskane przez Lewińską. W latach 1970–1974 prowadzono pomiary opadów atmosferycznych równocześnie na 3 stacjach w obrębie Krakowa: Bielany, ul. Borowego i Ogród Botaniczny. Średnia roczna suma opadu była największa na Bielanach (834 mm), najmniejsza przy ul. Borowego (667 mm), zaś w centrum miasta wyniosła 703 mm. Potwierdziło to znaczny wpływ zróżnicowania terenu Krakowa na rozkład przestrzenny opadów. Stacja przy ul. Borowego leży w cieniu opadowym, zaś w centrum miasta parowanie opadów w trakcie ich trwania jest większe niż poza miastem. Zdarzało się, że opady nie występowały na wszystkich stacjach w tym samym czasie (Morawska-Horawska, Lewik 2003). Badania porównawcze sum opadów między Ogrodem Botanicznym a Balicami zostały wykonane na podstawie danych z lat 1966–1975 (Niedźwiedz i in. 1984). Średnie dobowe sumy opadów we wszystkich porach roku były na obu stacjach takie same, z wyjątkiem lata, kiedy w centrum były większe o 0,2 mm, prawdopodobnie wskutek wzmożonej częstości opadów o charakterze burzowym. Obrębska-Starkłowa i in. (1997) stwierdzili, że oddziaływanie miasta na opady latem polega na generowaniu gwałtownych ulew wskutek intensywnego rozwoju chmur konwekcyjnych, zaś zimą zwiększona zawartość jąder kondensacji powoduje silne, krótkotrwałe i lokalne opady śniegu. Średnia roczna suma w latach 1850–1995 wyniosła 670 mm. Twardosz (1996) badał liczbę dni z opadem śladowym w Krakowie i okolicznych stacjach w latach 1863–1995. Średnia dla Krakowa wynosiła 22 dni, przy czym w latach 1863–1956 było to 13 dni, a w latach 1957–1995 aż 44 dni. Przyczyną tego zjawiska mogło być znaczne zwiększenie w tym okresie ilości zanieczyszczeń powietrza i nasilenie procesów konwek-

cyjnych na skutek dużej emisji ciepła sztucznego, zwłaszcza z zakładów przemysłowych. Od 1985 r. zaobserwowano tendencję spadkową. Najczęściej opady takie zdarzały się zimą. W Krakowie było o 50–300% więcej dni z opadem śladowym niż poza miastem. W Garlicy Murowanej, położonej tuż za północną granicą miasta, w południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej, średnia roczna suma opadu w wieloleciu 1961–2000 wyniosła 613 mm, a liczba dni z opadem 127. Były to wartości mniejsze niż w Krakowie, co autorzy tłumaczyli wpływem zanieczyszczeń powietrza na tworzenie się dodatkowych opadów w Krakowie (Olechnowicz-Bobrowska i in. 2005).

W Krakowie, w czasie występowania wysokich stężeń zanieczyszczenia powietrza mogą się pojawić lokalne opady atmosferyczne (Dworak i in. 2000). Lewińska (1967) w latach 1951–1960 stwierdziła większą sumę roczną opadów w mieście niż poza miastem. Poza miastem wahały się one od 500 do 700 mm, a w mieście przekraczały w niektórych obszarach 800 mm, co można wiązać z dużym zanieczyszczeniem powietrza w Krakowie w tamtych latach. Jak pisała Morawska-Horawska (1980), 8.12.1978 r. przez 7 godzin wystąpił w Krakowie słaby opad śniegu mimo warunków synoptycznych niesprzyjających utworzeniu się opadu. Został on wywołany prawdopodobnie wysokim stężeniem pyłu zawieszonego i SO₂. Wiatrak (1984) stwierdził częste występowanie opadów pochodzenia przemysłowego w rejonie Huty im. Lenina. Szczególnie intensywny był opad śniegu 21.02.1980 r.

