







ŁÓDZKIE BADANIA KLIMATU MIASTA

Lodz research on urban climate

KRZYSZTOF FORTUNIAK*¹ , WŁODZIMIERZ PAWLAK*² , AGNIESZKA PODSTAWCZYŃSKA*³ ,
MARIUSZ SIEDLECKI*⁴ , JOANNA WIBIG*⁵ , SZYMON WILK*⁶ 

Zarys treści. W pracy przedstawiono rys historyczny oraz główne osiągnięcia badaczy łódzkich w zakresie klimatu miast. Chociaż regularne pomiary meteorologiczne w Łodzi rozpoczęto na początku XX w., to rozwój klimatologii miejskiej, rozumianej jako wpływ miasta na pole elementów meteorologicznych, datuje się na lata 50. ubiegłego wieku. Szczególną aktywność działań w zakresie klimatologii miejskiej w ośrodku łódzkim przyniosła ostatnia dekada XX w. i początek obecnego stulecia. Obok studiów nad klasycznymi problemami miejskiej wyspy ciepła czy stosunków solarnych, w okresie tym przeprowadzono unikatowe pomiary bilansu cieplnego, wymiany powierzchniowej gazów cieplarnianych (CO₂ i CH₄), czy stężenia radonu w mieście; zastosowano nowatorskie metody pomiarowe (scyntylogometria) i zbudowano autorskie modele numeryczne.

Słowa kluczowe: klimat miast, miejska wyspa ciepła, bilans cieplny miast, radon, strumienie CO₂ i CH₄

Abstract. The work presents a historical outline and main achievements of Lodz researchers in the field of urban climate. Although regular meteorological measurements in Lodz began at the beginning of the 20th century, the development of urban climatology, understood as the city's influence on the field of meteorological elements, dates back to the 1950s. The last decade of the 20th century and the beginning of the present century brought a special intensification of activities in the field of urban climatology in Lodz. Apart from studies on the classic problems of the urban heat island or solar relations, unique measurements of the heat balance, surface exchange of greenhouse gases (CO₂ and CH₄) or radon concentration in the city were carried out during this period; the innovative measurement methods (scintillometry) were used and original numerical models were developed.

Key words: urban climate, urban heat island, urban energy balance, radon, CO₂ and CH₄ fluxes

Wprowadzenie

Miasta, jako obszary, na których znaczną część życia spędza większa część ludzkości, znajdują się w centrum uwagi badaczy reprezentujących różnorodne dyscypliny naukowe. Oprócz czynników społeczno-ekonomicznych istotny wpływ na jakość życia mieszkańców terenów zurbanizowanych mają warunki naturalne, w tym warunki klimatyczne. Dotyczy to zarówno regionalnych uwarunkowań klimatycznych określonej lokalizacji miejskiej, jak i wpływu zabudowy na lokalne warunki klimatyczne. Poznanie modyfikacji elementów meteorologicznych przez miasto pozwala na ocenę stopnia eskalacji bądź redukcji uciążliwości klimatycznych, zwłaszcza ekstremalnych zjawisk meteorologicznych na terenach zurbanizowanych.

Łódź zlokalizowana w centralnej Polsce na stosunkowo płaskim terenie, z dala od dużych zbiorników wodnych i większych rzek czy jednostek geograficznych, które mogłyby dodatkowo modyfikować lokalne warunki klimatyczne, stanowi obszar wyjątkowo korzystny do badań indywidualnych cech klimatu terenów zurbanizowanych. Jest to jednocześnie trzecie co do wielkości miasto w Polsce z liczbą mieszkańców sięgającą prawie 670 tys. Dodatkowy atut stanowi wyjątkowo regularny układ architektoniczny. W centralnych częściach miasta ulice gęsto zabudowane kamienicami tworzą klasyczne przykłady kanionów ulicznych, a łatwy do wyznaczenia poziom dachów stwarza sprzyjające warunki do badań wymiany turbulencyjnej masy, pędu i energii. Dlatego na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat w Łodzi prowadzono wiele badań i studiów

* Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Meteorologii i Klimatologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź; e-mail: krzysztof.fortuniak@geo.uni.lodz.pl; ¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7043-8751>; ² ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9785-4787>; ³ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6353-9976>; ⁴ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5804-8985>; ⁵ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8560-0325>; ⁶ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0233-574X>

empirycznych stanowiących podstawę licznych analiz syntetycznych, modeli statystycznych i numerycznych.

