

Krzysztof FORTUNIAK
Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych

BADANIA KLIMATU MIAST W POLSCE

STUDIES ON URBAN CLIMATE IN POLAND

Wstęp

Modyfikacja klimatu w skali lokalnej, powodowana rozwojem terenów zabudowanych, jest jednym z najbardziej ewidentnych i najwcześniej poznanych przykładów antropogenicznych zmian klimatycznych. Ponad 200 lat temu pojawiła się pierwsza publikacja Howarda (1818) dowodząca, że centrum miasta jest wyraźnie cieplejsze od terenów je otaczających – zjawisko obecnie znane jako miejska wyspa ciepła (*MWC*) – a w końcu XIX w. wykazano wpływ miasta na pozostałe elementy klimatu (Oke i in. 2017).

Te lokalne modyfikacje nabierają szczególnego znaczenia w świetle globalnych zmian klimatycznych. Tak zwany „efekt miejski” może wzmacniać niektóre negatywne skutki globalnego ocieplenia, w tym zjawiska ekstremalne, takie jak fale upałów czy ulewne opady i burze. Miasta mogą się więc okazać „ekosystemami” wyjątkowo wrażliwymi na zmiany klimatyczne. Z drugiej strony to właśnie duże aglomeracje miejskie, choć bezpośrednio w niewielkim stopniu wpływające na klimat w makroskali, są „gorącymi punktami” na mapie globalnej emisji gazów cieplarnianych, a ich ślad węglowy jest znacznie większy niż obszarów niezabudowanych o podobnej powierzchni. Jednocześnie obserwuje się wzrost udziału ludności miejskiej w globalnej populacji – obecnie już co druga osoba mieszka w mieście, a do połowy bieżącego wieku będzie to prawdopodobnie około 2/3 ludności świata¹. Dlatego w ostatnich latach coraz dobitniej postuluje się konieczność uwzględniania ustaleń dotyczących wpływu zabudowy na klimat lokalny w planowaniu przestrzennym.

¹ <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>

Działania takie mogą zarówno zwiększyć potencjał adaptacyjny miast i poprawić jakość życia ich mieszkańców, jak również zmniejszyć negatywny wpływ obszarów miejskich na środowisko. Zagadnienia klimatyczne, w tym klimat terenów zurbanizowanych, stały się modnym tematem doniesień prasowych, a inicjatywy proklimatyczne są niejednokrotnie podawane jako cele różnorodnych projektów miejskich. Niestety, informacje, jakie można znaleźć w mass mediach, a nawet w niektórych raportach „specjalistycznych”, świadczą o bardzo wybiórczej wiedzy na temat tego zagadnienia oraz pewnej ignorancji wobec dorobku polskich badaczy. Istnieje zatem potrzeba zwrócenia uwagi na nasze osiągnięcia w zakresie badań klimatu miast oraz przywołanie głównych ustaleń, które mimo iż są zbieżne z wnioskami naukowców z innych krajów, to stanowią jednocześnie uściślenie dla określonych warunków krajowych.

Celem opracowania jest przegląd badań, jakie w zakresie klimatu miasta prowadzone były przez polskich badaczy na przestrzeni ponad stu ostatnich lat. Prace te realizowano w wielu ośrodkach, a ich pokłosiem jest bogate piśmiennictwo, którego pełne omówienie przekracza ramy objętościowe pojedynczego artykułu. Dlatego skoncentrowano się na przeglądzie badań prowadzonych w większych miastach oraz krótkiej charakterystyce ich głównych rezultatów. Marginalnie potraktowano zagadnienie zanieczyszczeń powietrza w mieście. Jest to niewątpliwie najbardziej ewidentna cecha powietrza miejskiego, na którą zwrócono uwagę już w starożytności, jednak pod wieloma względami stanowi odrębny obszar badawczy wymagający niezależnego i obszernego studium. Skupiono się zatem głównie na badaniach typowo klimatologicznych, dotyczących podstawowych elementów meteorologicznych. Należy przy tym zauważyć, że autorzy wielu prac, których tytuł nawiązuje do klimatu miasta, w rzeczywistości ograniczają się do analizy wybranych cech klimatycznych zaledwie jednej stacji związanej z danym obszarem miejskim. I choć oddziaływanie miasta na analizowane w tego typu publikacjach elementy meteorologiczne jest faktem (o ile stacja jest rzeczywiście zlokalizowana w obrębie zabudowy, co nie zawsze ma miejsce), to efekt miejski jest w tym wypadku trudny do wskazania. Dopiero studia porównawcze czy analizy przestrzenne pozwalają na określenie wpływu zabudowy miejskiej na lokalne warunki klimatyczne. Dlatego tego typu pracom poświęcono nieco więcej uwagi.

Początki badań klimatu miast na ziemiach polskich

Pierwsze pomiary i obserwacje meteorologiczne na ziemiach polskich wykonywano, podobnie jak w innych krajach, głównie w miastach. W tym sensie początki badań klimatu miast pokrywają się z początkiem pomiarów meteorologicznych. Działania te nie były jednak ukierunkowane na poznanie charakterystycznych cech klimatu terenów zurbanizowanych, lecz służyły

głównie rozpoznaniu warunków klimatycznych w regionie reprezentowanym przez lokalizację miasta. Przykładem opracowania tego typu, jest pochodząca z 1828 roku, *Karta meteorologiczna stolicy Królestwa Polskiego* autorstwa Jastrzębowskiego, przygotowana głównie na podstawie pomiarów prowadzonych przez Megiera i Ruchacza w latach 1803-1828. Wcześniej pomiary w Warszawie wykonywane były przez Bończę-Bystrzyckiego (1779-1799), a także w ramach sieci florentyńskiej (1655) (Przybylak 2010; Kossowska-Cezak, Wawer 2014). W Krakowie natomiast obserwacje temperatury prowadzone są od roku 1792 – zapoczątkował je Jan Śniadecki w Obserwatorium Astronomicznym (Trepiańska, Kowanetz 1997; Trepiańska 2007). W drugiej połowie XIX w. pojawiły się opracowania dotyczące zmienności temperatury (Wierzbicki 1871; Karliński 1876, 1898; Kuczyński 1884) czy „chyżości” wiatru (Karliński 1877) w tym mieście. W Gdańsku początek systematycznych pomiarów i obserwacji meteorologicznych datuje się na rok 1739 (Miętus i in. 1994; Filipiak, Miętus 2019). W Toruniu pierwsze regularne pomiary prowadzono w latach 1740-1767, a następnie od drugiej połowy XIX w. (Pawłowski 1918; Pospieszyńska, Przybylak 2018). We Wrocławiu najwcześniejsze dane pochodzą z roku 1710 (Przybylak 2010), ale systematyczne pomiary instrumentalne rozpoczęto w roku 1791 (Pyka 2003); w Szczecinie z kolei badania rozpoczęto w 1836 roku (Miętus i in. 1994). Później uruchomiono stałe stacje pomiarowe w innych dużych miastach polskich, na przykład w Lublinie w roku 1869 (Kaszewski 2019) czy w Łodzi w 1903 (Kłysik i in. 1995a).

Wspomniana *Karta meteorologiczna...* była w zasadzie dodatkiem do ogłoszonej w 1828 roku rozprawy Jastrzębowskiego *O odmianach powietrza i o fizycznych porach roku w naszym klimacie*, opublikowanej dwanaście lat później pod nieco innym tytułem (Jastrzębowski 1841; Kossowska-Cezak, Osowiec 2017). Autor wspomina w niej o wprowadzanych przez Magiera poprawkach temperatury, gdyż »temperatura skazywana przez termometr różniła się z przyczyny jego umieszczenia wśród miasta od temperatury na przedmieściach Warszawy, zwłaszcza w porze zimowej o 1 do 3^{ch} stopni«. Jastrzębowski sugeruje jednocześnie, że poprawki te »były zwłaszcza w porze zimowej nieco przesadzone«, choć uzasadnia konieczność ich stosowania faktem, że »obserwacje zapisywane w dziennikach, mają oznaczać temperaturę nie pośrodku miasta, lecz na przedmieściach, na wielkich placach i w ogrodach warszawskich, która różni się jeszcze nieco od temperatury w otwartym polu«. Stwierdzenia powyższe lokują polskich klimatologów wśród pionierów badań klimatu miast i chociaż termiczny efekt miasta nie został tu tak wyeksponowany jak w pracy Howarda (1818), to niewątpliwie świadczą one, iż już w początkach XIX wieku badacze polscy byli świadomi wpływu zabudowy miejskiej na temperaturę i podejmowali próby oceny ilościowej tego zjawiska.

Dokładniejszą ocenę wpływu Warszawy na temperaturę powietrza znaleźć można w znacznie późniejszej pracy Górczyńskiego i Kosińskiej

(1916), w której autorzy stwierdzają: »Jak wiadomo z poszukiwań np. Renou dla Paryża, Lamonta dla Monachium, Hanna dla Wiednia i Harden Hamberga dla Stockholmu, Wilda dla Piotrogradu, Gorczyńskiego dla Warszawy temperatury w śródmieściu są w przeciętnych miesięcznych do $1\frac{1}{2}^{\circ}$ latem (około $\frac{1}{2}^{\circ}$ zimą) wyższe niż na otwartej przestrzeni poza granicami miasta; w przebiegu dziennym największą zwykłą temperaturę wykazuje środowisko miejskie we wczesnych godzinach rannych i wieczornych. W godzinach okołopołudniowych nie tylko temperatura w mieście nie jest wyższa, ale, jak to pokazuje przykład Warszawy jest wtedy (zwłaszcza wiosną) chłodniej w mieście, niż poza jego granicami«. Zwrócono zatem uwagę nie tylko na miejską wyspę ciepła, lecz również na pojawiające się w ciągu godzin dziennych tzw. jezioro chłodu. Odrębność warunków termicznych w mieście w odniesieniu do przyziemnej warstwy powietrza podkreślał również Gumiński (1930), powołując się jednak na dane z Monachium z 1925 roku. W innych wczesnych polskich opracowaniach klimatologicznych Merecki (1915) zwrócił uwagę na redukcję sumy rocznej usłonecznienia, wynikającą ze zwiększonej zawartości pyłów i sadzy w powietrzu wielkich miast; Gorczyński przeprowadził analizę usłonecznienia w Krakowie (Gorczyński 1910), Warszawie, Gdańsku i Gdyni (Gorczyński 1939), a Dziewulski (1917) w Krakowie, Zakopanem i Lwowie. Należy również wspomnieć, że w początkach XX w. i w okresie międzywojennym w wielu polskich miastach istniały, w różnych okresach czasu, sieci bądź posterunki pomiarowe (Rojecki 1956) umożliwiające późniejsze analizy wpływu zabudowy miejskiej na lokalne warunki klimatyczne (np. Kłysik, Fortuniak 1998, 1999).

Powojenne i współczesne badania klimatu wybranych miast polskich

We wczesnych latach powojennych praktycznie nie prowadzono znaczących badań ukierunkowanych na poznanie specyficznych cech klimatu miast, chociaż informacje o prawidłowościach przebiegu elementów meteorologicznych w dużych ośrodkach miejskich stanowiły istotną część opracowań poświęconych klimatowi większych obszarów (np. Gumiński 1950; Stenz 1952). Do pierwszych studiów porównawczych miasto – tereny zamiejskie zaliczyć należy analizę wybranych cech warunków termicznych i opadowych Lublina przedstawioną przez Paszyńskiego (1957). Lublina dotyczy również jedno z pierwszych powojennych opracowań klimatu miasta przygotowane dla celów urbanistyki (Zinkiewicz, Warakowski 1960). Zagadnieniom uwzględnienia specyfiki klimatu lokalnego w planowaniu przemian struktury miasta poświęcony był także, realizowany w Łodzi w latach 1955-1959, duży projekt badawczy kierowany przez Zycha i Różańskiego (Tarajkowska, Zawadzka 1984). Powstałe w jego wyniku opracowania (Różański 1959; Różański i in. 1961; Zych 1961) stały się wzorem wielu późniejszych analiz. Z początkiem lat 60. nastąpił stosunkowo

szybki rozwój klimatologii miast, a problematyka ta stała się istotną częścią prac prowadzonych w większości jednostek zajmujących się badaniami atmosfery.

Bardzo bogaty, przez co niezwykle trudny do przedstawienia w formie syntezy, dorobek w zakresie szeroko rozumianego klimatu miasta mają warszawskie ośrodki naukowe. Problematyka typowo klimatologiczna stanowiła i stanowi jeden z głównych obszarów zainteresowań klimatologów m.in. z Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego, Instytutu Geografii i Zagospodarowania Przestrzennego Polskiej Akademii Nauk, Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego czy Zakładu Meteorologii i Klimatologii Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Należy również pamiętać o innych jednostkach zajmujących się zagadnieniami pokrewnymi, na przykład stanem aerosanitarnym, zanieczyszczeniami powietrza, aerozolem atmosferycznym nad miastem, zagadnieniami planistycznymi czy modelowaniem numerycznym. O intensywności studiów nad klimatem Warszawy świadczyć może fakt, że w samym tylko Zakładzie Klimatologii UW w latach 1952-2010 wykonano ponad sto pięćdziesiąt prac magisterskich dotyczących tego tematu (Stopa-Boryczka i in. 2010). Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat warszawskie zespoły badawcze organizowały własne sieci i punkty pomiarowe, zarówno specjalistyczne, jak i dostarczające informacji o stanie podstawowych elementów meteorologicznych. Prowadzono też liczne badania terenowe. Wyniki tych pomiarów stosunkowo rzadko przedstawiane były jednak w postaci zbiorczych opracowań.