Bokwa (2010a) przeanalizowała dane opadowe z 4 stacji pomiarowych w Krakowie i okolicy (jedna miejska i trzy pozamiejskie) w okresie 1971–2005. Lata 1972–1988 charakteryzowało znacznie większe zanieczyszczenie powietrza niż okres 1989–2005, kiedy było ono o ok. 80% niższe. Nie stwierdzono wpływu zmiany zanieczyszczenia powietrza na zróżnicowanie przestrzenne sum opadów na badanym terenie (średnie sumy roczne wyniosły od 659,3 mm w centrum miasta do 585,9 mm w Garlicy Murowanej), ponadto wykazano brak istotnych statystycznie trendów zmian sum opadów w okresie 1971–2005 z wyjątkiem opadów zimowych w Igołomi i jesiennych w Krakowie. Liczba dni z opadem jest wyższa w mieście niż poza miastem, ale dotyczy to tylko dni z sumą dobową poniżej 5 mm, natomiast spadek zanieczyszczenia powietrza po 1989 r. spowodował zmiany w strukturze przestrzennej dni z opadem powyżej 5 mm wiosną i jesienią, ale nie znalazło to odbicia w zmianie sum opadów.

Zestawienia warunków śnieżnych w centrum miasta z warunkami w strefie podmiejskiej oraz poza miastem nie uwidaczniają jednoznacznie wpływu MWC na pokrywą śnieżną (Falarz 1998; Pajek 2000–2001). Zaznacza się jedynie zmniejszenie ujemnej tendencji grubości pokrywy śnieżnej po roku 1960 poza miastem w porównaniu z jego centrum.

Bokwa i in. (2018b) przeanalizowali występowanie mgły w Krakowie i okolicy w latach 1966–2015. Roczna liczba dni z mgłą zmalała w badanym okresie o ok. 60%, przy czym spadek był większy w mieście niż poza miastem. Wykazano istotną zależność między występowaniem mgły i poziomem zanieczyszczenia powietrza. Natomiast po znacznym spadku zanieczyszczenia powietrza w 1989 r., czynniki naturalne nabrały większego znaczenia, zwłaszcza spadek liczby dni z małą prędkością wiatru i liczby dni z wilgotnością względną $\geq 80\%$ i $\geq 95\%$. Nie wykazano wpływu MWC na częstość występowania mgły, gdyż nie wykazano zmian w intensywności MWC w najniższej części doliny, w której badano występowanie mgły. W ramach projektu badawczego 2012/05/B/ST10/00437 i N N305 231035, koordynowanych przez Uniwersytet Wrocławski, w 2009 r. przeprowadzono badania występowania rosy w Krakowie i Gaiku-Brzezowej (teren pozamiejski) oraz chemizmu rosy. Stwierdzono istotny wpływ miejskiego użytkowania terenu na ograniczenie ilości rosy w mieście w porównaniu z terenem pozamiejskim, a także znacznie większe stężenia zanieczyszczeń w próbkach rosy pobranych w mieście (Muskala i in. 2015).

Warunki anemologiczne

Pole wiatru w Krakowie było od dawna przedmiotem zainteresowania licznych badaczy, głównie w kontekście dyspersji zanieczyszczeń powietrza na terenie miasta. Położenie Krakowa we wklęsłej formie terenu utrudnia naturalne przewietrzanie miasta, a sama struktura miasta zwiększa szorstkość podłoża w porównaniu z terenem pozamiejskim. Lewińska i in. (1982) oraz Walczewski i in. (2000) stwierdzili, że średnia roczna prędkość wiatru w Krakowie wynosiła około $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i przez około 50% dni w roku nie przekraczała tej wartości, co oznacza przewagę słabych warunków wentylacji poziomej. Według Hessa i Oleckiego (1990b) cisze atmosferyczne miały udział równy około 20–30%, a tylko 35% wiatrów miało prędkość powyżej $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. W okresie 2001–2010 średnia prędkość wiatru w Ogródku Botanicznym wynosiła $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, natomiast w Balicach $2,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Na obu stacjach przeważały wiatry z sektora zachodniego i wschodniego (Ogród Botaniczny: W – 19,7%, WNW – 10,0%, E – 9,3%; Balice: WSW – 21,5%, ENE – 17,8%, W – 10,0%) (Matuzko i in. 2015). Przegląd prac dotyczących pomiarów anemometrycznych w Krakowie do końca XX w. zawiera praca Kowanetza (2007).