Celem podjętego opracowania jest przegląd dorobku łódzkich klimatologów w zakresie klimatologii miejskiej. Szczególną uwagę zwrócono na badania prowadzone w Zakładzie, a następnie Katedrze Meteorologii i Klimatologii (KMik) Uniwersytetu Łódzkiego dotyczące aspektów typowo klimatologicznych. Pominęto natomiast zagadnienie zanieczyszczeń powietrza, będące niewątpliwym przejawem wpływu miast na stan atmosfery, lecz stanowiące w dużej mierze oddzielny obszerny temat badawczy.

Obserwacje i pomiary meteorologiczne w Łodzi

Pierwsze udokumentowane wykazy spostrzeżeń meteorologicznych w Łodzi pochodzą z końca 1886 roku, jednak początek regularnych obserwacji meteorologicznych datuje się na rok 1903, w którym działalność rozpoczęła tzw. Stacja Centralna Kolei Elektrycznej Łódzkiej zlokalizowana przy ul. Tramwajowej 6 (Kłysik i in. 1995b). Stacja ta, będąc od 1919 jedną z tzw. Stacji Centralnych PIM, pracowała nieprzerwanie do końca maja 1930 r., kiedy jej funkcje przejął wojskowy posterunek meteorologiczny utworzony w styczniu 1930 r. na terenie lotniska Lublinek. Pomiary na Lublinku prowadzone są do chwili obecnej z krótkimi przerwami w okresie wojennym i niewielkimi zmianami położenia ogródka meteorologicznego (Kłysik i in. 1995a). Jest to od lat główna stacja meteorologiczna Łodzi, z której dane niejednokrotnie wykorzystywane były do określenia cech charakterystycznych klimatu i bioklimatu tej lokalizacji geograficznej (np. Kłysik 2004; Skrzypski, Papiernik 2006). Jednocześnie, ze względu na położenie na terenie lotniska, poza granicami ścisłej zabudowy miejskiej, dane pomiarowe ze stacji Lublinek stosowane były również jako referencyjne w badaniach wpływu miasta na lokalne warunki klimatyczne.

Oprócz wymienionych, w okresie przedwojennym, w latach trzydziestych, działał posterunek zlokalizowany w centrum miasta, w Parku Sienkiewicza, w gmachu Miejskiego Muzeum Przyrodniczego. Porównanie tych danych z danymi z Lublinka pozwoliło na oszacowanie różnic temperatury pomiędzy miastem a terenem zamiejskim dla przedwojennej Łodzi, jednak opracowanie tego typu pojawiło się dopiero w końcu XX w. (Kłysik, Fortuniak 1998, 1999). W latach 1930–1936, a następnie od roku 1948, pracował posterunek opa-

dowy na Widzewie, a od roku 1955 podobny posterunek w Wilanowie na północno-wschodnich peryferiach Łodzi. Obserwacje i pomiary podstawowych elementów meteorologicznych w trzech terminach pomiarowych prowadzono jeszcze w latach powojennych (1949–1978) na posterunku Ruda Pabianicka na południowych krańcach Łodzi (Kłysik i in. 1995a).

Istotny rozdział pomiarów meteorologicznych w Łodzi ukierunkowanych na poznanie indywidualnych cech klimatu miasta zapoczątkowało uruchomienie z inicjatywy profesora Kazimierza Kłysika – kierownika Zakładu Meteorologii i Klimatologii UŁ Miejskiej Stacji Meteorologicznej (MSM) w kwietniu 1992 roku (Kłysik i in. 1995b). Stacja zlokalizowana w centrum miasta w pobliżu dworca kolejowego Łódź-Fabryczna funkcjonowała nieprzerwanie do kwietnia 2012 roku. Nowy plan zagospodarowania przestrzennego okolic dworca PKP połączony z jego przebudową wymusił po 20 latach działalności likwidację stacji meteorologicznej; część przyrządów pomiarowych przeniesiono do nowo utworzonego posterunku pomiarowego przy ulicy Tramwajowej. Pomiary na MSM prowadzone były początkowo manualnie oraz przy pomocy tradycyjnych samopisów. W listopadzie 1996 roku stacja wyposażona została w automatyczne rejestratory i zestaw czujników umożliwiający pomiary z 10-minutowym krokiem czasowym. W tym samym czasie podobny system zainstalowano na Lublinku i w nowo utworzonym punkcie pomiarowym przy ul. Lipowej 81 (ówczesna siedziba Zakładu Meteorologii i Klimatologii UŁ). Punkt pomiarowy przy ul. Lipowej zlikwidowano w lipcu 2017 roku.