Za jedną z pierwszych powojennych prac dotyczących wpływu zabudowy miejskiej na klimat Warszawy należy uznać opracowanie Kaczorowskiej (1967) na temat rozkładu przestrzennego opadów w okresie 1956-1960. Nieco później powstała, uznawana za pierwszą monografię klimatu Warszawy (Żmudzka 2019), praca doktorska Kossowskiej (1970), w której autorka, chociaż nie stosuje jeszcze terminu miejska wyspa ciepła, zwraca uwagę m.in. na zróżnicowanie temperatury na obszarze miasta i jego uwarunkowania cyrkulacyjne oraz pogodowe. W późniejszych latach warszawska miejska wyspa ciepła stała się przedmiotem licznych opracowań, których podjęli się między innymi Stopa-Boryczka i in. (1984, 1991, 1994, 2001, 2003), Wawer (1995, 1999), Kozłowska-Szczęsna i in. (1996, 2001), Błażejczyk (2002) oraz Błażejczyk i in. (2014, 2016), a także Lorenc i Mazur (2003). Niejednokrotnie były to monografie oraz publikacje zbiorcze poświęcone bądź wyłącznie zjawisku *MIVC* (Błażejczyk i in. 2014), bądź kompleksowej analizie klimatu Warszawy uwzględniającej analizę różnych elementów meteorologicznych (np. Kozłowska-Szczęsna i in. 1996; Lorenc, Mazur 2003; Stopa-Boryczka 2003; Stopa-Boryczka i in. 2010). We wspomnianych wydawnictwach zwartych oraz w licznych publikacjach, których szczegółowy przegląd przekracza zakres niniejszego opracowania, znaleźć można analizy wpływu zabudowy miejskiej Warszawy praktycznie na większość podstawowych elementów meteorologicznych.

Współczesne kierunki badań klimatu Warszawy, oprócz klasycznych studiów nad zróżnicowaniem klimatu lokalnego, jego uwarunkowań pogodowych i cyrkulacyjnych oraz zmian wieloletnich, obejmują szereg problemów specjalistycznych i aplikacyjnych. Bardzo istotnym nurtem badawczym, od wielu lat intensywnie rozwijanym przez zespół klimatologów Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN (Kuchcik i in. 2019), są zagadnienia bioklimatyczne. W ostatnich latach powstały prace uwzględniające na przykład rozkład uniwersalnego wskaźnika obciążeń cieplnych (np. Błażejczyk 2013), oceniające bioklimat osiedli mieszkaniowych w zależności od udziału terenów biologicznie czynnych (np. Szulczewska i in. 2014) czy alergienność szaty roślinnej (np. Kuchcik i in. 2016). Ponadto wśród współczesnych kierunków badawczych w ośrodku warszawskim należy wymienić choćby: modelowanie współczesnych zagrożeń klimatycznych, w szczególności termicznych w Warszawie (Kulesza i in. 2017); badania lidarowe miejskiej warstwy granicznej (np. Stachlewska i in. 2017); analizy powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (Gawuć, Strużewska 2016) czy modelowanie numeryczne klimatu miast (np. Strużewska, Kamiński 2012; Wyszogrodzki i in. 2012; Korycki i in. 2016). Warto przy tym pamiętać, że to właśnie z ośrodkiem warszawskim związane są pionierskie prace w zakresie numerycznego modelowania klimatu miasta prowadzone przez Sorbjana i Uliasz (Sorbjan 1978; Sorbjan, Uliasz 1982).

W Krakowie studia nad klimatem lokalnym również prowadziło wiele jednostek badawczych, w tym uczelnianych (głównie Zakład Klimatologii Uniwersytetu Jagiellońskiego), resortowych (IMGW, Instytut Rozwoju Miast, Instytut Gospodarki Przestrzennej i Komunalnej, Instytut Kształtowania Środowiska) czy placówek PAN. Podobnie jak w Warszawie zaowocowało to licznym piśmiennictwem. Opracowania z wczesnych lat powojennych dotyczą głównie wybranych cech środowiska Krakowa (np. Morawska 1963; Hess 1967, 1974; Trepińska 1969). Wyjątkowo długa seria pomiarów ze stacji naukowej Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego w Ogrodzie Botanicznym stanowiła podstawę dla wielu opracowań dotyczących wieloletnich zmian wybranych elementów klimatu (np. Twardosz 2005; Matuszko 2007, 2009; Piotrowicz 2010). Była również wykorzystywana w studiach porównawczych (np. Niedźwiedz i in. 1984; Drużkowski 1992; Bokwa 2010) czy pracach dotyczących potencjalnego wpływu miasta na historyczne szeregi czasowe (Morawska-Horawska 1991; Kożuchowski 1995).

Jedne z pierwszych badań zróżnicowania elementów meteorologicznych (opadów) na obszarze Krakowa i okolic przeprowadziła Lewińska (1967). Jej kolejne studia dotyczące klimatu terenów zurbanizowanych znalazły podsumowanie w monografii mezoklimatu Krakowa (Lewińska i in. 1982). Specyficzne warunki topograficznego lokalizacji tego miasta powodują, że rzeźba terenu ma tu większy wpływ zarówno na przebieg opadów, jak na i inne elementy

meteorologiczne niż w innych dużych miejscowościach w kraju. Uwzględnienie dodatkowego wpływu topografii na zróżnicowania pola termicznego miasta w Krakowie doprowadziło do rozwoju koncepcji miejskiej wyspy ciepła modyfikowanej przez rzeźbę (tzw. Relief-modified UHI – Bokwa 2010; Bokwa i in. 2015). Wyjątkowe położenie Krakowa było też impulsem do rozwoju badań inwersji termicznych nad miastem, pionowego zasięgu miejskiej wyspy ciepła i struktury miejskiej warstwy granicznej atmosfery (np. Milata 1959; Morawska-Horawska, Cebulak 1981; Lewińska 1984; Walczewski 1984, 1994). Studia te prowadzono na bazie danych pomiarowych ze stacji położonych na różnej wysokości, a także wyników uzyskanych podczas sondowań balonowych, przelotów samolotem czy pionierskich obserwacji sodarowych prowadzonych od 1980 roku przez Zakład Teledetekcji Atmosfery IMGW w Krakowie-Czyżynach.

Wśród najnowszych zagadnień badawczych podejmowanych przez badaczy krakowskich (Bokwa 2019) znaleźć można, oprócz klasycznych studiów klimatu miasta, m.in.: próby dokładnego określenia roli rzeźby terenu jako głównego, obok użytkowania/pokrycia terenu, czynnika kształtującego klimat miasta (Bokwa i in. 2015), zastosowanie danych satelitarnych pod kątem analizy termiki podłoża na terenie Krakowa i najbliższych okolic (Walawender 2006; Matuszko, Wojkowski 2007; Walawender i in. 2014), wykorzystanie modeli klimatycznych do badania mezoklimatu Krakowa czy badania charakterystyk izotopowych i strumieni gazów cieplarnianych nad miastem (Zimnoch i in. 2010, 2018).

W Łodzi klimat miast jest jednym z głównych obszarów zainteresowań badaczy, począwszy od wspomnianych prac Zycha i Różańskiego (Różański 1959; Różański i in. 1961; Zych 1961). Szczególna intensyfikacja badań klimatu terenów zurbanizowanych nastąpiła po utworzeniu w 1992 roku (Kłysik i in. 1995b) i działającej do roku 2012 Miejskiej Stacji Meteorologicznej mieszczącej się w ścisłym centrum miasta. Dalszy postęp nastąpił po przeprowadzeniu w 1996 r. automatyzacji pomiarów. Umożliwiło to szereg analiz porównawczych z danymi z, uznanej za zamiejską, stacji Łódź-Lublinek, dotyczących głównie temperatury powietrza i warunków radiacyjnych (np. Kłysik, Fortuniak 1998, 1999; Fortuniak 2003; Fortuniak i in. 2006; Podstawczyńska 2007). Prowadzone w tym samym czasie pomiary patrolowe pozwoliły na wykrycie rekordowej w Polsce MWC, w której różnice temperatury między centrum miasta a terenami zamiejskimi były rzędu 12°C (Kłysik, Fortuniak 1999). Jednocześnie oszacowano emisję ciepła sztucznego na terenie Łodzi (Kłysik 1996) oraz sporządzono mapy pokrycia terenu istotne z punktu widzenia procesów klimatotwórczych nad miastem (Kłysik 1998). Na uwagę zasługują również prace poświęcone modelowaniu klimatu miast, w tym MWC (Fortuniak 2003) czy pochłaniania promieniowania w strukturach urbanistycznych (Fortuniak 2008; Pawlak 2009). Przejawem aktywności w dziedzinie klimatu terenów zurbanizowanych w ośrodku łódzkim są między innymi cyklicznie konferencje *Klimat i bioklimat miast* (w latach: 1984, 1992, 1997, 2007, 2015) oraz organizacja 5. Międzynarodowej

Konferencji Klimatu Miast (ang. 5th *International Conference on Urban Climate*) w roku 2003.

Począwszy od roku 2000 istotnym aspektem badań klimatu miast w Łodzi stały się pomiary mikrometeorologiczne. Przy współpracy z Uniwersytetem Indiana został wówczas uruchomiony w Łodzi pierwszy system kowariancji wirów, pozwalający na pomiary turbulencyjnych strumieni ciepła jawnego i utajonego (Offerle i in. 2006a-b). Od roku 2006 prowadzone były dodatkowo pomiary strumienia dwutlenku węgla (Pawlak i in. 2011), a od roku 2013 również strumienia metanu (Pawlak, Fortuniak 2016). W latach 2009-2012 trwały badania intensywności turbulencji i turbulencyjnego strumienia ciepła jawnego nad miastem na trzykilometrowej ścieżce pomiarowej przy pomocy scyntylometru (Zieliński i in. 2013, 2017, 2018). Charakterystyki turbulencji analizowano również na podstawie kilkuletnich danych z dwóch wież kowariancyjnych (Fortuniak i in. 2013; Fortuniak, Pawlak 2015). Ponadto w ostatnich latach w badaniach łódzkich uwagę zwracają prace dotyczące meteorologicznych uwarunkowań stężenia radonu w przygruntowej warstwie powietrza w mieście (Podstawczyńska 2013, 2016).

We Wrocławiu najwcześniejsze powojenne prace z zakresu klimatu miast dotyczą modyfikacji pola opadów atmosferycznych (Schmuck 1967; Zipser-Urbańska 1968). Pierwsze kompleksowe badania klimatu Wrocławia przeprowadzono natomiast na początku lat 70. XX wieku. W ramach trzyletniego projektu działała wtedy sieć dwudziestu topoklimatycznych posterunków pomiarowych (Pyka 2003; Szymanowski i in. 2019). Aktywizacja ośrodka wrocławskiego w zakresie szczegółowego poznania cech klimatu miasta nastąpiła w ostatnich latach XX wieku. Na szczególne podkreślenie zasługuje efektywne wykorzystywanie metod GIS-owskich w kompleksowych analizach łączących dane z automatycznych posterunków pomiarowych (pięć automatycznych stacji działających od roku 1997) z pomiarami mobilnymi, pozwalających na modelowanie przestrzennego rozkładu elementów meteorologicznych na obszarze miasta z dużą rozdzielczością przestrzenną (np. Dubicka, Szymanowski 2000; Dubicka i in. 2003; Szymanowski 2004). Wypracowana w ramach tych badań metodyka była również wykorzystywana do określenia warunków bioklimatycznych (Sikora 2008). Innym istotnym obszarem aktywności naukowej wrocławskiego ośrodka klimatologicznego są badania miejskiej warstwy granicznej atmosfery. Zostały one zapoczątkowane wraz z utworzeniem w 1984 roku stanowiska pomiarów sodarowych (Pyka 1988), które w kolejnych latach było sukcesywnie rozbudowywane, m.in. o sodar mobilny umożliwiający analizę przestrzennej struktury inwersji nad miastem (Netzel i in. 2012). W badaniach struktury warstwy granicznej atmosfery nad miastem wykorzystywane były we Wrocławiu również pomiary balonowe (Drzeniecka i in. 2003), pomiary na różnych wysokościach na wieży meteorologicznej (Drzeniecka-Osiadacz i in. 2018), a w ostatnich latach sondáže wykonane z zastosowaniem

drona meteorologicznego (Szymanowski i in. 2019). Obserwacje te pozwoliły na stworzenie empirycznej bazy weryfikacji parametryzacji numerycznych miejskiej warstwy granicznej atmosfery (Netzel i in. 2012; Kryza i in. 2015). Nurt badań związanych z modelowaniem numerycznym procesów meteorologicznych i jakości powietrza jest obecnie jednym z głównych we wrocławskim ośrodku klimatologicznym (Szymanowski i in. 2019). Wykorzystywane są w tym celu odpowiednio zoptymalizowane modele WRF i WRF-Chem, a najnowsze prace, oprócz modelowania typowych wskaźników jakości powietrza, jak pył zawieszony (Werner i in. 2015) czy ozon (Wałaszek i in. 2014), dotyczą również zagadnień o charakterze interdyscyplinarnym, jak np. modelowanie transportu, stężeń oraz emisji pyłków roślin (Bilińska i in. 2017).