Tomaszewska (1994), badając zależność stężeń zanieczyszczeń atmosfery od elementów meteorologicznych w sezonie grzewczym 1992/1993, stwierdziła, że w przebiegu dobowym występowały 2 maksima (ranne w godz. 9–10 i popołudniowe w godz. 17–20). Wzrost prędkości wiatru nie we wszystkich punktach miasta powodował zmniejszenie stężeń, np. w Podgórzu. Silniejsze wiatry z kierunków NE i NW przynosiły zanieczyszczenia z odleglejszych źródeł emisji. Morawska-Horawska (1978a) badała natomiast pionowy rozkład kierunków wiatru nad Krakowem. Stwierdziła, że zimą, kiedy panują zazwyczaj sytuacje sprzyjające występowaniu dużych wartości stężeń zanieczyszczeń powietrza, dzięki istniejącej przewadze wiatrów SW, zanieczyszczenia powietrza emitowane przez Hutę im. Lenina odprowadzane były najczęściej poza obręb miasta. Bokwa (2010b) przeanalizowała dane anemologiczne ze stacji w Garlicy Murowanej, Balicach, Libertowie i Igołomi (rys. 1) z godzin nocnych (21–3 UTC) z okresu 07.2007–06.2009 r. W Garlicy, Balicach i Igołomi udział wiatrów o prędkości $\geq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ w czasie wszystkich nocy wynosił około 25–35%, a $\geq 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ – 10–20%. Libertów wykazywał wyraźną odmienną w porównaniu z pozostałymi stacjami (odpowiednio 48% i 28%). Analiza przeprowadzona dla nocy z dużymi różnicami temperatury na obszarze krakowskim pokazała, że ich występowaniu sprzyjają warunki ze słabym wiatrem lub ciszą atmosferyczną, przy czym wystarczy, aby takie warunki panowały jedynie w dolinie Wisły, zaś występowanie w tym samym czasie wyższych prędkości wiatru na pobliskiej wierzchołku nie powoduje zmniejszenia kontrastów termicznych. W Libertowie i Igołomi częstość ciszy atmosferycznych wynosiła 0,1–0,2%, a w Balicach 23,4%.

W latach 2014–2016 Urząd Miasta Krakowa i IMGW realizowały projekt „Zintegrowany system monitorowania danych przestrzennych dla poprawy jakości powietrza w Krakowie” dofinansowany ze środków Mechanizmu Finansowego Europejskiego Obszaru Gospodarczego 2009–2014. Efektem jest publikacja pod redakcją Bajorek-Zydroń i Wężyka (2016). Na podstawie pomiarów z roku 2013 i analiz modelowych wyznaczono obszary wymiany powietrza gdzie średnia roczna

prędkość wiatru na 10 m przekracza $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, natomiast nie stwierdzono występowania tzw. korytarczy przewietrzania.

Podsumowanie

Klimat lokalny Krakowa jest przedmiotem studiów licznych badaczy od wielu lat, a mimo to wciąż pozostają zagadnienia wymagające dalszych badań i analiz. Przykładowo, w półroczu chłodnym dużym problemem jest zła jakość powietrza, w znacznym stopniu warunkowana sytuacją pogodową. Kluczowego znaczenia nabiera zatem szczegółowe rozpoznanie pola wiatru na terenie miasta i okolic, w różnych sytuacjach pogodowych, z uwzględnieniem zjawisk lokalnych, jak np. spływy katabatyczne. Natomiast w okresie letnim coraz częściej zdarzają się fale upałów i ważne jest rozpoznanie zróżnicowania przestrzennego biometeorologicznego obciążenia ciepłem. Rozpoznanie rozkładu przestrzennego jest konieczne nie tylko do określenia stopnia narażenia mieszkańców na poszczególne czynniki, ale także dla analiz dotyczących przyczyn kształtowania się tych różnic i planowania przestrzennego. W przypadku Krakowa uzyskanie ciągłego rozkładu przestrzennego zarówno elementów meteorologicznych, jak też wskaźników np. bioklimatycznych w skali lokalnej jest dużym wyzwaniem. Wynika to z ich dużej zmienności przestrzennej będącej skutkiem nakładania się oddziaływania procesów generowanych z jednej strony przez urozmaiconą rzeźbę terenu, a z drugiej przez miejską mozaikę użytkowania/pokrycia terenu. Konieczne jest zatem wykorzystanie odpowiednich modeli klimatycznych oraz weryfikacja uzyskanych wyników poprzez porównanie z danymi pomiarowymi, pochodzącymi z punktów pomiarowych reprezentujących zarówno różne formy rzeźby terenu, jak też różne rodzaje użytkowania/pokrycia terenu. Badania takie, podjęte dotychczas (np. Bokwa i in. 2015a, Bajorek-Zydroń, Wężyk 2016, Sekuła 2017) wskazują, że konieczne jest interdyscyplinarne podejście do tego zagadnienia. Z jednej strony bowiem takie badania wymagają modyfikacji istniejących modeli lub konstrukcji nowych, a z drugiej – dobrej znajomości specyfiki środowiska przyrodniczego Krakowa i okolic.