Gwałtowny rozwój elektroniki i technik pomiarowych, jaki nastąpił w ostatnich latach, stworzył nowe możliwości pozyskiwania danych meteorologicznych z Łodzi i okolic. Powstało kilka specjalistycznych sieci pomiarowych umożliwiających dodatkowo pozyskiwanie danych meteorologicznych. Przykładem mogą być stacje sieci Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska dostarczające oprócz danych o stanie zanieczyszczenia powietrza danych meteorologicznych, punkty pomiarów ruchu samochodowego Zarządu Dróg Wojewódzkich (<http://212.191.134.37/mapa.php?B=1366&H=768>) dodatkowo rejestrujące temperaturę powietrza czy stacje meteorologiczne Urzędu Miasta Łodzi (<https://www.traxelektronik.pl/pogoda/lokalizacja.php?B=1920&H=1040&RejID=15>). Wykorzystanie tego typu danych w badaniach klimatu Łodzi może być jednak często kłopotliwe ze względu na nietypową loka-

lizację czujników oraz brak interkalibracji. W listopadzie 2013 r. z inicjatywy KMik UŁ powstała sieć pomiarowa złożona z 12 posterunków zlokalizowanych na terenie miasta i okolic dostarczająca danych o temperaturze i wilgotności powietrza oraz o opadach atmosferycznych. Dane pluwiometryczne pozyskiwane są dodatkowo z liczącej obecnie 17 deszczomierzy sieci Łódzkiej Spółki Infrastrukturalnej oraz z 3 punktów, którymi dysponuje Politechnika Łódzka.

Oprócz stacji dostarczających klasycznych danych meteorologicznych wspomnieć należy o specjalistycznych punktach pomiarowych ukierunkowanych na poznanie specyfiki procesów atmosferycznych na obszarach miejskich. W Katedrze Meteorologii i Klimatologii UŁ należą do nich rozwijane od roku 2000 systemy pomiarowe składników bilansu cieplnego, wymiany gazowej podłoże-atmosfera, intensywności mieszania turbulencyjnego czy emisji radonu. Zostaną one szczegółowo omówione w dalszej części opracowania.

Rozwój badań klimatu miast w Łodzi

Rozwój badań klimatu terenów zurbanizowanych w Łodzi łączy się nierozzerwalnie z postacią profesora Stanisława Zycha, który pracę na Uniwersytecie Łódzkim rozpoczął w roku 1951, a w latach 1955–1959 wspólnie z architektem – profesorem Stanisławem Różańskim kierował pionierskim programem badań klimatu miasta (Zych 1951, 1961; Zych i in. 1964). Program ten, którego celem było wskazanie kierunków zmian struktury przestrzennej oraz niezbędnych przekształceń funkcjonalnych Łodzi, obejmował szereg zagadnień dotyczących między innymi: ogólnej charakterystyki klimatu Łodzi na tle sąsiednich obszarów, określenia zróżnicowania klimatu lokalnego na terenie miasta z uwzględnieniem struktury zabudowy, oceny jakości powietrza atmosferycznego w określonych warunkach pogodowych, pionowej struktury wiatru nad miastem, określenia skutków spowodowanych negatywnymi cechami klimatu Łodzi oraz badań struktury zabudowy i przebiegu arterii komunikacyjnych w celach planistycznych (Tarajkowska, Zawadzka 1984). Powstałe w rezultacie tego projektu opracowania (Różański 1959; Różański i in. 1961; Zych 1961) stały się wzorem wielu późniejszych analiz poświęconych zagadnieniom modyfikacji klimatu lokalnego terenów zurbanizowanych różnych miast Polski. W ośrodku łódzkim powstał w kolejnych latach szereg prac poświęconych

zagadnieniom klimatu i bioklimatu miast (np. Kłysik 1974, 1985; Dubaniewicz 1977; Kłysik, Tarajkowska 1977). Oprócz wcześniej omówionych regularnych stacji pomiarowych, w badaniach wykorzystywano punkty pomiarowe okresowo działające w różnych typach zabudowy, wykonywano pomiary patrolowe i sondaże aerologiczne.