Jak już wspomniano, jedne z pierwszych polskich powojennych opracowań wpływu miasta na lokalne warunki klimatyczne dotyczyły Lublina (Paszyński 1957; Zinkiewicz, Warakomski 1960). W kolejnych latach większość prac charakteryzujących klimat tego miasta koncentrowała się jednak wokół czasowej zmienności poszczególnych elementów meteorologicznych, wskaźników bioklimatycznych oraz ich uwarunkowań cyrkulacyjnych (np. Michna 1955; Michałowski 1962; Kossowski 1970, 1973; Badach i in. 1985; Warakomski 1999; Gluza 2000; Nowosad 2012; Kaszewski, Bilik 2015). Nieco później pojawiły się studia porównawcze centrum Lublina z terenami zamiejskimi (np. Filipiuk i in. 1998; Kaszewski, Siwek 1998; Nowosad, Bartoszek 2007) czy zróżnicowania klimatycznego i bioklimatycznego na terenie miasta (Gluza, Kaszewski 1984; Mrugała i in. 1991; Dobek, Gawrysiak 2009; Dobek i in. 2013). Współcześnie klimatolodzy lubelscy skupiają się w dużej mierze na zagadnieniach aplikacyjnych (Kaszewski 2019), n.in. na roli suchych dolin w kształtowaniu warunków termiczno-wilgotnościowych na terenie Lublina (Kaszewski i in. 2014) czy na ocenie wpływu zieleni przyulicznej na mikroklimat terenów zurbanizowanych (Kaszewski 2017).

W badaniach klimatu miast zespołu Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu można wyróżnić dwa główne okresy: lata 1981-1993, gdy na terenie miasta działała sieć ośmiu manualnych posterunków pomiarowych (Wójcik, Marciniak 2007), pozwalająca między innymi na ocenę zróżnicowania warunków termicznych na obszarze miasta (Wójcik, Marciniak 1984); od roku 2011 do chwili obecnej (Przybylak, Uscka-Kowalkowska 2019), kiedy to stworzono sieć dwudziestu siedmiu automatycznych punktów pomiarowych (dwadzieścia cztery nowe i trzy wcześniej działające) w ramach realizacji projektu ukierunkowanego na poznanie zróżnicowania klimatów lokalnych Torunia. Powstałe wówczas prace dotyczą m.in. zróżnicowania przestrzennego temperatury (Przybylak i in. 2017), wilgotności powietrza (Uscka-Kowalkowska i in. 2014), kierunku i prędkości wiatru (Strzyżewski i in. 2015), warunków biometeorologicznych (Araźny i in. 2015, 2016) oraz promieniowania słonecznego (Kejna i in. 2014) w wybranych latach.

W Poznaniu analizy różnicowania wybranych elementów meteorologicznych dla lat 1962-1964 przeprowadził Szczerbacki (1968), a następnie zespół pod kierownictwem Koczorowskiej (1995) na podstawie krótkiej, rocznej serii pomiarowej z lat 1992-1993. Na początku XX wieku wstępne badania porównawcze kontrastów termicznych miasto – teren zamiejski wykonała Bednorz (2003). Jednak do roku 2008, w którym powstała miejska sieć pomiarowa Zakładu Klimatologii UAM, w badaniach klimatu Poznania przeważały prace poświęcone charakterystyce elementów meteorologicznych, wykonane na podstawie danych z lotniskowej stacji Poznań-Ławica (np. Woś 1992; Tamulewicz 1996; Kolendowicz 1999; Szyga-Pluta 2003). Dopiero na bazie danych z nowo utworzonej sieci powstały w ostatnich latach szczegółowe analizy MWC (Nowak 2009; Busiakiewicz 2011; Półrolniczak i in. 2017, 2018, 2019). Podjęto również próby wykorzystania obrazów powierzchniowej MWC uzyskanych z danych satelitarnych do uszczegółowienia rozkładu pola temperatury powietrza na obszarze Poznania (Majkowska i in. 2017).

Pierwsze prace powojenne z Trójmiasta dotyczyły usłonecznienia Gdyni (Lechowicz-Kwiecień 1961). Szersze badania różnicowania warunków klimatycznych w tym mieście przeprowadził Trapp (1978). W późniejszych latach opisał on z zespołem warunki klimatyczne (Trapp i in. 1987) i bioklimatyczne (Nurek i in. 1992) aglomeracji gdańskiej. Jednocześnie zwrócono uwagę na oddziaływanie morza i specyficzną rzeźbę terenu, które w znacznym stopniu modyfikują wpływ zabudowy na warunki termiczne (Korzeniewski 1994). W końcu XX wieku większość badań w Trójmieście była ukierunkowana na określenie meteorologicznych uwarunkowań stanu aerosanitarnej aglomeracji (Wyszkowski 1994; Wyszkowski, Mysiak 1995). W ostatnich latach wiele uwagi poświęcono rekonstrukcji warunków klimatycznych Gdańska (Miętus 1998; Miętus i in. 2007) z uwzględnieniem antropopresji (Miętus, Filipiak 2001) czy zagadnieniom bioklimatycznym (Owczarek 2003, 2012).

Poza wymienionymi powyżej większymi ośrodkami miejskimi, badania wybranych elementów klimatu miast prowadzono również w wielu innych miejscowościach, choć prace te nie miały tak kompleksowego charakteru. W szczególności opracowano charakterystyki bioklimatyczne wielu uzdrowisk polskich (np. Jankowiak, Parczewski 1978; Kozłowska-Szczęśna 2000; Kozłowska-Szczęśna i in. 2002). Badania modyfikacji lokalnych warunków klimatycznych przez zabudowę, prowadzone pod kątem analizy warunków bioklimatycznych, były również przedmiotem studiów w innych miastach, np. w Częstochowie (Tarajkowska 1971), Kielcach (Żarnowiecki 2002) czy w Szczecinie (Czarnecka i in. 2011). Ciekawym podejściem do badań kompleksowego wpływu miasta na warunki klimatyczne są prowadzone w Szczecinie badania dendrochronologiczne (Cedro, Nowak 2013). W wielu miastach analizowano też typowe elementy meteorologiczne, m.in. warunki termiczne Bydgoszczy (Dudek i in. 2008), warunki anemometryczne Szczecina (Nidzgorska-Lencewicz, Czarnecka

2011) czy zróżnicowanie topoklimatyczne Katowic (Radosz 2010) i Sosnowca (Radosz 2007). Wyjątkowe możliwości pomiarowe, jakie daje wysoki budynek Wydziału Nauk o Ziemi UŚ w Sosnowcu, wykorzystano do analiz inwersji termicznych nad miastem oraz ich związków z cyrkulacją atmosferyczną i zanieczyszczeniami powietrza (Bil 2000; Caputa i in. 2009; Widawski 2015).

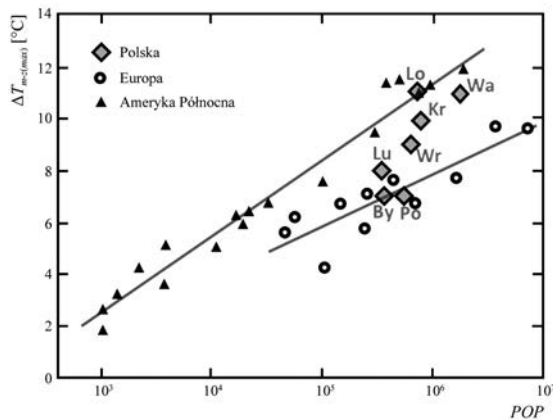
Wybrane cechy klimatu lokalnego w polskich miastach

W badaniach klimatu miast najczęściej uwagi, poza problemem zanieczyszczeń powietrza, poświęcono prawdopodobnie zjawisku miejskiej wyspy ciepła. Jest ono, zarówno w Polsce, jak i za granicą, najczęściej analizowane w odniesieniu do temperatury powietrza mierzonej pośród zabudowy miejskiej na standardowej (lub zbliżonej) wysokości klatki meteorologicznej. W literaturze światowej określa się je mianem *canopy layer urban heat island* (Oke i in. 2017), chociaż mówiąc ogólnie o miejskiej wyspie ciepła często domyślnie przyjmuje się właśnie ten typ *MWC* (tę konwencję przyjęto również w tej pracy, dla uściślenia stosując w dalszej części oznaczenie MWC_T). Wykorzystanie zdalnych metod pomiarowych, głównie satelitarnych, pozwala na badania tzw. powierzchniowej miejskiej wyspy ciepła (MWC_{pow}) (ang. *surface urban heat island*), określającej zróżnicowanie radiacyjnej temperatury powierzchni miejskich. Jeżeli natomiast studia dotyczą struktury termicznej powietrza nad miastem, to mówimy wtedy o tzw. wyspie ciepła warstwy granicznej atmosfery (MWC_{wg}) (ang. *boundary layer urban heat island*). Oke i in. (2017) wyróżniają jeszcze tzw. podpowierzchniową miejską wyspę ciepła (ang. *subsurface urban heat island*) dotyczącą temperatury głębszych warstw gruntu i modyfikacji gradientu geotermicznego przez miasto, lecz prac dotyczących tej problematyki jest bardzo niewiele (w Polsce brak).

W świetle średnich wartości rocznych miejska wyspa ciepła (MWC_T) jest stosunkowo słabo zaznaczona, a różnice temperatury miasto – tereny zamiejskie (ΔT_{m-z}) dla głównych miast polskich rzadko przekraczają jeden stopień (Przybylak i in. 2017). W wyjątkowo sprzyjających warunkach pogodowych różnice te ($\Delta T_{m-z(max)}$) mogą jednak być nawet wyższe niż 10°C . Największe zanotowane kontrasty termiczne miasto – tereny zamiejskie dla miast polskich przekraczają 11°C w Łodzi (Kłysik, Fortuniak 1999), sięgają prawie 11°C w Warszawie ($10,8^\circ\text{C}$ – Wawer 1995), 10°C w Krakowie ($9,9^\circ\text{C}$ – Bokwa 2010), 9°C we Wrocławiu (Dubicki i in. 2002), 8°C w Lublinie ($8,0^\circ\text{C}$ – Kaszewski, Siwek 1998) oraz 7°C w Bydgoszczy (Dudek i in. 2008) czy Poznaniu (Półrolniczak i in. 2017). Wartości te mieszczą się w zakresie notowanym dla innych miast, choć zależność $\Delta T_{m-z(max)}$ od liczby mieszkańców jest słabiej zaznaczona niż ogólnie dla miast europejskich (rys. 1). Wyjątkowo duża wartość w Łodzi może być częściowo wynikiem faktu, że cytowane ekstremalne $\Delta T_{m-z(max)}$ dotyczyło pomiarów patrolowych, pozwalających na wysokie uszczegółowienie pola

temperatury wzdłuż trasy przejazdu, podczas gdy wyniki dla większości innych stacji pochodzą z posterunków stacjonarnych. Najwyższe obserwowane w Łodzi $\Delta T_{m-z(max)}$ liczone na podstawie stacjonarnych punktów pomiarowych są już rzędu 9°C .

Należy podkreślić, że przytoczone wartości odnoszą się do pojawiających się wyjątkowo rzadko warunków ekstremalnych, natomiast typowe wartości kontrastów termicznych miasto – tereny zamiejskie, pojawiające się nocą w sprzyjających warunkach pogodowych sięgają w dużych miastach $4\text{--}6^{\circ}\text{C}$ latem i $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$ zimą, średnio (wszystkie warunki pogodowe) – $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ latem i 1°C bądź mniej zimą. W ciągu dnia różnice temperatury są niewielkie, czasami wręcz można zaobserwować niższe temperatury w centrum miasta niż na terenach zamiejskich. Jest to przejawem dynamicznego charakteru MWC_T – kontrasty termiczne ΔT_{m-z} zaczynają szybko rosnąć w czasie zachodu Słońca, następnie w ciągu nocy utrzymują się na względnie stałym poziomie, aby gwałtownie zaniknąć po wschodzie Słońca (np. Kaszewski, Siwek 1998; Fortuniak i in. 2006). Badania polskie potwierdzają również zależność MWC_T od elementów meteorologicznych. Wspomniane wcześniej „sprzyjające warunki pogodowe” to bezchmurne, bezwietrzne noce. Wraz ze wzrostem prędkości wiatru i zachmurzenia miejska wyspa ciepła staje się coraz słabsza. Ponieważ warunki takie najczęściej występują w sytuacjach antycyklonalnych, ten typ cyrkulacji sprzyja formowaniu się MWC_T . Powyższe ustalenia dla miast polskich są zbieżne z ogólnie akceptowanymi prawidłowościami dotyczącymi MWC_T



Rys. 1. Najwyższe zaobserwowane różnice temperatury ($\Delta T_{m-z(max)}$) między miastem a terenem zamiejskim w funkcji liczby mieszkańców (POP) dla miast polskich, europejskich i północnoamerykańskich (na podstawie Oke 1973, zmodyfikowane)

Fig. 1. The highest observed urban-rural temperature differences ($\Delta T_{m-z(max)}$) as a function of population (POP) for Polish, European and North American cities (after Oke 1973, modified)

(Oke 1982; Arnfield 2003; Oke i in. 2017), natomiast dodatkowo w polskich pracach zwrócono uwagę na pojawiające się sporadycznie, zwłaszcza przy automatycznej sieci pomiarowej, duże różnice wynikające z czynników adwekcyjnych, niekoniecznie związane z efektem miejskim (Szymanowski 2005; Fortuniak i in. 2006; Bokwa 2010; Przybylak i in. 2017).