Literatura

- Bajorek-Zydroń K., Wężyk P. (red.) 2016. Atlas pokrycia terenu i przewietrzania Krakowa. Urząd Miasta Krakowa, Kraków: 1-522.
- Baścik J., Zgud K. 1984. Ocena warunków klimatycznych zespołu mieszkaniowego na przykładzie osiedla XXX-lecia PRL w Krakowie. *Biuletyn Instytutu Kształtowania Środowiska* 3-4.
- Bokwa A. 2010a. Effects of air pollution on precipitation in Kraków (Cracow), Poland in the years 1971–2005. *Theoretical and Applied Climatology* 101, 3-4: 289-302.
- Bokwa A. 2010b. Wieloletnie zmiany struktury mezo-klimatu miasta na przykładzie Krakowa. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 1-258.
- Bokwa A. 2011a. Impact of relief on air temperature in urban area. *Prace i Studia Geograficzne* 47: 347-354.
- Bokwa A. 2011b. The Urban Heat Island in Kraków, Poland: Interaction between Land Use and Relief. *Moravian Geographical Reports* 19, 3: 2-7.
- Bokwa A. 2016. Klimat Krakowa. W: K. Bajorek-Zydroń, P. Wężyk (red.) *Atlas pokrycia terenu i przewietrzania Krakowa*. Urząd Miasta Krakowa, Kraków: 19.
- Bokwa A., Limanówka D. 2000. Weather observations carried by Michał of Wiślica in Cracow in the years 1527–1551. *Prace Geograficzne IG UJ* 105: 9-18.
- Bokwa A., Matuszyk K. 2007. Zmiany promieniowania całkowitego w Krakowie i Gaiku-Brzezowej. *Pamiętnik Puławski* 144: 5-12.
- Bokwa A., Dobrowolny P., Gal T., Geletic J., Gulyas A., Hajto M.J., Hollosi B., Kielar R., Lehnert M., Skarbit N., Stastny P., Svec M., Unger J., Vysoudil M., Walawender J.P., Zuvela-Aloise M., Burian L. 2015a. Modelling the impact of climate change on heat load increase in Central European cities. 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, 20-24 July 2015, Toulouse, France, Presentations. Wyd. International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, American Meteorological Society, Centre National de la Recherche Scientifique, MeteoFrance: 1-5.
- Bokwa A., Hajto M.J., Walawender J.P., Szymanowski M. 2015b. Influence of diversified relief on the urban heat island in the city of Kraków, Poland. *Theoretical and Applied Climatology* 122, 1: 365-382.
- Bokwa A., Limanówka D., Wibig J. 2001. Pre-instrumental weather observations in Poland in the 16th and 17th centuries. W: P.D. Jones, A.E.J. Ogilvie, T.D. Davies, K.R. Briffa (red.) *History and Climate: Memories of the Future?* Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, Boston Dordrecht, London, Moscow: 9-27.