Szczególne zasługi dla intensyfikacji badań klimatu miast w Łodzi położył prof. Kazimierz Kłysik, kierownik Zakładu/Katedry Meteorologii i Klimatologii UŁ w latach 1987–2013, dzięki staraniom którego doszło od rozwoju infrastruktury badawczej, zrealizowano szereg projektów, a także nawiązano ścisłą współpracę naukową z wiodącymi ośrodkami klimatologii miejskiej w świecie. Ośrodek łódzki stał się tradycyjnym organizatorem cyklicznej konferencji poświęconej zagadnieniom klimatu terenów zurbanizowanych „Klimat i bioklimat miast”, której kolejne edycje miały miejsce w latach 1984, 1992, 1997, 2007, 2015, a w roku 2003 był lokalnym organizatorem 5. Międzynarodowej Konferencji Klimatu Miast (5th International Conference on Urban Climate). Jednocześnie zintensyfikowano współpracę międzynarodową, w tym z najwybitniejszymi przedstawicielami klimatologii miejskiej, której ukoronowaniem było nadanie profesorowi Timothy R. Oke tytułu Doktora Honoris Causa Uniwersytetu Łódzkiego w roku 2005 oraz odznaczenie profesor C. Susan Grimmond medalem Universitatis Lodzensis Amico (2008). Wy miernym efektem tej współpracy są również liczne publikacje, w tym wielokrotnie cytowane prace o kluczowym znaczeniu dla dalszego rozwoju klimatologii miejskiej (Grimmond i in. 2010a, b, 2011; Barlow i in. 2017).

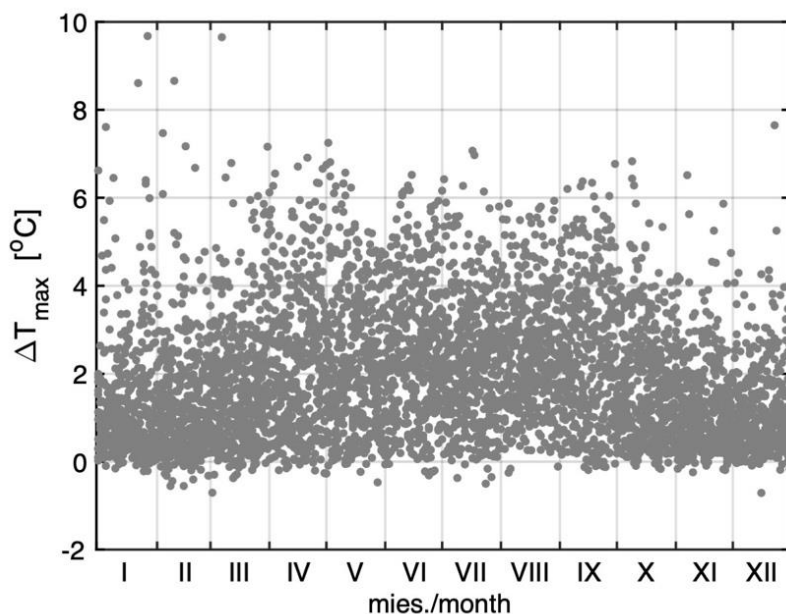
Współczesne kierunki badań klimatu miast w Łodzi

Powstanie Miejskiej Stacji Meteorologicznej i automatyzacja pomiarów otworzyły nowy rozdział badań klimatu Łodzi. Początkowo koncentrowały się one na poznaniu wpływu miasta na poszczególne parametry meteorologiczne, głównie na temperaturę powietrza i promieniowanie słoneczne (Kłysik, Fortuniak 1998, 1999; Fortuniak 2003b; Fortuniak i in. 2006; Podstawczyńska 2007).