Powierzchniowej miejskiej wyspie ciepła poświęcono w piśmiennictwie polskim mniej uwagi, mimo iż pierwsze próby rejestracji temperatury podłoża za pomocą lotniczych zdjęć termalnych podjęto w Warszawie już w latach 70. XX wieku (Kraujalis 1980). W większości są to wymienione w poprzednim rozdziale prace wykorzystujące satelitarne pomiary temperatury powierzchni. Podstawową cechą odróżniającą MWC_{Pow} od MWC_T jest fakt, że ze względu na silne nagrzewanie się powierzchni sztucznych od Słońca MWC_{Pow} zaznacza się wyraźnie również w ciągu dnia. Obrazy satelitarne pozwalają dodatkowo na uszczegółowienie rozkładu pola temperatury na obszarze miasta w przypadku ograniczonej liczby punktów pomiarowych, przy czym próby szacowania temperatury powietrza bezpośrednio na podstawie pomiarów temperatury radiacyjnej mogą być, szczególnie w mieście, obciążone bardzo dużym błędem. Zwłaszcza w ciągu dnia nie można utożsamiać MWC_{Pow} z MWC_T .

Stosunkowo niewiele prac podejmuje problem miejskiej wyspy ciepła warstwy granicznej atmosfery (MWC_{WG}). W Polsce badania MWC_{WG} prowadzone były głównie w Krakowie i Wrocławiu i dotyczyły przede wszystkim występowania inwersji termicznych. W obu miastach najwięcej inwersji obserwuje się w chłodnej porze roku (ok. 70%), najmniej latem (40-50%) (Drzeniecka, 2005; Hajto, Rozwoda 2010). Walczewski (1994) określił średnią miąższość inwersji dolnych w Krakowie na 60-200 m, natomiast badania prowadzone przez Lewińską (1984) pozwoliły ustalić, że zasięg MWC w Krakowie wynosił 100-200 m w półroczu chłodnym i powyżej 200 m w półroczu ciepłym. Pionowy zasięg warstwy mieszania w Krakowie, wyznaczający jednocześnie wysokość do jakiej obserwuje się oddziaływanie powierzchni miejskiej, Walczewski (2005) określił na 800-1000 m w dzień i 300-400 m w nocy w cieplej porze roku oraz 300-600 m w chłodnej porze roku.

Analogicznie do kontrastów termicznych analizowano zróżnicowanie pola wilgotności powietrza, choć prac poświęconych tej problematyce jest znacznie mniej. Sytuację komplikują różne charakterystyki wilgotności, przy czym wilgotność względna charakteryzuje się odmiennym jakościowo przebiegiem niż bezwzględne miary zawartości pary wodnej w powietrzu, takie jak: prężność pary wodnej, wilgotność bezwzględna, wilgotność właściwa czy stosunek zmieszania. W świetle wilgotności względnej miasto jawi się najczęściej jako obszar relatywnie suchy. Analogicznie jak w przypadku MWC_T , obserwuje się tu wyraźną dynamikę dobową i roczną – największe różnice (rzędu 20-40%) mogą pojawiać się w pogodne letnie noce, a wzrost prędkości wiatru i zachmurzenia redukuje kontrasty wilgotności. Zimą, ze względu na bliski nasyceniu stan

powietrza, różnice te rzadko przekraczają 10%. Również w świetle średnich rocznych wilgotność względna jest z reguły w centrum miasta o kilka procent niższa niż na terenach zamiejskich (Lewińska i in. 1982; Gluza, Kaszewski 1984; Stopa-Boryczka 1992, 2003; Lewińska 2000; Dudek i in. 2008; Uscka-Kowalkowska i in. 2014). Wilgotność wyrażona w jednostkach bezwzględnych (wszystkie wymienione wyżej miary bezwzględne mają jakościowo podobny przebieg) jest zwykle w cieplej porze roku w ciągu dnia na terenach zamiejskich wyższa niż w mieście ze względu na zwiększoną ewapotranspirację terenów zielonych. Nocą, przy dobrze rozwiniętej *MWC*, można zaobserwować wyższe wartości w mieście. Prawdopodobnie wynika to z bardziej intensywnego skraplania (rosa) na terenach zamiejskich, skutkującego obniżeniem zawartości pary wodnej w przypowierzchniowych warstwach powietrza. Należy jednak zwrócić uwagę, że chociaż powyższe prawidłowości przyjmuje się za typowe dla miast umiarkowanych szerokości geograficznych (Oke i in. 2017), to w przeciwieństwie do *MWC*, sprzyjające warunki pogodowe (bezchmurne, bezwietrzne noce) nie zawsze prowadzą do rozwoju kontrastów wilgotnościowych zgodnie z przedstawionym schematem (Fortuniak i in. 2006). Złożony bieg dobowy różnic bezwzględnych miar wilgotności pomiędzy miastem a terenem zamiejskim może być przyczyną rozbieżnych (różnych co do znaku) wyników odnośnie wartości średnich tych różnic w miastach polskich (Stopa-Boryczka 1992, 2003; Lewińska 2000; Dudek i in. 2008; Uscka-Kowalkowska i in. 2014).

Jednym z pierwszych elementów meteorologicznych analizowanych w powojennych opracowaniach klimatu miast były opady atmosferyczne. Generalnie w miastach polskich, podobnie jak w większości miast położonych w umiarkowanej strefie klimatycznej, notuje się większe sumy roczne opadów niż na terenach je otaczających (Kaczorowska 1967; Lewińska 1967; Schmuck 1967; Lorenc 1991; Bartnik, Marcinkowski 2015). W przypadku niektórych obszarów zaobserwowano również typowe przesunięcie strefy zwiększonych opadów w kierunku wschodnim (zawietrzny w stosunku do przeważających kierunku wiatrów). Wzmoczone ruchy pionowe, będące wynikiem konwekcji termicznej i przyziemnej konwergencji, są prawdopodobnie główną przyczyną tego efektu. Hipotezę tę może potwierdzać intensyfikacja opadów nawałnych, burz i gradu, a także zachmurzenia o charakterze konwekcyjnym, obserwowana na terenach zurbanizowanych, głównie po zawietrznej stronie miasta (Lewińska 2000). Ze względu na efekt aerozolowy bardziej dyskusyjny jest wpływ zanieczyszczeń powietrza na opady, zwłaszcza intensywne, natomiast zwiększona liczba jąder kondensacji na obszarach zurbanizowanych niewątpliwie przyczynia się do zmniejszenia widzialności i wzrostu liczby mgieł (topienie aerozoli).

Elementem meteorologicznym wyjątkowo istotnym z punktu widzenia jakości powietrza w mieście są warunki anemometryczne. Wpływ zabudowy miejskiej na prędkość wiatru można rozpatrywać w różnych skalach. W przypadku średnich prędkości wiatru na danym obszarze, zwiększona szorstkość

podłoża powoduje, że wiatr w centralnych dzielnicach miasta jest średnio o około 30-50% (lub nawet więcej) słabszy niż na otwartych terenach zamieszkanych (Ozga 1998; Fortuniak i in. 2006; Nidzgorska-Lencewicz, Czarnecka 2011; Strzyżewski i in. 2015). W skali poszczególnych form architektonicznych, efekty tunelowe bądź przesłanianie mogą znacząco zwiększać lub zmniejszać prędkość wiatru. Dlatego dosyć trudne są reprezentatywne pomiary bezpośrednich różnic prędkości wiatru. Zamiast tego w celu określenia stopnia osłabienia wiatru przez zabudowę miejską wyznaczany jest rozkład współczynnika szorstkości (z_0). Współczynnik szorstkości stosowany jest również do wyznaczania tzw. korytarzy przewietrzających, przy czym obliczanie z_0 dla pojedynczych budynków z ich najbliższym otoczeniem, czasami stosowane w tym celu (np. Bochenek, Klemm 2016), jest wysoce dyskusyjne z punktu widzenia fizycznej interpretacji z_0 . Zwiększona szorstkość podłoża powoduje też zmiany kierunku wiatru i pojawienie się stref konwergencji wymuszających pionowe ruchy powietrza. Prądy te są dodatkowo wzmacniane konwekcją spowodowaną miejską nadwyżką ciepła. Sama konwekcja miejska może natomiast, w przypadku ciszy lub słabego wiatru w skali synoptycznej, prowadzić do formowania się cyrkulacji bryzowej. W tego typu sytuacjach prędkość wiatru w mieście bywa wyższa niż na terenach zamieszkanych (Siedlecki 2003; Fortuniak i in. 2006). Drugą potencjalną przyczyną większych prędkości wiatru w mieście jest turbulencyjny transport pędu wynikający z intensyfikacji turbulencji przez zabudowę miejską (szorstkość) i MWC (zmniejszenie stabilności).

Wpływowi miasta na warunki solarne poświęcano w badaniach polskich stosunkowo dużo uwagi już od początków badań instrumentalnych (Gorczyński 1910, 1939; Merecki 1915; Stenz 1922). Zanieczyszczenie powietrza na terenach zurbanizowanych modyfikuje praktycznie wszystkie składniki bilansu radiacyjnego. W paśmie krótkofalowym jest ono główną przyczyną redukcji (o ok. 10-15%) współczynnika przeźroczystości (Paszyński 1959; Dziewulska-Łosiowa 1962; Krawczyk 1968; Hess i in. 1980; Olecki 1992). Zmniejszenie przeźroczystości i wzrost zachmurzenia prowadzą również do redukcji natężenia bezpośredniego i całkowitego promieniowania słonecznego, a także usłonecznienia. W przypadku usłonecznienia straty te są najczęściej oceniane na 5-15% (Kuczmarowski 1982; Morawska-Horawska 1984; Marciniak, Wójcik 1991; Matuszko 2009). Sumy całkowitego promieniowania słonecznego w centrum miast są średnio o 5-8% niższe w stosunku do obszarów zamieszkanych (Hess i in. 1980; Kozłowska-Szczęśna, Podogrocki 1995; Podstawczyńska 2007). W okresie zimowym redukcja ta zwiększa się średnio do około 10-15% (w poszczególnych dniach nawet ponad 40%), latem są to wielkości rzędu 2-6%. W jeszcze większym stopniu niż promieniowanie całkowite tłumione jest promieniowanie bezpośrednie, natomiast promieniowanie rozproszone jest na terenach zurbanizowanych silniejsze niż na obszarach zamieszkanych (Olecki 1973; Hess i in. 1980). Należy jednak podkreślić, że ze względu na zależność absorpcji

promieniowania od zanieczyszczenia powietrza, prowadzone w ostatnich latach działania mające na celu poprawę stanu aerosanitarne miast przyczyniają się jednocześnie do redukcji efektu miejskiego w warunkach solarnych.

Zdolność pochłaniania energii słonecznej przez miasto jest determinowana przez albedo powierzchni. W literaturze znaleźć można wiele wyników pomiarów albedo wybranych powierzchni miejskich (blachy, papy, asfaltu, cegły, betonu itp.), lecz znacznie mniej prac przytacza wyniki pomiarów uśrednionych dla całego fragmentu miasta. Uzyskanie takich danych wiąże się z koniecznością umieszczenia czujnika wysoko nad budynkami. Na średnią wartość albedo wpływa bowiem nie tylko albedo poszczególnych powierzchni, ale również geometria miasta powodująca zwiększone pochłanianie wskutek odbić wielokrotnych – sam czynnik geometryczny może spowodować zmniejszenie albedo o kilkadziesiąt procent (Fortuniak 2008; Pawlak 2009). Dlatego dla obszarów miejskich albedo jest stosunkowo małe – ze średnią 0,14 (Oke i in. 2017). Kilkuletnie pomiary prowadzone w Łodzi wskazują, że w centralnych dzielnicach miasta są to wartości niższe, rzędu 0,07-0,09 (Pawlak 2009; Fortuniak 2010). Podane wielkości dotyczą warunków bezśnieżnych, pokrywa śnieżna powoduje bowiem wzrost albedo. Jednak ze względu na występowanie w mieście pionowych powierzchni niepokrytych śniegiem, albedo na terenach miejskich jest w dalszym ciągu relatywnie niskie.

Stosunkowo niewiele danych pomiarowych dotyczy badań wpływu miasta na promieniowanie w paśmie długofalowym. Oke i in. (2017) sugerują, że promieniowanie zwrotne atmosfery jest na terenach zurbanizowanych o ok. 5-10% (20 Wm^{-2}) wyższe niż na terenach otaczających. Wstępne wyniki badań w Łodzi sugerują podobne wartości (Fortuniak i in. 2015).

Pomiary pozostałych składników bilansu cieplnego miast, w szczególności turbulencyjnych strumieni ciepła jawnego i utajonego, były prowadzone na szerzą skalę praktycznie tylko w Łodzi. Pokazują one charakterystyczną przewagę strumienia ciepła jawnego nad strumieniem ciepła utajonego (współczynnik Bowena w godzinach południowych rzędu 1,5-2), występowanie znaczącego strumienia ciepła jawnego po zachodzie Słońca i praktycznie stale (również w godzinach nocnych) dodatni (skierowany od powierzchni do atmosfery) strumień ciepła utajonego (Offerle i in. 2006a-b; Fortuniak 2010). Jednocześnie w godzinach nocnych notuje się relatywnie dużą w stosunku do innych miast liczbę przypadków ujemnego strumienia ciepła jawnego (turbulencyjny transport ciepła od atmosfery do powierzchni miejskiej).