- Bokwa A., Wypych A., Hajto M. 2018a. Role of Fog in Urban Heat Island Modification in Kraków, Poland. *Aerosol and Air Quality Research* 18: 178-187.
- Bokwa A., Wypych A., Hajto M. 2018b. Impact of Natural and Anthropogenic Factors on Fog Frequency and Variability in Kraków, Poland in the Years 1966–2015. *Aerosol and Air Quality Research* 18: 165-177.
- Dębicka K. 1998. Pionowe gradienty temperatury w obszarze sodarowych ech warstw dolnych – analiza serii pomiarów. *Wiadomości IMGW XXI (XLII)*, 1: 161-166.
- Dębicka K. 1999. Częstotliwość występowania dni z całodziennymi inwersjami w Krakowie. *Wiadomości IMGW XXII (XLIII)*, 3: 93-105.
- Drużkowski M. 1992. Wpływ ukształtowania terenu i miejskiej wyspy ciepła na stosunki termiczne Krakowa i okolic. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 23: 55-63.
- Dworak Z., Polański B., Ziobroń A. 2000. Zmiany elementów meteorologicznych w aglomeracjach miejskich pod wpływem zanieczyszczeń atmosferycznych (na przykładzie Krakowa). *Przegląd Geofizyczny XLV*, 1: 63-69.
- Falarz M. 1998. Wieloletnia zmienność pokrywy śnieżnej w Krakowie na tle zmian w obszarach podmiejskich. *Acta Geographica Lodziensia, Folia Geographica Physica* 3: 473-481.
- Glaser R., Brázdil R., Pfister C., Dobrovolný P., Barriendos Vallvé M., Camuffo D., Kotyza O., Bokwa A., Limanówka D., Rácz L., Rodrigo F.S. 1999. Seasonal temperature and precipitation fluctuations in selected parts of Europe during the sixteenth century. *Climatic Change* 43, 1: 169-200.
- Glossary of Meteorology. 2018. American Meteorological Society, http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page [dostęp: 28.07.2018]
- Godłowska J., Tomaszewska A.M., Hajto M. 2008. Związek wysokości imisji zanieczyszczeń w Krakowie z warunkami w miejskiej warstwie granicznej, określonymi na podstawie danych sodarowych. W: K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 455-465.
- Hajto M., Rozwoda W. 2010. Wykorzystanie danych sodarowych do oceny warunków rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w warstwie granicznej atmosfery w Krakowie. W: *Ochrona powietrza w teorii i praktyce. Tom 2*. Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Zabrze: 81-92.
- Hess M. 1965. Piętra klimatyczne w polskich Karpatach Zachodnich. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne* 11: 1-267.
- Hess M. 1967a. Klimat terytorium miasta Krakowa. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 1: 35-96.
- Hess M. 1967b. O stosunkach termicznych Krakowa (1780–1963). *Przegląd Geofizyczny XII (XX)*, 3-4: 311-330.
- Hess M. 1969. Klimat podregionu miasta Krakowa. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 3: 5-65.
- Hess M. 1974a. Klimat aglomeracji krakowskiej. *Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej* 361, seria Sozologia i Sozotechnika 1: 79-93.
- Hess M. 1974b. Klimat Krakowa. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 8: 45-102.
- Hess M., Olecki Z. 1990a. Wpływ zanieczyszczenia powietrza na stosunki radiacyjne w Krakowie. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne* 77: 29-42.
- Hess M., Olecki Z. 1990b. Niektóre aspekty klimatu miasta Krakowa i możliwości jego poprawy. W: M. Gumińska, A. Delorme (red.) *Kłęska ekologiczna Krakowa*. Polski Klub Ekologiczny, Kraków: 141-154.
- Hess M., Leśniak B., Olecki Z., Rauczyńska-Olecka D. 1980. Wpływ krakowskiej aglomeracji miejsko-przemysłowej na promieniowanie słoneczne dochodzące do powierzchni Ziemi. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne* 51: 7-73.
- Kowanetz L. 2007. Stosunki anemologiczne. W: D. Matuszko (red.) *Klimat Krakowa w XX wieku*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 149-167.
- Kożuchowski K. 1995. The development of an urban effect in the long-term changes in temperature in Cracow. W: K. Kłysik (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 153-162.
- Kożuchowski K., Trepieńska J. 1986a. Fluktuacje opadów atmosferycznych w Krakowie w okresie 1881–1980. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne* 64: 7-20.
- Kożuchowski K., Trepieńska J. 1986b. Niektóre aspekty wieloletniej zmienności temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Krakowie. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne* 67: 33-44.
- Lewińska J. 1967. Opady atmosferyczne w Wielkim Krakowie. *Prace Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego* 91: 19-28.
- Lewińska J. 1979. Termiczne zanieczyszczenie środowiska na przykładzie regionu krakowskiego. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 12: 93-101.
- Lewińska J. 1984. Struktura termiczna powietrza nad Krakowem. *Biuletyn Instytutu Kształtowania Środowiska* 3-4: 46-52.