Miejska wyspa ciepła (MWC) należy do najlepiej poznanych indywidualności klimatu miejskiego, przy czym w dalszej części opracowania (jeśli nie zaznaczono inaczej) pojęcie to będzie używane w sensie tzw. *canopy layer urban heat island* (Oke i in. 2017), czyli temperatury

powietrza mierzonej na standardowej (lub zbliżonej) wysokości klatki meteorologicznej. W Łodzi już historyczne dane o różnicach temperatury minimalnej z lat 1934–1936 pomiędzy stacją Park Sienkiewicza (centrum miasta) a Lublinkiem (stacja zamiejska) wskazują na istnienie dobrze wykształconej MWC o wyraźnie zaznaczonym cyklu rocznym (Kłysik, Fortuniak 1998, 1999). Bardzo zbliżony obraz przedstawiają maksymalne różnice temperatury między MSM a Lublinkiem (Fortuniak, Kłysik 2008). Latem w sprzyjających warunkach MWC w Łodzi osiąga z reguły 3–6°C, chociaż zdarzają się również wartości przekraczające 6°C (rys. 1). W okresie zimowym kontrasty termiczne miasto-tereny zamiejskie rzadko przekraczają 2–3°C. Z drugiej strony to właśnie w okresie zimowym w przypadku adwekcji mroźnego, arktycznego powietrza nad nagrzane miasto, zdarzają się ekstremalnie duże różnice temperatury. Podobną prawidłowość zaobserwowano również w Warszawie (Wawer 1997). Oprócz inercji termicznej miasta istotny wpływ na powstanie dużej nadwyżki ciepła w mieście może mieć w tym przypadku także wzmożona emisja ciepła antropogenicznego w niskich temperaturach. Przypadek taki zaobserwowano w czasie pomiarów patrolowych w dniu 5 lutego 1996 r., kiedy zanotowano największe w Polsce różnice temperatury między miastem a jego peryferiami sięgające 12°C (Kłysik 1998b; Kłysik, Fortuniak 1999; Fortuniak, Kłysik

2008). Należy podkreślić, że przytoczone wartości dotyczą różnic temperatury, jakie pojawiają się w godzinach nocnych jedynie w sprzyjających warunkach pogodowych. W świetle wartości średnich rocznych Łódź jest cieplejsza od terenów je otaczających zaledwie o ok. 0,6°C. W letnie noce jest to średnio 1–1,5°C, w zimowe mniej niż 1°C. W ciągu dnia kontrasty termiczne są niewielkie, przy czym zdarzają się również sytuacje, że to punkt pomiarowy zlokalizowany w obrębie zabudowy miejskiej jest chłodniejszy od zamiejskiego. Decydującym w tym przypadku wydaje się najbliższe otoczenie miejskiego punktu pomiarowego, a w szczególności współczynnik widoku nieba (Fortuniak 2003b; Fortuniak, Kłysik 2008). W sprzyjających warunkach, za które należy rozumieć typową pogodę radiacyjną z niewielką prędkością wiatru, miejska wyspa ciepła cechuje się wyraźnym przebiegiem dobowym. Różnice temperatury pomiędzy stacją miejską a zamiejską są niewielkie w ciągu dnia, po zachodzie Słońca zaczynają dosyć szybko rosnać mniej więcej do północy. Następnie różnice te utrzymują się na mniej więcej stałym poziomie, aby gwałtownie zaniknąć po wschodzie Słońca. Odpowiednie unormowanie przebiegów dobowych pozwala stwierdzić, że schemat ten powtarza się praktycznie we wszystkich porach roku (Fortuniak 2003b). Maksymalne wartości osiągane w nocy są determinowane głównie przez prędkość wiatru i zachmurzenie – wzrost



Rys. 1. Najwyższe nocne (od zachodu Słońca do 1 godziny po wschodzie Słońca) różnice temperatury między MSM (centrum Łodzi) a Lublinkiem (stacja zamiejska) – wszystkie przypadki z lat 1997–2012