Podsumowanie

Dorobek polskich klimatologów w zakresie badań klimatu terenów zurbanizowanych stanowi istotny wkład w poznanie antropogenicznych mody-

fikacji klimatu lokalnego. Ich ustalenia są zbieżne z wynikami otrzymanymi w innych miastach umiarkowanych szerokości geograficznych, pozwalając na uściślenie ogólnych prawidłowości w warunkach polskich i przyczyniając się do rozwoju tej subdyscypliny. Wiele przedstawionych efektów miejskich, takich jak miejska wyspa ciepła, zostało już stosunkowo dobrze rozpoznanych. Inne, jak na przykład zagadnienia związane z pełnym bilansem cieplnym, w tym promieniowaniem długofalowym i strumieniami turbulencyjnymi, wymagają dalszych studiów. Duże możliwości w zakresie rozwoju klimatologii miejskiej dają nowe techniki pomiarowe. Powszechnie stosowana automatyzacja pomiarów pozwala na uzyskanie danych z wielu lokalizacji z niespotykaną wcześniej rozdzielczością czasową, a techniki zdalne umożliwiają dalsze uszczegółowienie przestrzenne. Dostępność stosunkowo tanich czujników i możliwości bezpośredniego transferu danych spowodowała rozwój sieci pomiarowych organizowanych nie tylko przez placówki naukowo-badawcze, lecz również przez instytucje rządowe i samorządowe oraz firmy komercyjne. Sieci te dostarczają znacznej ilości danych, niejednokrotnie w bardzo atrakcyjnej formie. Niestety, częstym mankamentem danych pochodzących z tego typu źródeł jest ich wątpliwa jakość, wynikająca niekoniecznie z samej jakości czujników, lecz przede wszystkim z braku wiedzy eksperckiej w fazie projektowania lokalizacji punktów pomiarowych (np. czujniki umieszczone w miejscach uniemożliwiających właściwe przewietrzanie bądź wystawione na bezpośrednie działanie promieni słonecznych bez osłon radiacyjnych). Brak wiedzy eksperckiej daje się również zauważyć w wielu „eksperymentach” czy projektach, w których określone efekty miejskie traktowane są bardzo jednostronnie, bez pełnej analizy ich potencjalnie pozytywnych i negatywnych skutków. Zalecenia zawarte w tego typu opracowaniach mogą przyczynić się do podjęcia kosztownych działań przynoszących realnie niewielkie korzyści. Dlatego, obok badań o charakterze typowo poznawczym, za jedno z głównych wyzwań polskiej klimatologii miejskiej należy obecnie uznać upowszechnienie wiedzy na temat wpływu zabudowy na lokalne warunki klimatyczne. Pozwoli to na jej właściwe wykorzystanie w działaniach mających na celu poprawę jakości życia mieszkańców terenów zurbanizowanych w dobie współczesnych zmian klimatycznych.

Podziękowania

Chciałbym bardzo serdecznie podziękować osobom, które udostępniły mi materiały i informacje umożliwiające powstanie tego artykułu. Są to: Krzysztof Błażejczyk, Anita Bokwa, Małgorzata Czarnecka, Janusz Filipiak, Bogusław Kaszewski, Leszek Kolendowicz, Ewa Łupikasza, Mirosław Miętus, Tadeusz Niedźwiedz, Włodzimierz Pawlak, Marek Półrolniczak, Rajmund Przybylak, Joanna Uscka-Kowalkowska, Mariusz Szymanowski, Elwira Żmudzka.

L i t e r a t u r a

- Arażny A., Uscka-Kowalkowska J., Kejna M., 2015, Comparison of the predicted insulation of clothing in Toruń and Koniczynka in the years 1998-2012, *Annals of Warsaw Univeristy of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation*, 47 (1), 55-67, DOI 10.1515/ssgw-2015-0005
- Arażny A., Uscka-Kowalkowska J., Kejna M., Przybylak R., Kunz M., 2016, Zróżnicowanie warunków biometeorologicznych w Toruniu i jego strefie podmiejskiej w 2012 r., *Przegląd Geograficzny*, 88 (1), 87-108, DOI: 10.7163/PrzG.2016.1.5
- Arnfield A.J., 2003, Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island, *International Journal of Climatology*, 23 (1), 1-26, DOI: 10.1002/joc.859
- Badach A., Gluza A., Kaszewski B.M., Niedziałek H., 1985, Temperatura powietrza w Lublinie w latach 1951-1980, *Annales Universitatis Mariae Curie-Sklodowska. Sectio B: Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia*, 60 (9), 169-193
- Bartnik A., Marcinkowski M., 2015, Przestrzenne zróżnicowanie opadów atmosferycznych na obszarze Łodzi, *Acta Universitatis Lodziensis. Folia Geographica Physica*, 14, 5-15
- Bednorz E., 2003, Wstępne porównanie średniej dobowej temperatury powietrza dwóch stacji meteorologicznych w rejonie Poznania, *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią. Seria A: Geografia Fizyczna*, 54, 21-25
- Bil G., 2000, Inwersje temperatury w Sosnowcu, [w:] *Środowisko przyrodnicze regionu górnośląskiego – stan poznania, zagrożenia i ochrona*, A.T. Jankowski, U. Myga-Piątek, S. Ostaficzuk (red.), Uniwersytet Śląski, Oddział Katowicki PTG, Sosnowiec, 13-20
- Bilińska D., Skjøth C.A., Werner M., Kryza M., Malkiewicz M., Krynicka J., Drzeniecka-Osiadacz A., 2017, Source regions of ragweed pollen arriving in south-western Poland and the influence of meteorological data on the HYSPLIT model results, *Aerobiologia*, 33 (3), 315-326, DOI: 10.1007/s10453-017-9471-9
- Błażejczyk K., 2002, Znaczenie czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej, *Dokumentacja Geograficzna*, 26, 160 s.
- Błażejczyk K., 2013, Distribution of Universal Thermal Climate Index (UTCI) in Warsaw, *Geographia Polonica*, 86 (1), 79-80
- Błażejczyk K., Kuchcik M., Dudek W., Kręcisz B., Błażejczyk A., Milewski P., Szmyd J., Pałczyński C., 2016, Urban Heat Island and bioclimatic comfort in Warsaw, [w:] *Counteracting Urban Heat Island effects in a global climate change scenario*, F. Musco (red.), Springer International Publishing, 305-321
- Błażejczyk K., Kuchcik M., Milewski P., Dudek W., Kręcisz B., Błażejczyk A., Szmyd J., Degórska B., Pałczyński C., 2014, Miejska wyspa ciepła w Warszawie. Uwarunkowania klimatyczne i urbanistyczne, *Wydawnictwo Akademickie Sedno*, Warszawa, 171 s.
- Bochenek A., Klemm K., 2016, Wyznaczanie korytarzy przewietrzających przy użyciu metody morfometrycznej dla wybranego fragmentu miasta Łodzi, *Budownictwo i Architektura*, 15 (4), 139-151

- Bokwa A., 2010, Wieloletnie zmiany struktury mezoklimatu miasta na przykładzie Krakowa, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 258 s.
- Bokwa A., 2019, Rozwój badań nad klimatem lokalnym Krakowa, *Acta Geographica Lodziensia*, w druku
- Bokwa A., Hajto M. J., Walawender J.P., Szymanowski M., 2015, Influence of diversified relief on the urban heat island in the city of Kraków, Poland, *Theoretical and Applied Climatology*, 122 (1-2), 365-382, DOI: 10.1007/s00704-015-1577-9
- Busiakiewicz A., 2011, Dynamika miejskiej wyspy ciepła na obszarze Poznania w świetle wybranych elementów meteorologicznych, rozprawa doktorska, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Poznań, 182 s.
- Caputa Z.A., Leśniok M.R., Niedźwiedz T., Bil-Knozova G., 2009, The influence of atmospheric circulation and cloudiness on the intensity of temperature inversions in Sosnowiec (Upper Silesia, Southern Poland), *International Journal of Environment and Waste Management*, 4 (1-2), 17-31, DOI: 10.1504/IJEW.2009.026881
- Cedro A., Nowak G., 2013, Tree ring width and health status of the red oak (*Quercus rubra* L.) under urban conditions in Szczecin (NW Poland), *Plant Diversity and Evolution*, 130 (3-4), 183-194, DOI: 10.1127/1869-6155/2013/0130-0064
- Czarnecka M., Mąkosza A., Nidzgorska-Lencewicz J., 2011, Variability of meteorological elements shaping biometeorological conditions in Szczecin, Poland, *Theoretical and Applied Climatology*, 104 (1-2), 101-110, DOI: 10.1007/s00704-010-0326-3
- Dobek M., Demczuk P., Nowosad M., 2013, Spatial variation of the Universal Thermal Climate Index in Lublin in specified weather scenarios, *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio B: Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia*, 68 (1), 21-37, DOI: 10.2478/v10066-012-0026-3
- Dobek M., Gawrysiak L., 2009, Spatial distribution of insolation in Lublin, *Prace Geograficzne*, 122, 49-53
- Drużkowski M., 1992, Wpływ ukształtowania terenu i miejskiej wyspy ciepła na stosunki termiczne Krakowa i okolic, *Folia Geographica. Series Geographica-Physica*, 23, 55-63
- Drzeniecka A., 2005, Struktura termiczna warstwy granicznej atmosfery we Wrocławiu i jej wpływ na koncentrację zanieczyszczeń powietrza, rozprawa doktorska, Archiwum Uniwersytetu Wrocławskiego
- Drzeniecka A., Dubicka M., Netzel P., Pyka J.L., Rosiński D., Sikora S., Szymanowski M., 2003, System of the meteorological measurements in the city of Wrocław climate researches, *Acta Universitatis Wratislaviensis, Studia Geograficzne*, 75, 599-608
- Drzeniecka-Osiadacz A., Sawiński T., Muskała P., Korzystka-Muskała M., Bilińska D., 2018, Warunki meteorologiczne ze szczególnym uwzględnieniem struktury warstwy granicznej podczas epizodów wysokich stężeń we Wrocławiu, [w:] Tereny zieleni w ochronie powietrza, Kosmala M. (red.), *Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych*, Toruń, 11-36

- Dubicka M., Rosiński D., Szymanowski M., 2003, The influence of the urban environment on the air humidity in Wrocław, *Acta Universitatis Wratislaviensis, Studia Geograficzne*, 75, 504-527
- Dubicka M., Szymanowski M., 2000, Struktura miejskiej wyspy ciepła i jej związek z warunkami pogodowymi i urbanistycznymi Wrocławia, *Acta Universitatis Wratislaviensis, Studia Geograficzne*, 74, 99-118
- Dubicki A., Dubicka M., Szymanowski M., 2002, Klimat Wrocławia, [w:] Informator o stanie środowiska Wrocławia 2002, K. Smolnicki, M. Szykasiuk (red.), Dolnośląska Fundacja Ekorozwoju, Wydawnictwo A.P.W. Bierońscy, Wrocław, 9-25
- Dudek S., Kuśmierk R., Żarski J., 2008, Porównanie warunków termicznych Bydgoszczy i okolic, [w:] Klimat i bioklimat miast, K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.), Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 157-164
- Dziewulska-Łosiowa A., 1962, Próba oceny zakłócenia przezroczystości atmosfery w Warszawie, *Przegląd Geofizyczny*, 7 (2), 111-116
- Dziewulski W., 1917, O przebiegu rocznym usłonecznienia w Krakowie, Zakopanem i Lwowie, *Sprawozdania Komisji fizyograficznej Akademii Umiejętności*, 51, 18-40
- Filipiak J., Miętus M., 2019, Badania klimatu miejskiego w ośrodkach Polski północnej, *Acta Geographica Lodziensia*, w druku
- Filipiuk E., Kaszewski B.M., Zub T., 1998, Porównanie warunków termicznych w śródmieściu Lublina z obszarami pozamiejskimi, *Acta Universitatis Lodzianensis. Folia Geographica-Physica*, 3, 71-82
- Fortuniak K., 2003, Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 233 s.
- Fortuniak K., 2008, Numerical estimation of the effective albedo of an urban canyon, *Theoretical and Applied Climatology*, 91 (1-4), 245-258, DOI: 10.1007/s00704-007-0312-6
- Fortuniak K., 2010, Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu ciepłego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 232 s.
- Fortuniak K., Kłysik K., Wibig J., 2006, Urban-rural contrasts of meteorological parameters in Łódź, *Theoretical and Applied Climatology*, 84 (1-3), 91-101, DOI: 10.1007/s00704-005-0147-y
- Fortuniak K., Pawlak W., 2015, Selected spectral characteristics of wind turbulence over an urbanized area in the centre of Łódź, Poland, *Boundary-Layer Meteorology*, 154 (1), 137-156, DOI: 10.1007/s10546-014-9966-7
- Fortuniak K., Pawlak W., Siedlecki M., 2013, Integral turbulence statistics over a central European city centre, *Boundary-Layer Meteorology*, 146 (2), 257-276, DOI: 10.1007/s10546-012-9762-1
- Fortuniak K., Pawlak W., Siedlecki M., 2015, Urban-rural differences in longwave radiation – Łódź case study, [w:] Proceedings of the 9th International Conference on Urban Climate, 20-24 lipca 2015, Toulouse, Francja, MeteoFrance