- Lewińska J. 1996. Geneza i rozwój miejskiej wyspy ciepła w Krakowie oraz możliwości jej minimalizacji. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 26-27 (1994/1995): 75-87.
- Lewińska J., Zgud K. 1980. Wyspa ciepła na tle zespołów urbanistycznych Krakowa. *Przegląd Geofizyczny XXV (XXXIII)*, 3-4: 283-294.
- Lewińska J., Bartosik J., Baścik J., Czerwieńec M., Zgud K. 1982. Wpływ miasta na klimat lokalny (na przykładzie aglomeracji krakowskiej). Instytut Kształtowania Środowiska, Warszawa: 1-162.
- Lewińska J., Zgud K., Baścik J., Wiatrak W. 1990. Klimat obszarów zurbanizowanych. Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Warszawa: 1-171.
- Limanówka D. 2001. Rekonstrukcja warunków klimatycznych Krakowa w pierwszej połowie XVI wieku. *Materiały Badawcze IMGW, seria Meteorologia* 33: 1-176.
- Matuszko D. (red.) 2007. Klimat Krakowa w XX wieku. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 1-251.
- Matuszko D. 2009. Wpływ zachmurzenia na usłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne na przykładzie krakowskiej serii pomiarów. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 1-232.
- Matuszko D., Wojkowski J. 2007. Zróżnicowanie przestrzenne wybranych cech klimatu Krakowa. W: D. Matuszko (red.) *Klimat Krakowa w XX wieku*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 201-204.
- Matuszko D., Piotrowicz K., Kowanetz L. 2015. Klimat. W: M. Baścik, B. Degórska (red.) *Środowisko przyrodnicze Krakowa: Zasoby – Ochrona – Kształtowanie*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 81-108.
- Michniewski A. 2000. Porównanie wartości temperatury minimalnej w Krakowie-Ogrodzie Botanicznym i w Balicach w latach 1966–1995. *Prace Geograficzne IG UJ* 105: 125-136.
- Milata S. 1959. Częstotliwość inwersji względnych temperatury powietrza w Krakowie w latach 1954, 1955 i 1957. *Przegląd Geofizyczny IV (XII)*, 1: 19-37.
- Morawska-Horawska M. 1978a. Orografia a pionowy rozkład kierunków wiatru i rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń powietrza w Krakowie. *Człowiek i środowisko* 2, 2: 87-96.
- Morawska-Horawska M. 1978b. Struktura termiczna dolnej części troposfery i jej wpływ na zanieczyszczenie powietrza w Krakowie. *Człowiek i środowisko* 2, 1: 61-85.
- Morawska-Horawska M. 1980. Przypadek wystąpienia opadów atmosferycznych wywołanych czynnikami antropogennymi. *Przegląd Geofizyczny XXV (XXXIII)*, 1: 67-70.
- Morawska-Horawska M. 1991. Wpływ rozwoju miast i globalnego ocieplenia na wzrost temperatury powietrza w Krakowie w 100-lecie 1881–1980. *Przegląd Geofizyczny XXXVI*, 4: 321-327.
- Morawska-Horawska M., Cebulak E. 1981. Badania pionowego zasięgu miejskiej wyspy ciepła nad Krakowem. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 14: 43-50.
- Morawska-Horawska M., Lewik P. 2003. Wpływ wysokości i ukształtowania terenu na zróżnicowanie warunków meteorologicznych w Krakowie. W: J. Lach (red.) *Dynamika zmian środowiska geograficznego pod wpływem antropopresji*. Instytut Geografii Akademii Pedagogicznej w Krakowie, Kraków: 85-94.
- Muskała P., Sobik M., Błaś M., Polkowska Ż., Bokwa A. 2015. Pollutant deposition via dew in urban and rural environment, Cracow, Poland. *Atmospheric Research* 151: 110-119.
- Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B. 1987. Stan i wyniki badań z zakresu klimatologii w ośrodku krakowskim. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 19: 33-63.
- Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B., Olecki Z. 1984. Stosunki bioklimatyczne Krakowa. *Problemy Uzdrawiskowe* 1/2: 143-151.
- Obrębska-Starkłowa B., Olecki Z., Trepieńska J. 1997. Uwarunkowania klimatyczne w aspekcie rozwoju terytorialnego i przemysłowego Krakowa. W: B. Domański, A. Jackowski (red.) *Geografia, człowiek, gospodarka*. Instytut Geografii Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 232-242.
- Obrębska-Starkłowa B., Trepieńska J. 1999. Meteorologia i klimatologia. W: B. Kortus, A. Jackowski, K. Krzemień (red.) *Rozwój i dorobek nauk geograficznych w Uniwersytecie Jagiellońskim*. Instytut Geografii Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 139-210.
- Olechnowicz-Bobrowska B., Skowera B., Wojkowski J., Ziernicka-Wojtaszek A. 2005. Warunki opadowe na stacji agrometeorologicznej w Garlicy Murowanej. *Acta Agrophysica* 6, 2: 455-463.
- Olecki Z. 1992. Przezroczystość atmosfery w krakowskiej aglomeracji miejsko-przemysłowej. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne* 90: 23-34.
- Olejniczak J. 2001. Sezonowe zróżnicowanie dobowego przebiegu temperatury powietrza w obszarze miejskim i wiejskim na przykładzie Krakowa i Gaika-Brzezowej. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 31-32: 73-84.
- Pajek M. 2000–2001. Charakterystyka pokrywy śnieżnej w obszarze miejskim i wiejskim na przykładzie Krakowa i Gaika-Brzezowej. *Folia Geographica. Series Geographica-Physica* 31-32: 85-99.