The highest nighttime (from sunset to 1 hour after sunrise) temperature differences between MSM (centre of Łódź) and Lublinek (extra-urban station) – all cases from 1997–2012

prędkości wiatru i zachmurzenia powoduje redukcję kontrastów termicznych, przy czym badania numeryczne i dane doświadczalne z Łodzi sugerują, że zależność MWC od prędkości wiatru lepiej opisuje krzywa eksponencjalna niż najczęściej przyjmowana odwrotna zależność od pierwiastka kwadratowego (Fortuniak 2003b). Symulacje numeryczne prowadzone przy pomocy autorskiego modelu wskazują również na istotne znaczenie współczynnika szorstkości dla ciepła i znikome znaczenie współczynnika szorstkości dla pędu w powstawaniu różnic termicznych oraz potwierdzają znaną logarytmiczną zależność wielkości MWC od liczby mieszkańców. Zastosowanie prostych modeli wykorzystujących opracowane przez Kłysika (1998a) mapy pokrycia terenu istotne z punktu widzenia procesów klimatotwórczych nad miastem pozwala określić rozkład przestrzenny MWC w zależności od prędkości wiatru i zachmurzenia (Fortuniak, Kłysik 1998; Fortuniak 2003b).

Wpływ miasta na takie elementy meteorologiczne jak wilgotność powietrza, prędkość wiatru czy opady był mniej intensywnie badany. Różnice **wilgotności powietrza** pomiędzy miastem a terenem zamiejskim wyrażone za pomocą wilgotności względnej wskazują na miasto jako obszar o niższym nasyceniu parą wodną. W pogodne letnie noce wilgotność względna w centrum Łodzi może być o ok. 20–40% niższa niż na Lublinku. Zimą, ze względu na niższe temperatury powodujące ogólnie wyższe nasycenie powietrza, różnice rzadko przekraczają 10%. Podobnie jak MWC, różnice wilgotności względnej wykazują wyraźną zmienność dobową w przybliżeniu odwrotną do kontrastów termicznych; podobnie też wzrost prędkości wiatru i zachmurzenia powoduje redukcję zróżnicowania tego parametru. Bardziej złożony przebieg mają różnice prężności pary wodnej, wilgotności bezwzględnej, wilgotności właściwej czy innych bezwzględnych charakterystyk zawartości pary wodnej w powietrzu. Ze względu na intensywną ewapotranspirację na terenach naturalnych, centrum Łodzi w ciągu dnia jawi się jako obszar relatywnie suchy. Po zachodzie Słońca wraz z postępującym za miastem wychładzaniem następuje skraplanie pary wodnej i zmniejszenie jej zawartości w przyziemnych warstwach powietrza. W mieście proces ten jest mniej intensywny, przez co w powietrzu obserwuje się większą zawartość pary wodnej. Podkreślenia wymaga fakt (Fortuniak i in. 2006), że w przeciwieństwie do MWC przebiegi kontrastów wilgotnościowych w przypadku sprzyjających warunków pogodowych nie zawsze

przebiegają zgodnie z uznawanymi za typowe (Oke i in. 2017), przedstawionymi wyżej schematami.

Stosunkowo niewiele prac poświęcono modyfikacji pola **opadów** na obszarze Łodzi. Bartnik i Marcinkowski (2015) na podstawie relatywnie krótkiej serii pomiarowej (2010–2012) z 24 deszczomierzy wykazali podwyższone sumy roczne w równoleżnikowym pasie przebiegającym przez środek miasta z dodatkowym uprzywilejowaniem północno-wschodniej części centrum ($> 600 \text{ mm rok}^{-1}$). Natomiast najmniej opadów wystąpiło w północnych i południowych częściach Łodzi ($< 520 \text{ mm rok}^{-1}$). Zwiększeniu uległa również liczba dni z opadem do ponad 155 dni rok^{-1} na obszarze nieznacznie przesuniętym na wschód od centrum miasta w stosunku do zanotowanych na obrzeżach wartości poniżej 145 dni rok^{-1} .