- Gawuć L., Strużewska J., 2016, Impact of MODIS quality control on temporally aggregated urban surface temperature and long-term surface urban heat island intensity, *Remote Sensing*, 8 (5), 374, DOI: 10.3390/rs8050374
- Gluza A., 2000, Charakterystyka usłonecznienia w Lublinie w latach 1952-1991, *Acta Agrophysica*, 34, 43-57
- Gluza A., Kaszewski B.M., 1984, Zróżnicowanie temperatury i wilgotności względnej powietrza w Lublinie, [w:] Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji „Klimat i bioklimat miast”, 22-24 listopada, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 107-113
- Gorczyński W., 1910, O przebiegu rocznym i dziennym usłonecznienia w Krakowie, *Sprawozdania z Posiedzeń Towarzystwa Naukowego Warszawskiego. Wydział III Nauk Matematyczno-Fizycznych*, 3, 162-178
- Gorczyński W., 1939, Stosunki usłonecznienia Warszawy (1903-1938) oraz ich porównanie z Gdynią i Gdańskiem, *Sprawozdania z Posiedzeń Towarzystwa Naukowego Warszawskiego. Wydział III Nauk Matematyczno-Fizycznych*, 32 (1-3), 1-36
- Gorczyński W., Kosińska S., 1916, O temperaturze powietrza w Polsce (z mapami izoterm), *Pamiętnik Fizjograficzny*, 23,
- Gumiński R., 1930, O warunkach klimatycznych przyziemnej warstwy powietrza, *Przegląd Geograficzny*, 10 (3-4), 268-273
- Gumiński R., 1950, Ważniejsze elementy klimatu rolniczego Polski południowo-wschodniej, *Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej*, 3 (1), 57-113
- 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., 1967, O stosunkach termicznych Krakowa (1780-1963), *Przegląd Geofizyczny*, 12 (3-4), 311-330
- Hess M., 1974, Klimat Krakowa, *Folia Geographica. Series Geographica-Physica*, 8, 45-102
- 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
- Howard L., 1818, *The climate of London*, tom 1, W. Philips, Londyn
- Jankowiak J., Parczewski W. (red.), 1978, *Bioklimat uzdrowisk polskich*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 429 s.
- Jastrzębowski W., 1841, Wypadki dostrzeżeń meteorologicznych czynionych w Warszawie blisko przez pół wieku t.j. od 1779 do 1828 roku włącznie przez Karola Bystrzyckiego, Antoniego Magiera i przez innych, oraz uwagi nad nimi dotyczące klimatu Polski. Rzecz wypracowana r. 1829 przez Wojciecha Jastrzębowskiego, *Biblioteka Warszawska*, t. 2, 687-776
- Kaczorowska Z., 1967, Opady Wielkiej Warszawy i jej okolic w okresie 1956-1960, *Przegląd Geofizyczny*, 12 (3-4), 251-271

- Karliński F., 1876, O okresowych zmianach ciepłoty powietrza w Krakowie, Pamiętnik Akademii Umiejętności w Krakowie. Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, 2, 157-191 oraz Kosmos, 1, Lwów, 350-351, 356-357
- Karliński F., 1877, Pierwsze przypadki mierzenia chyżości wiatru w Krakowie, Sprawozdania Akademii Umiejętności w Krakowie. Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, 4, Kraków
- Karliński F., 1898, Dzienny bieg ciepłoty w Krakowie, Sprawozdanie Komisji Fizjograficznej Towarzystwa Naukowego Krakowskiego, 34, 204-207
- Kaszewski B.M., 2017, Próba oceny zieleni przyulicznej w kształtowaniu klimatu miasta, [w:] Roślinność pasów przydrożnych Lublina. Potencjał i zagrożenia, E. Trzaskowska (red.), Urząd Miasta Lublin, 13-22
- Kaszewski B.M., 2019, Badania klimatu Lublina, Acta Geographica Lodziensia, w druku
- Kaszewski B.M., Bilik A., 2015, Zmiany średniej dobowej temperatury powietrza w Lublinie w latach 1951-2010, Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio B: Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia, 70 (1), 71-82
- Kaszewski B.M., Gluza A.F., Siwek G., 2014, Rola suchych dolin w kształtowaniu stosunków termiczno-wilgotnościowych Lublina, [w:] Wąwozy i suche doliny Lublina. Potencjał i zagrożenia, E. Trzaskowska (red.), Urząd Miasta Lublin, 55-70
- Kaszewski B.M., Siwek K., 1998, Cechy przebiegu dobowego temperatury powietrza w centrum i na peryferiach Lublina, Acta Universitatis Lodziensis. Folia Geographica Physica, 3, 213-220
- Kejna M., Uscka-Kowalkowska J., Arażny A., Kunz M., Maszewski R., Przybylak R., 2014, Spatial differentiation of global solar radiation in Toruń and its suburban area (central Poland) in 2012, Bulletin of Geography. Physical Geography Series, 7, 27-56, DOI: 10.2478/bgeo-2014-0002
- Kłysik K., 1996, Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emission in Lodz, Poland, Atmospheric Environment, 30 (20), 3397-3404, DOI: 10.1016/1352-2310(96)00043-X
- Kłysik K., 1998, Charakterystyka powierzchni miejskich w Łodzi z klimatologicznego punktu widzenia, Acta Universitatis Lodziensis. Folia Geographica Physica, 3, 173-185
- Kłysik K., Fortuniak K., 1998, Dobowy i roczny cykl występowania miejskiej wyspy ciepła w Łodzi, Acta Universitatis Lodziensis. Folia Geographica Physica, 3, 23-32
- Kłysik K., Fortuniak K., 1999, Temporal and spatial characteristics of the urban heat island of Łódź, Poland, Atmospheric Environment, 33 (24-25), 3885-3895, DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00131-4
- Kłysik K., Kafar M., Gajda-Pijanowska I., 1995a, Historia obserwacji meteorologicznych w Łodzi, [w:] Klimat i bioklimat miast, K. Kłysik (red.), Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 279-286
- Kłysik K., Zawadzka A., Gajda-Pijanowska I., 1995b, Wstępne wyniki rocznej działalności Miejskiej Stacji Meteorologicznej w Łodzi, [w:] Klimat i bioklimat miast, K. Kłysik (red.), Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 79-86

- Koczorowska R., 1995, Rozkład podstawowych parametrów meteorologicznych w wybranych punktach Poznania, *Gazeta Obserwatora IMGW*, 1 (44), 10
- Kolendowicz L., 1999, Zmniejszenie częstości dni z burzą na przełomie czerwca i lipca w Poznaniu w latach 1961-1990, *Przegląd Geofizyczny*, 44 (1-2), 73-78
- Korycki M., Łobocki L., Wyszogrodzki A., 2016, Numerical simulation of stratified flow around a tall building of a complex shape, *Environmental Fluid Mechanics*, 16 (6), 1143-1171, DOI: 10.1007/s10652-016-9470-3
- Korzeniewski J., 1994, Wpływ cyrkulacji atmosferycznej i środowiska geograficznego na temperaturę powietrza w Trójmieście, *Peribalticum*, VI, 45-94
- Kossowska U., 1970, Osobliwości klimatu wielkomięjskiego na przykładzie Warszawy, Maszynopis pracy doktorskiej wykonanej w Zakładzie Klimatologii UW, skrót pracy, 1973, *Prace i Studia IGUW. Klimatologia*, 7, 141-185
- Kossowska-Cezak U., Osowiec M., 2017, Wojciech Jastrzębowski jako klimatolog, *Przegląd Geofizyczny*, 62 (3-4), 237-351
- Kossowska-Cezak U., Wawer J., 2014, Skrajności termiczne w klimacie Warszawy (1947-2013), *Prace i Studia Geograficzne*, 56, 119-145
- Kossowski J., 1970, Zmienność z dnia na dzień maksymalnej i minimalnej temperatury powietrza w Lublinie w latach 1951-1960, *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio B: Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia*, 25 (6), 159-173
- Kossowski J., 1973, Liczba dni i nocy bezchmurnych w Lublinie w okresie 1961-1970, *Folia Societatis Scientiarum Lublinensis. Geografia*, 15 (1), 73-78
- Kozłowska-Szczęśna T., 2000, Stan badań klimatu i bioklimatu uzdrowisk polskich, *Dokumentacja Geograficzna*, 16, 61 s.
- Kozłowska-Szczęśna T., Błażejczyk K., Krawczyk B., 1996, Środowisko fizycznogeograficzne w Warszawie – niektóre zagadnienia, *Atlas Warszawy*, z. 4, G. Węclawowicz, J. Książak, A. Jarosz (red.), Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Polska Akademia Nauk, Warszawa, 112 s.
- Kozłowska-Szczęśna T., Błażejczyk K., Krawczyk B., Limanówka D., 2002, Bioklimat uzdrowisk polskich i możliwości jego wykorzystania w lecznictwie, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Polska Akademia Nauk, Warszawa, 611 s.
- Kozłowska-Szczęśna T., Krawczyk B., Błażejczyk K., 2001, Charakterystyczne cechy klimatu Warszawy, [w:] *Badania środowiska fizycznogeograficznego aglomeracji warszawskiej*, B. Krawczyk, G. Węclawowicz (red.), *Prace Geograficzne*, 180, 39-56
- Kozłowska-Szczęśna T., Podogrocki J., 1995, Antropogeniczne zmiany warunków radiacyjnych w Warszawie, [w:] *Klimat i bioklimat miast*, K. Kłysik (red.), Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 87-97
- Koźuchowski K., 1995, The development of an urban effect in the long-term changes in temperature in Cracow, [w:] *Klimat i bioklimat miast*, K. Kłysik (red.), Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 153-162
- Kraujalis M.W., 1980, Zróżnicowanie termiczne podłoża atmosfery na obszarze miasta, *Dokumentacja Geograficzna*, 3, 84-88

- Krawczyk B., 1968, Badania zmętnienia atmosfery w Warszawie w latach 1961-1963, *Przegląd Geograficzny*, 4, 823-832
- Kryza M., Drzeniecka-Osiadacz A., Werner M., Netzel P., Dore A.J., 2015, Comparison of the WRF and Sodar derived planetary boundary layer height, *International Journal of Environmental Pollution*, 58 (1-2), 3-14, DOI: 10.1504/IJEP.2015.076579
- Kuchcik M., Dudek W., Błażejczyk K., Milewski P., Błażejczyk A., 2016, Two faces to the greenery on housing estates-mitigating climate but aggravating allergy. A Warsaw case study, *Urban Forestry and Urban Greening*, 16, 170-181, DOI: 10.1016/j.ufug.2016.02.012
- Kuchcik M., Szmyd J., Błażejczyk K., Baranowski J., 2019, Badania klimatu i bioklimatu miasta prowadzone w IGiPZ PAN, *Acta Geographica Lodziensia*, w druku
- Kuczmarowski M., 1982, Usłonecznienie w Polsce w okresie 1961-1970, *Czasopismo Geograficzne*, 53 (2), 149-157
- Kuczyński L.S., 1884, Przebieg roczny ciepłoty powietrza w Krakowie, obliczony na podstawie 50-letnich spostrzeżeń (1826-1875) sposobem nowym, prostszym i ściślejszym niż dotąd używane, *Pamiętnik Akademii Umiejętności. Wydział Matematyczno-Przyrodniczy*, 9, 73-112
- Kulesza K., Żmudzka E., Leziak K., 2017, Modern thermal hazards in a big city - how to detect, analyse and assess them? The case of Warsaw, Poland, *Cities and Climate Conference 2017*, 19-21 września, Potsdam, Institute for Climate Impact Research, Potsdam, poster
- Lechowicz-Kwiecień K., 1961, Usłonecznienie Gdyni, *Biuletyn Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego*, 9, 58-80
- Lewińska J., 1967, Opady atmosferyczne w Wielkim Krakowie, *Prace Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego*, 91, 19-28
- Lewińska J., 1984, Struktura termiczna powietrza nad Krakowem, *Biuletyn Instytutu Kształtowania Środowiska*, 3-4, 46-52
- Lewińska J., 2000, *Klimat miasta. Zasoby, zagrożenia, kształtowanie*, Instytut Rozwoju Miast, Kraków, 151 s.
- Lewińska J., Bartosik J., Baścik J., Czerwieniec M., Zgud K., 1982, Wpływ miasta na klimat lokalny (na przykładzie aglomeracji krakowskiej), *Instytut Kształtowania Środowiska*, Warszawa, 106 s.
- Lorenc H., 1991, Wpływ urbanizacji Warszawy na zmienność opadów atmosferycznych, *Wiadomości IMGW*, 35 (1-4), 109-126
- Lorenc H., Mazur A., 2003, *Współczesne problemy klimatu Warszawy*, IMGW, Warszawa, 69 s.
- Majkowska A., Kolendowicz L., Półrolniczak M., Hauke J., Czernecki B., 2017, The urban heat island in the city of Poznań as derived from Landsat 5 TM, *Theoretical Applied Climatology*, 128 (3-4), 769-783, DOI: 10.1007/s00704-016-1737-6
- 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. (red.), 2007, *Klimat Krakowa w XX wieku*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 251 s.
- Matuszko D., 2009, *Wpływ zachmurzenia na usłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne na przykładzie krakowskiej serii pomiarów*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków, 232 s.
- Matuszko D., Wojkowski J., 2007, *Zróżnicowanie przestrzenne wybranych cech klimatu Krakowa*, [w:] *Klimat Krakowa w XX wieku*, D. Matuszko (red.), Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 201-204
- Merecki R., 1915, *Klimatologia ziem polskich*, Drukarnia i Litografia Jana Cotty, Warszawa, 313 s.
- Michałowski M., 1962, *Burze atmosferyczne w Lublinie*, Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio B: Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia, 17 (13), 302-324
- Michna E., 1955, *Częstotliwość występowania rodzajów chmur w Lublinie*, Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio B: Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia, 10 (6), 301-319
- Miętus M., 1998, *O rekonstrukcji i homogenizacji wieloletniej serii średniej miesięcznej temperatury ze stacji w Gdańsku-Wrzeszczu 1851-1995*, Wiadomości IMGW, 42 (2), 41-63
- Miętus M., Filipiak J., 2001, *Struktura czasowo-przestrzennej zmienności warunków termicznych w rejonie Zatoki Gdańskiej*, Materiały Badawcze IMGW. Seria Meteorologia, 32, 53 s.
- Miętus M., Filipiak J., Wyszkowski A. (red.), 2007, *200 lat regularnych pomiarów i obserwacji meteorologicznych w Gdańsku*, IMGW, Warszawa, 228 s.
- Miętus M., Wielbińska D., Owczarek M., 1994, *Historia obserwacji meteorologicznych na niektórych stacjach polskiego wybrzeża*, Wiadomości IMGW, 38 (4), 149-162
- Milata S., 1959, *Częstotliwość inwersji względnych temperatury powietrza w Krakowie w latach 1954, 1955 i 1957*, Przegląd Geofizyczny, 4 (1), 19-37
- Morawska M., 1963, *Zachmurzenie i usłonecznienie Krakowa w latach 1859-1958*, Prace Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego, 81, 46 s.
- Morawska-Horawska M., 1984, *Współczesne zmiany w zachmurzeniu i usłonecznieniu Krakowa na tle 120-lecia*, Przegląd Geofizyczny, 29 (3), 271-284
- Morawska-Horawska M., 1991, *Wpływ rozwoju miast i globalnego ocieplenia na wzrost temperatury powietrza w Krakowie w 100-leciu 1881-1980*, Przegląd Geofizyczny, 36 (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
- Mrugeła S., Paczos S., Ryżyk E., 1991, *Wstępne wyniki badań topoklimatycznych na obszarze Lublina*, Acta Universitatis Wratislaviensis, 1213, Prace Instytutu Geograficznego. Seria A: Geografia Fizyczna, 5, 289-298
- Netzel P., Ślopek J., Drzeniecka-Osiadacz A., 2012, *Verification of SBL models by mobile SODAR measurements*, International Journal of Environment and Pollution, 50 (1-4), 250-263, DOI: 10.1504/IJEP.2012.051197