- Piotrowicz K. 2010. Sezonowa i wieloletnia zmienność typów pogody w Krakowie. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 1-314.
- Projekt badawczy nr N 305 099 32/3408 pt. „Zróżnicowanie przestrzenne warstwy granicznej atmosfery na przykładzie Wrocławia i Krakowa”. 2010. Uniwersytet Wrocławski, Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Zakład Klimatologii i Ochrony Atmosfery, Wrocław: 1-273.
- Sekuła P. 2017. Symulacja wysokiej rozdzielczości pól meteorologicznych dla obszaru Krakowa za pomocą modelu WRF. Praca magisterska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków: 1-82.
- Skrzypski J., Kamiński W. 1998. Miejska wyspa ciepła w Krakowie w świetle zastosowania sztucznych sieci neuronowych do opisu pola temperatury powietrza w Europie. *Acta Universitatis Lodzianensis, Folia Geographica Physica* 3: 519-529.
- Skublicka L. 2003a. Occurrence of Temperature Inversions in Conditions of the Urban Climate in Cracow. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20th century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne* 75: 497-504.
- Skublicka L. 2003b. The vertical temperature gradients in the autumn/winter season in Cracow, Poland. W: Z. Górka (red.) *Changes of geographical environment and those of the socio-economic phenomena. Prace Geograficzne IGiGP UJ* 112: 81-92.
- Tomaszewska A.M. 1994. Zależność stężeń zanieczyszczeń atmosfery w Krakowie od wybranych elementów meteorologicznych w okresie grzewczym 1992/1993. *Wiadomości IMGW XVII (XXXVIII)*, 3: 5-17.
- Trepińska J. 1991. Pionowe zróżnicowanie minimalnych temperatur powietrza w warunkach klimatu Krakowa. *Acta Universitatis Wratislaviensis No 1213, Prace Instytutu Geograficznego, Seria A – Geografia Fizyczna* 5: 251-255.
- Trepińska J. (red.) 1997. Wahania klimatu w Krakowie (1792–1995). Instytut Geografii Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 1-205.
- Trepińska J., Skublicka L. 2001. Warunki synoptyczne występowania inwersji termicznych w Krakowie w sezonie jesienno-zimowym. *Przegląd Geofizyczny* XLVI, 4: 351-361.
- Twardosz R. 1996. Wpływ obszarów zurbanizowanych na liczbę dni z opadem śladowym na przykładzie Krakowa. Materiały Konferencji Naukowej „Metody badań wpływu czynników antropogenicznych na warunki klimatyczne i hydrologiczne w obszarach zurbanizowanych”, Katowice, 12–14.09.1996 r.: 175-183.
- Twardosz R. 2005. Dobowy przebieg opadów atmosferycznych w ujęciu synoptycznym i probabilistycznym na przykładzie Krakowa (1886–2002). Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 1-176.
- Walawender J., Hajto M. 2009. Assessment of thermal conditions in urban areas with use of different satellite data and GIS. 2009 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Bath, UK, 21–25 September 2009.
- Walawender J.P., Szymanowski M., Hajto M.J., Bokwa A. 2014. Land Surface Temperature Patterns in the Urban Agglomeration of Krakow (Poland) Derived from Landsat-7/ETM+ Data. *Pure and Applied Geophysics* 171, 6: 913-940.
- Walczewski J. 1984. Charakterystyka warstwy granicznej atmosfery nad Krakowem w oparciu o wyniki sondażu akustycznego. *Materiały Badawcze IMGW, seria Meteorologia* 10: 1-147.
- Walczewski J. (red.) 1994. Charakterystyka warstwy granicznej atmosfery nad miastem (na przykładzie Krakowa). *Materiały Badawcze IMGW, seria Meteorologia* 22: 1-109.
- Walczewski J., Feleksy-Bielak M., Dębicka K., Śliwińska U. 2000. Wskaźniki meteorologicznych warunków dyspersji zanieczyszczeń powietrza i ich zmienność w Krakowie w latach 1990–1999. *Wiadomości IMGW XXIII (XLIV)*, 3: 13-27.
- Warakomski W. 1984. Refleksje na temat metod badania klimatu miast. Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji nt. Klimat i bioklimat miast, Łódź, 22-24 listopada 1984 r. Uniwersytet Łódzki, Łódź: 21-28.
- Wiatrak W. 1984. Przemysłowa emisja ciepła sztucznego na przykładzie Huty im. Lenina. *Biuletyn Instytutu Kształtowania Środowiska* 3-4: 53-62.
- Wojkowski J. 2008. Wpływ pokrycia i użytkowania terenu na kształtowanie się warunków termicznych w Krakowie. W: K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 113-122.