Podobnie nieliczne prace poruszają problematykę **prędkości wiatru**. Porównanie prędkości wiatru na Lublinku i Miejskiej Stacji Meteorologicznej wskazuje, że średnio prędkość wiatru jest w mieście w ciągu dnia o 39%, a w ciągu nocy o 34% niższa. W przypadku silnego wiatru osłabienie to może dochodzić do 50% (Fortuniak i in. 2006; Fortuniak, Kłysik 2008). Należy przy tym podkreślić, że MSM była zlokalizowana na dużym placu miejskim, co minimalizuje ewentualne lokalne efekty przesłonięcia przez zabudowę. W przypadkach słabego wiatru, głównie w godzinach nocnych, jego prędkość w mieście może przewyższać wartości na stacji zamiejskiej, co wiązać należy z rozwojem cyrkulacji bryzowej generowanej przez MWC i wzmocnionym turbulencyjnym transportem pędu z wyższych poziomów. Analiza regresji pozwala określić graniczną prędkość, dla której prędkość wiatru w mieście zaczyna być wyższa niż za miastem jako $1,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Siedlecki 2003). Wartość ta zmienia się sezonowo (niższa latem wyższa zimą) w przypadku pogodnych dni osiągając $0,6\text{--}0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Przedmiotem intensywnych studiów w Łodzi były szeroko rozumiane **warunki solarne**. Pierwsze prace na temat warunków radiacyjnych Łodzi dotyczyły reżimu usłonecznienia (Kłysik 1974; Fortuniak 1994). Kompleksową analizę warunków solarnych przedstawiła Podstawczyńska (2007). Automatyzacja pomiarów na MSM pozwoliła na przeprowadzenie szczegółowych badań wpływu atmosfery miejskiej na transmisję promieniowania całkowitego i ultrafioletowego (UVA+UVB). Wykazano zmniejszenie rocznych sum promieniowania całkowitego w centrum Łodzi średnio o 7% (Podstawczyńska 2007, 2010).

Najmniejsze różnice w dopływie energii słonecznej między centrum Łodzi a południowo-zachodnimi rubieżami miasta występują latem (ok. 5%, z minimum w maju 3%), a największe obserwowane są w zimie (ok. 15%). Absolutnie najwyższe dobowe osłabienie transmisji całkowitego promieniowania słonecznego w Łodzi może dochodzić do 40%. Suma roczna energii promieniowania słonecznego w Łodzi była niższa o 179,4 MJ·m⁻² w stosunku do obszaru zamiejskiego (Podstawczyńska 2007, 2010).

Kolejnym wątkiem badawczym związanym z całkowitym promieniowaniem słonecznym w Łodzi była analiza jego relacji z ultrafioletem. Wykazano 50-procentowe obniżenie wartości współczynnika transmisji (ang. *clearness index*) dla ultrafioletu w stosunku do transmisji promieniowania całkowitego. Stwierdzono również, że przeciętny roczny udział ultrafioletu w promieniowaniu całkowitym wynosi 4% przy bezchmurnym niebie oraz wzrasta do 9% m.in. dla chmur *Nimbostratus* oraz chmur konwekcyjnych typu *Cumulonimbus*, *Cumulus congestus* (Podstawczyńska 2007, 2010).

W ramach opisywanej problematyki solarnej prowadzono także eksperymenty w skali topoklimatycznej – pomiary natężenia promieniowania całkowitego i UVA+UVB, bilansu radiacyjnego wewnątrz struktur miejskich, tj. w kanionach ulicznych centrum Łodzi (1,8 m nad poziomem ulicy) (Podstawczyńska, Pawlak 2006). Opracowanie wyników wykazało w kanionach ulicznych m.in. większe pochłanianie promieniowania UV niż promieniowania całkowitego, powstające w procesie odbić wielokrotnych promieniowania bezpośredniego od ścian kanionu oraz względnie mniejsze osłabienie promieniowania UV w czasie zacienienia mierników (dopływ tylko promieniowania rozproszonego).

Wpływ **odbić wielokrotnych** w kanionach ulicznych na **albedo** miasta był w Łodzi przedmiotem zarówno wspomnianych bezpośrednich pomiarów w mieście, jak również pomiarów z wykorzystaniem budowanych z cegieł modeli fizycznych (Pawlak, Fortuniak 2003a; Pawlak 2006, 2009) oraz symulacji numerycznych. W ramach symulacji numerycznych albedo miasta zbudowano dwa modele odbić wielokrotnych bazujące na: metodzie Monte-Carlo (Pawlak 2009) oraz na analitycznym rozwiązaniu problemu przy określonej macierzy współczynników widoku (Fortuniak 2003b, 2008, 2010). Oba modele dały zbieżne rezultaty (Pawlak, Fortuniak 2003b), wykazując, że sam czynnik geometryczny może przyczyniać się do obniżenia albedo o kilkadziesiąt procent oraz wyraźnie modyfikować dobowy przebieg tego