- Nidzgorzka-Lencewicz J., Czarnecka M., 2011, Deformacja warunków anemometrycznych w Szczecinie, *Prace i Studia Geograficzne*, 47, 401-408
- Niedźwiedź T., Obrębska-Starkłowa B., Olecki Z., 1984, Stosunki bioklimatyczne Krakowa, *Problemy Uzdrawiskowe*, 1-2 (195-196), 143-151
- Nowak A., 2009, Analiza miejskiej wyspy ciepła na obszarze Poznania, *Prace Geograficzne*, 122, 99-110
- Nowosad M., 2012, Zmiany grubości pokrywy śnieżnej w Lublinie i ich uwarunkowania cyrkulacyjne, [w:] *Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu klimatu*, Z. Bielec-Bąkowska, E. Łupikasa, A. Widawski (red), Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego, Sosnowiec, 157-166
- Nowosad M., Bartoszek K., 2007, Wieloletnia zmienność grubości pokrywy śnieżnej w okolicy Lublina, [w:] *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych*, K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 411-421
- Nurek T., Korzeniewski J., Trapp J., Wyszowski A., 1992, Bioklimat aglomeracji gdańskiej, *Zeszyty Naukowe Wydziału Biologii, Geografii i Oceanologii: Geografia*, 18, 21-44
- Offerle B., Grimmond C.S.B., Fortuniak K., Klysik K., Oke T.R., 2006a, Temporal variations in heat fluxes over a central European city centre, *Theoretical and Applied Climatology*, 84 (1-3), 103-115, DOI: 10.1007/s00704-005-0148-x
- Offerle B., Grimmond C.S.B., Fortuniak K., Pawlak W., 2006b, Intraurban differences of surface energy fluxes in a central European city, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45 (1), 125-136, DOI: 10.1175/JAM2319.1
- Oke T.R., 1973, City size and the urban heat island, *Atmospheric Environment*, 7 (8), 769-779, DOI: 10.1016/0004-6981(73)90140-6
- Oke T.R., 1982, The energetic basis of the urban heat island, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108 (455), 1-24, DOI: 10.1002/qj.49710845502
- Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A., 2017, *Urban climates*, Cambridge University Press, 525 s.
- Olecki Z., 1973, Wpływ miasta na niektóre elementy bilansu radiacyjnego na przykładzie Krakowa, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego. Prace Geograficzne*, 32, 105-118
- Olecki Z., 1992, Przezroczystość atmosfery w krakowskiej aglomeracji miejsko-przemysłowej, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego. Prace Geograficzne*, 90, 23-34
- Owczarek M., 2003, Odczuwalność cieplna w Gdyni w świetle wybranych wskaźników, *Wiadomości IMGW*, 47 (4), 37-58
- Owczarek M., 2012, Warunki bioklimatyczne na Wybrzeżu i Pomorzu w drugiej połowie XX wieku, *Materiały Badawcze IMGW. Seria Meteorologia*, 44, 163 s.
- Ożga W., 1998, Warunki anemometryczne w niektórych formach zabudowy miejskiej (na przykładzie Warszawy), *Acta Universitatis Lodzianis. Folia Geographica Physica*, 3, 455-458

- Paszyński J., 1957, Klimat lokalny doliny Bystrzycy pod Lublinem i możliwości jego zmian, *Gospodarka Wodna*, 6, 295-299
- Paszyński J., 1959, Wstępne wyniki badania przezroczystości atmosfery w Bydgoszczy, *Przegląd Geofizyczny*, 4 (2), 107-120
- Pawlak W., 2009, Efektywne albedo powierzchni miejskiej *Acta Universitatis Lodzianis. Folia Geographica Physica*, 9, 166 s.
- Pawlak W., Fortuniak K., 2016, Eddy covariance measurements of the net turbulent methane flux in the city centre – results of 2-year campaign in Łódź, Poland, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16 (13), 8281-8294, DOI: 10.5194/acp-16-8281-2016
- Pawlak W., Fortuniak K., Siedlecki M., 2011, Carbon dioxide flux in the centre of Łódź, Poland - analysis of a 2-year eddy covariance measurement data set, *International Journal of Climatology*, 31 (2), 232-243, DOI: 10.1002/joc.2247
- Pawłowski S., 1918, Przyczynek do historii spostrzeżeń meteorologicznych w Polsce, *Przegląd Geograficzny*, 1 (1-2), 106-107
- Piotrowicz K., 2010, Sezonowa i wieloletnia zmienność typów pogody w Krakowie, *Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków*, 314 s.
- Podstawczyńska A., 2007, Cechy solarne klimatu Łodzi, *Acta Universitatis Lodzianis. Folia Geographica Physica*, 7, 294 s.
- Podstawczyńska A., 2013, Meteorologiczne uwarunkowania stężenia radonu w przygruntowej warstwie powietrza w środowisku miejskim i zamiejskim, *Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź*, 285 s.
- Podstawczyńska A., 2016, Differences of near-ground atmospheric Rn-222 concentration between urban and rural area with reference to microclimate diversity, *Atmospheric Environment*, 126, 225-234, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.11.037
- Pospieszynska A., Przybylak R., 2018, Temperature changes in Toruń (central Poland) from 1871 to 2010, *Theoretical and Applied Climatology*, 135 (1-2), 707-724, DOI: 10.1007/s00704-018-2413-9
- Półrolniczak M., Kolendowicz L., Majkowska A., 2019, Stan badań klimatu Poznania ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska miejskiej wyspy ciepła, *Acta Geographica Lodzianis*, w druku
- Półrolniczak M., Kolendowicz L., Majkowska A., Czernecki B., 2017, The influence of atmospheric circulation on the intensity of urban heat island and urban cold island in Poznań, Poland, *Theoretical and Applied Climatology*, 127 (3-4), 611-625, DOI: 10.1007/s00704-015-1654-0
- Półrolniczak M., Tomczyk A.M., Kolendowicz L., 2018, Thermal conditions in the city of Poznań (Poland) during selected heat waves, *Atmosphere*, 9 (1), DOI: 10.3390/atmos9010011
- Przybylak R., 2010, Instrumental observations, [w:] *The Polish climate in the European context: an historical overview*, R. Przybylak, J. Majorowicz, J. Brazdil, M. Kejan (red.), Springer, 129-166

- Przybylak R., Uscka-Kowalkowska J., 2019, Badania klimatu miejskiego w Toruniu prowadzone przez Katedrę Meteorologii i Klimatologii UMK – zarys historii i uzyskanych wyników, *Acta Geographica Lodziensia*, w druku
- Przybylak R., Uscka-Kowalkowska J., Araźny A., Kejna M., Kunz M., Maszewski R., 2017, Spatial distribution of air temperature in Toruń (Central Poland) and its causes, *Theoretical and Applied Climatology*, 127 (1-2), 441-463, DOI: 10.1007/s00704-015-1644-2
- Pyka J.L., 1988, Pierwsze wyniki badań meteorologicznych przeprowadzonych za pomocą sodaru we Wrocławiu, *Przegląd Geofizyczny*, 6, 157-166
- Pyka J.L., 2003, Meteorological observations and measurements in Wrocław, *Acta Universitatis Wratislaviensis. Studia Geograficzne*, 75, 11-22
- Radosz J., 2007, Zróżnicowanie topoklimatyczne miasta Sosnowca, [w:] *Rocznik Sosnowiecki 2006. Oblicza miasta*, A.T. Jankowski (red.), Muzeum w Sosnowcu. Sosnowiec, 29-40
- Radosz J., 2010, Topoklimat Katowic na tle charakterystyki środowiska geograficznego, *Kształtowanie środowiska geograficznego i ochrona przyrody na obszarach przemysłowych i zurbanizowanych*, 42, 60-69
- Rojecki A., 1956, O najdawniejszych obserwacjach meteorologicznych na ziemiach Polski, *Przegląd Geofizyczny*, 1 (3-4), 253-257
- Rózański S., 1959, Budowa miasta a jego klimat, *Wydawnictwo Arkady*, Warszawa, 322 s.
- Rózański S., Tarajkowska M., Zych S., 1961, Niektóre wyniki badań nad klimatem Łodzi, *Przegląd Geofizyczny*, 6 (1-2), 19-26
- Schmuck M., 1967, Wpływ miasta na opady atmosferyczne (na przykładzie Wrocławia), *Przegląd Geofizyczny*, 12 (3-4), 411-440
- Siedlecki M., 2003, Urban-rural wind speed differences in Lodz, [w:] *Proceedings of 5th International Conference on Urban Climate*, 1-5 września, Łódź, K. Kłysik (red.), Uniwersytet Łódzki, 4 s.
- Sikora S., 2008, Bioklimat Wrocławia, *Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego*, 5, 169 s.
- Sorbjan Z., 1978, Numerical simulation of dynamic structure of the atmospheric boundary layer in urban area, *Acta Geophysica Polonica*, 26 (2), 167-171
- Sorbjan Z., Uliasz M., 1982, Some numerical urban boundary-layer studies, *Boundary-Layer Meteorology*, 22 (4), 481-502, DOI: 10.1007/BF00124707
- Stachlewska I.S., Costa-Suros M., Althausen D., 2017, Raman lidar water vapor profiling over Warsaw, Poland, *Atmospheric Research*, 194, 258-267, DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.05.004
- Stenz E., 1922, Natężenie promieniowania słonecznego i insolacja w Warszawie według pomiarów w okresie 1913-1918, *Roczniki Państwowego Instytutu Meteorologii za rok 1919*, Warszawa, 39 s.
- Stenz E., 1952, Zachmurzenie Polski, *Przegląd Meteorologiczny i Hydrologiczny*, 5 (1-2), 69-81

- Stopa-Boryczka M., 1992, Deformacja pól zmiennych meteorologicznych przez zabudowę w Warszawie, *Prace i Studia Geograficzne*, 11, 39-73
- Stopa-Boryczka M., (red.) 2003, *Studies on the climate of Warsaw*, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Warszawa, 208 s.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J., 2010, Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. Tom 24: Klimat Warszawy i miejscowości strefy podmiejskiej, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Warszawa, 333 s.
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Błażek E., Kicińska B., Żmudzka E., 1994, The heat island in Warsaw and its effects, *Miscellanea Geographica - Regional Studies on Development*, 6 (1), 93-102
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Kossowska-Cezak U., Ryczywolska E., Wawer J., 1984, Badania wpływu zabudowy na klimat lokalny w Warszawie, [w:] *Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji „Klimat i bioklimat miast”*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 29-35
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Mierzwiński B., Wawer J., 1991, Zależność pola temperatury powietrza od charakteru zabudowy, *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 1213, *Prace Instytutu Geograficznego. Seria A: Geografia Fizyczna*, 5, 187-188
- Stopa-Boryczka M., Kopacz-Lembowicz M., Wawer J., 2001, Klimat Warszawy w pracach Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego, [w:] *Badania środowiska fizycznogeograficznego aglomeracji warszawskiej*, B. Krawczyk, G. Węclawowicz (red.), *Prace Geograficzne*, 180, 57-69
- Strużewska J., Kamiński J.W., 2012, Impact of urban parameterization on high resolution air quality forecast with the GEM - AQ model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12 (21), 10387-10404, DOI: 10.5194/acp-12-10387-2012
- Strzyżewski T., Uscka-Kowalkowska J., Przybylak R., Kejna M., Araźny A., Maszewski R., 2015, Zróżnicowanie kierunku i prędkości wiatru na obszarze Torunia (centralna Polska) w 2012 roku, *Przegląd Naukowy - Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 67, 79-89
- Szczerbacki M., 1968, Klimat miasta Poznania, [w:] *Zagadnienia klimatu i warunków higienicznych na obszarze Poznania i strefy podmiejskiej*, J. Jankowiak (red.), *Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk. Komisja Upowszechniania Nauki*, 3, 11-46
- Szulczewska B., Giedych R., Borowski J., Kuchcik M., Sikorski P., Mazurkiewicz A., Stańczyk T., 2014, How much green is needed for a vital neighbourhood? In search for empirical evidence, *Land Use Policy*, 38, 330-345, DOI: 10.1016/j.landusepol.2013.11.006
- Szyga-Pluta K., 2003, Cloud types in Kołobrzeg, Poznan and Wieluń in the months with the lowest and highest cloudines, *Studia Geograficzne*, 75, 304-309
- Szymanowski M., 2004, Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu, *Studia Geograficzne*, 77, 228 s.