Summary

The oldest weather records in Kraków come from the period 1499–1540 when Marcin Biem, a professor of the Kraków Academy (at present: Jagiellonian University) was making daily notes in Latin, describing weather conditions (Bokwa *et al.* 2001). Meteorological measurements began in 1792 and have been continued in the same location (so called historical station), in the former astronomical observatory. In 1958, a regular meteorological station was established nearby in the Botanical Garden (Trepińska 1997). Urban climate

studies based on measurements in urban and rural locations began after the Second World War. The urban heat island (UHI) was defined using data from stations representing not only various land use/land cover but also various landforms (e.g. Lewińska, Zgud 1980; Drużkowski 1992; Kożuchowski 1995). In 1970s, for the valley floor, UHI intensity was 2K. As the city developed and built-up areas located on the slopes surrounding the city centre covered a significant share of the city's area, Bokwa *et al.* (2015b) proposed the concept of RMUHI (Relief-Modified UHI). The impact of very high air pollution in 1960s and 1970s on the intensity of solar radiation was documented by Hess *et al.* (1980); direct radiation was lower in winter by 26% in the city than in rural areas. After 1989, air pollution decreased significantly and so did the urban-rural difference in solar radiation intensity (Bokwa, Matuszyk 2007). Atmospheric precipitation in Kraków and its vicinities is modified mainly by the relief and the differences in mean annual totals reach about 200 mm (e.g. Lewińska 1967; Morawska-Horawska, Lewik 2003; Olechnowicz-Bobrowska *et al.* 2005). Obrębska-

-Starkłowa *et al.* (1997) showed that in summer urban areas contributed to the generation of convective cloudiness and abundant precipitation while in winter air pollution delivered condensation nuclei resulting in intensive snowfall. The decrease of air pollution after 1989 did not change the spatial pattern of precipitation and no statistically significant trends were detected (Bokwa 2010a). Kraków has poor natural ventilation as the mean annual wind speed in the city centre is about $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and during about 50% of days this value is not exceeded (Lewińska *et al.* 1982; Walczewski *et al.* 2000; Matuszko *et al.* 2015). Further studies on the local climate of Kraków need to be focused on the application of climate models capable to include particular local conditions, e.g. formation of air temperature inversion, katabatic flows, thermal asymmetry of the valley. The aim of the models application is to obtain spatial patterns of particular meteorological elements and various indices. This is necessary to study the exposure of the inhabitants to phenomena like e.g. heat waves, but also to study the role of various factors in the functioning of the local climate of Kraków.