- Szymanowski M., 2005, Interactions between thermal advection in frontal zones and the urban heat island of Wrocław, Poland, *Theoretical and Applied Climatology*, 82 (3-4), 207-224, DOI: 10.1007/s00704-005-0135-2
- Szymanowski M., Drzeniecka-Osiadacz A., Sawiński T., Kryza M., 2019, Historia i współczesność badań nad klimatem Wrocławia – pomiary i badania modelowe, *Acta Geographica Lodziensia*, w druku
- Tamulewicz J., 1996, Poznańska seria opadów atmosferycznych w świetle wskaźnika kontynentalizmu pluwiálního, *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią. Seria A – Geografia Fizyczna*, 47, 115-126
- Tarajkowska M., 1971, Wpływ zabudowy miejskiej na warunki termiczne powietrza na przykładzie Częstochowy, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Łódzkiego*, 43 (2), 139-159
- Tarajkowska M., Zawadzka A., 1984, Badania klimatu miast w Zakładzie Meteorologii, Klimatologii i Hydrologii IG UŁ, [w:] *Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji „Klimat i bioklimat miast”*, 22-24 listopada, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 7-20
- Trapp J., 1978, Wpływ warunków naturalnych i zabudowy na klimat Gdyni, praca doktorska, Uniwersytet Gdański, maszynopis
- Trapp J., Korzeniewski J., Nurek T., Wyszkowski A., 1987, Klimat aglomeracji gdańskiej, *Zeszyty Naukowe Wydziału Biologii, Geografii i Oceanologii: Geografia*, 16, 5-33
- Trepińska J., 1969, Ogólna charakterystyka opadów Krakowie w latach 1916-1965, *Folia Geographica. Series Geographica-Physica*, 3, 117-138
- Trepińska J., 2007, Instrumentalne i wizualne obserwacje pogody w Obserwatorium Astronomicznym Uniwersytetu Jagiellońskiego, [w:] *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych*, K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 31-37
- Trepińska J., Kowanetz L., 1997, Wieloletni przebieg średnich miesięcznych wartości temperatury powietrza w Krakowie, 1792-1995, [w:] *Wahania klimatu w Krakowie (1792-1995): wiekowe zmiany klimatu na podstawie krakowskiej serii meteorologicznej (1792-1995) ze szczególnym uwzględnieniem schyłku małego glacjału*, J. Trepińska (red.), Instytut Geograficzny, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 99-130
- Twardosz R., 2005, Dobowy przebieg opadów atmosferycznych w ujęciu synoptycznym i probabilistycznym na przykładzie Krakowa (1886-2002), Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 176 s.
- Uscka-Kowalkowska J., Przybylak R., Kunz M., Maszewski R., Araźny A., Kejna M., 2014, Zróżnicowanie wilgotności powietrza na terenie Torunia w 2012 roku, *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 66, 393-409
- Walawander J.P., 2006, Zastosowanie danych satelitarnych serii Landsat i technik GIS w badaniach krakowskiej wyspy ciepła (na przykładzie Krakowa), *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska. Sectio B: Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia*, 61, 446-457

- Walawender J.P., Szymanowski M., Bokwa A., Hajto M.J., 2014, Land surface temperature patterns in the urban agglomeration of Kraków (Poland) derived from LANDSAT-7/ETM+ data, *Pure and Applied Geophysics*, 171 (6), 913-940, DOI: 10.1007/s00024-013-0685-7
- Walczewski J., 1984, Charakterystyka warstwy granicznej atmosfery nad Krakowem w oparciu o wyniki akustycznego sondażu atmosfery, *Materiały Badawcze IMGW. Seria Meteorologia*, 10, 147 s.
- Walczewski J. (red.), 1994, Charakterystyka warstwy granicznej atmosfery nad miastem (na przykładzie Krakowa), *Materiały Badawcze IMGW. Seria Meteorologia*, 22, 109 s.
- Walczewski J., 2005, Meteorologiczne i klimatyczne warunki rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń powietrza, *Przegląd Geofizyczny*, 50 (3-4), 177-193
- Wałaszek K., Kryza M., Werner M., 2014, Evaluation of the WRF meteorological model results during a high ozone episode in SW Poland – the role of model initial conditions, *International Journal of Environment and Pollution*, 54 (2-4), 193-202, DOI: 10.1504/IJEP.2014.065120
- Warakomski W., 1999, Zmiany wieloletniej temperatury i opadów w Lublinie w okresie 1951-1995, [w:] *Klimat i bioklimat miast*, K. Kłysik (red.), Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 197-204
- Wawer J., 1995, Wpływ warunków pogodowych na intensywność miejskiej wyspy ciepła w Warszawie, [w:] *Klimat i bioklimat miast*, K. Kłysik (red.), Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 71-78
- Wawer J., 1999, Zależność miejskiej wyspy ciepła od cyrkulacji atmosferycznej, *Acta Universitatis Lodziensis. Folia Geographica Physica*, 3, 45-50
- Werner M., Kryza M., Ojrzyńska H., Skjoth C.A., Wałaszek K., Dore A.J., 2015, Application of WRF-Chem to forecasting PM10 concentration over Poland, *International Journal of Environment and Pollution*, 58 (4), 280-292, DOI: 10.1504/IJEP.2015.077458
- Widawski A., 2015, The influence of atmospheric circulation on the air pollution concentration and temperature inversion in Sosnowiec. Case study, *Environmental and Socio-economic Studies*, 3 (2), 30-40, DOI: 10.1515/environ-2015-0060
- Wierzbicki D., 1871, Untersuchungen über klimatographischen Verhältnisse zu Krakau nach 45-jährigen Beobachtungen 1826-1870, *Jahrbücher der k.k. Central-Anstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus*, 7, 38 s.
- Woś A., 1992, Temperatura powietrza poszczególnych pór roku w Poznaniu w przekroju wieloletnim, *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią. Seria A - Geografia Fizyczna*, 44, 177-183
- Wójcik G., Marciniak K., 1984, Zróznicowanie stosunków termicznych na obszarze Torunia, [w:] *Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji „Klimat i bioklimat miast”, 22-24 listopada*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 100-106
- Wójcik G., Marciniak K., 2007, *Badania klimatu miejskiego w Toruniu*, [w:] *Działalność naukowa i dydaktyczna Zakładu Klimatologii Instytutu Geografii UMK w latach 1947-2007*, R. Przybylak, M. Kejna, K. Marciniak (red.), Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 66-68

- Wyszkowski A., 1994, Wpływ warunków meteorologicznych na kształtowanie emisji węglowodorów w rejonie zakładów petrochemicznych, *Zeszyty Naukowe UG: Rozprawy i monografie*, 202, 162 s.
- Wyszkowski A., Mysiak R., 1995, Problemy lokalizacji punktów pomiarowych w automatycznych systemach monitoringu atmosfery, [w:] *Klimat i bioklimat miast*, K. Kłysik (red.), Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 229-239
- Wyszogrodzki A.A., Shiguang M., Chen F., 2012, Evaluation of the coupling between mesoscale-WRF and LES-EULAG models for simulation fine-scale urban dispersion, *Atmospheric Research*, 118, 324-345, DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.07.023
- Zieliński M., Fortuniak K., Pawlak W., Siedlecki M., 2013, Turbulent sensible heat flux in Łódź, Central Poland, obtained from scintillometer and eddy covariance measurements, *Meteorologische Zeitschrift*, 22 (5), 603-613, DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0448
- Zieliński M., Fortuniak K., Pawlak W., Siedlecki M., 2017, Influence of mean rooftop-level estimation method on sensible heat flux retrieved from a large-aperture scintillometer over a city centre, *Boundary-Layer Meteorology*, 164 (2), 281-301, DOI: 10.1007/s10546-017-0254-1
- Zieliński M., Fortuniak K., Pawlak W., Siedlecki M., 2018, Long-term Turbulent Sensible-Heat-Flux Measurements with a Large-Aperture Scintillometer in the Centre of Łódź, Central Poland, *Boundary-Layer Meteorology*, 167 (3), 469-492, DOI: 10.1007/s10546-017-0331-5
- Zimnoch M., Godłowska J., Nęcki J.M., Róžański K., 2010, Assessing surface fluxes of CO₂ and CH₄ in urban environment: a reconnaissance study in Krakow, southern Poland, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 62 (5), 573-580, DOI: 10.1111/j.1600-0889.2010.00489.x
- Zimnoch M., Nęcki J.M., Chmura Ł., Jasek A., Jeleń D., Gałkowski M., Kuc T., Gorczyca Z., Bartyzel J., Róžański K., 2018, Quantification of carbon dioxide and methane emissions in urban areas: source apportionment based on atmospheric observations, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, DOI: 10.1007/s11027-018-9821-0
- Zinkiewicz W., Warakomski W., 1960, Zarys klimatu Lublina, *Annales Universitatis Mariae Curie Skłodowska. Sectio B: Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia*, 14 (2), 47-130
- Zipser-Urbańska A., 1968, Wpływ kierunku wiatru na rozkład opadów atmosferycznych w mieście na przykładzie Wrocławia, *Czasopismo Geograficzne*, 39, 429-437
- Zych S., 1961, Zagadnienia klimatyczne miasta Łodzi, *Przegląd Techniczny*, 49, 9
- Żarnowiecki G., 2002, Zróżnicowanie bioklimatu Kielc w sezonie letnim, *Regionalny Monitoring Środowiska Przyrodniczego*, 3, 109-116
- Żmudzka E., 2019, Badania klimatu Warszawy prowadzone w Zakładzie Klimatologii Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego (1951-2018), *Acta Geographica Lodziensia*, w druku

S t r e s z c z e n i e

W opracowaniu dokonano przeglądu badań klimatu miast w Polsce. Zwrócono uwagę na fakt, że pierwsze pomiary meteorologiczne na ziemiach polskich pochodzą z dużych miast, a świadomość wpływu zabudowy na klimat lokalny jest widoczna u polskich badaczy, takich jak Megier czy Jastrzębowski, już od początków XIX w. Bardziej szczegółowo przedstawiono powojenne osiągnięcia i trendy w badaniach klimatu terenów zurbanizowanych większych aglomeracji: Warszawy, Krakowa, Łodzi, Wrocławia, Lublina, Torunia, Poznania i Trójmiasta. Pokazano, że chociaż główne efekty miejskie, takie jak na przykład miejska wyspa ciepła, były przedmiotem studiów praktycznie we wszystkich ośrodkach, to jednocześnie, zwłaszcza w ostatnich latach, daje się zauważyć pewne specjalizacje poszczególnych grup badawczych. W dalszej części przytoczono główne ustalenia dotyczące wpływu miasta na podstawowe elementy meteorologiczne, takie jak temperatura (miejska wyspa ciepła), wilgotność powietrza, opady atmosferyczne i zachmurzenie, warunki anemometryczne, warunki solarne czy bilans cieplny. Przegląd tych ustaleń pozwala stwierdzić, że wyniki dla polskich miast są zbieżne z wynikami dla innych miast położonych w podobnych warunkach klimatycznych. Badania polskie nie tylko uszczegółwiają te prawidłowości do warunków krajowych, lecz również wprowadzają nowe koncepcje do literatury międzynarodowej. W podsumowaniu podkreślono konieczność pełniejszego wykorzystania wyników w działaniach urbanistycznych na rzecz poprawy warunków życia w mieście i redukcji negatywnego oddziaływania miast na środowisko.

Słowa kluczowe: klimat terenów zurbanizowanych, Polska, miejska wyspa ciepła, wpływ miasta na elementy meteorologiczne.

S u m m a r y

The study reviews urban climate research in Poland. It was pointed out that the first meteorological measurements in Polish territories come from major cities and Polish researchers, such as Megier or Jastrzębowski, were aware of the impact of urban development on the local climate already at the early nineteenth century. The post-war achievements and trends in research on urban climate in major agglomerations like Warsaw, Cracow, Łódź, Wrocław, Lublin, Toruń, Poznań and the Tri-City are discussed in more details. It has been shown that the main urban effects, such as the urban heat island, have been studied in all these cities. At the same time, a specialization of individual research groups can be noticed. Next, the main findings regarding the city's influence on the basic meteorological parameters, such as temperature (urban heat island), air humidity, atmospheric precipitation and cloudiness, anemometric conditions, solar conditions or energy balance were referred. Review of these findings allows to conclude that the results for Polish cities coincide with the results for other cities located in simi-

lar climatic conditions. Polish studies do not only refine these regularities to national conditions, but also introduce new concepts to international literature. Final remarks emphasize the necessity to use the results more effectively in urban activities, in order to improve the living conditions in the cities and reduce the negative impact of cities on the environment.

Key words: urban climate, Poland, urban heat island, influence of the city on meteorological elements.