parametru. Rzeczywiste wartości albedo Łodzi, obliczane dla czujników umieszczonych na wysokich masztach w centralnych dzielnicach miasta (ul. Narutowicza i ul. Lipowa – dokładniejszy opis poniżej), kształtują się na poziomie 8–10% dla wysokich położań Słońca z charakterystycznym U-kształtnym biegiem dobowym (Pawlak 2009; Fortuniak 2010). Uzupełnieniem studiów dotyczących warunków geometrycznych miasta były pomiary współczynnika widoku nieba (SVF) ze zdjęć obiektywem typu „rybie-oko” przy wykorzystaniu autorskiego programu umożliwiającego tego typu obliczenia (Rzepa i in. 2006, 2008).

Znacznie mniej uwagi poświęcono badaniom porównawczym **promieniowania w zakresie długofalowym**. Wstępnie dokonane porównania wyników pomiarów prowadzonych w Łodzi oraz na stanowisku zlokalizowanym w odległości ok. 65 km od miasta, na terenach rolniczych w okolicy Annosławia, wskazują, że zarówno promieniowanie zwrotne, własne, jak i efektywne jest na obszarze miasta nieco wyższe (Fortuniak i in. 2015). W przypadku promieniowania zwrotnego jest to 20–30 W·m⁻² (5–10%), z nieznacznie podwyższonymi wartościami latem. Promieniowanie własne jest w mieście wyższe średnio o ok. 30–40 W·m⁻² zimą do ok. 45–55 W·m⁻² latem.

Pionierski charakter miały prowadzone w Łodzi badania pełnego **bilansu cieplnego**, w szczególności turbulencyjnych strumieni ciepła jawnego i utajonego. Zapoczątkowane w listopadzie 2000 roku przy współpracy z prof. Grimmond (wówczas Uniwersytet Indiana, USA) pomiary metodą kowariancji wirów były jednymi z pierwszych wykonanych tą metodą w Polsce i, jak do tej pory, jedynymi w polskim mieście (Fortuniak i in. 2001). Również w skali międzynarodowej była to jedna z zaledwie kilku długich serii danych bilansu cieplnego miast. System pomiarowy został zamontowany na szczycie 20-metrowego masztu znajdującego się na dachu 17-metrowego budynku przy ul. Lipowej 81. Dzięki tak wysokiemu umieszczeniu czujników (37 m) obszar źródłowy, określający rozmiary przestrzennego uśredniania wyników, obejmował od kilku do kilkudziesięciu hektarów (w zależności od warunków meteorologicznych). System działał do września 2003 roku i pozwolił na rozpoznanie rocznej zmienności struktury bilansu cieplnego w mieście (Offerle i in. 2006a) oraz na oszacowanie ciepła gromadzonego w zabudowie miejskiej (Offerle i in. 2005). W lipcu 2006 r. w tym samym miejscu zamontowano nowy system pomiarowy umożliwiający dodatkowo pomiary turbulencyjnego strumienia dwutlenku węgla. Rok wcześniej (maj

2005) system kowariancji wirów (bez CO₂) zainstalowano na maszcie (25 m) istniejącym na budynku (16 m) przy ul. Narutowicza 88. Pomiaru przy ul. Lipowej prowadzone były do września 2015 r., a przy ul. Narutowicza do sierpnia 2013 r., kiedy to uderzenie pioruna spowodowało zniszczenie większości czujników. Dodatkowo w sierpniu 2002 roku przeprowadzono kilkunastodniowe serie pomiarowe w 5 różnych typach zabudowy miejskiej, dające możliwość określenia wpływu typu zabudowy na rozkład składników bilansu cieplnego (Offerle i in. 2006b). Długoletnie badania pozwoliły na wypracowanie metodyki obliczania i weryfikacji strumieni turbulencyjnych z danych kowariancyjnych oraz ustalenie cech charakterystycznych bilansu cieplnego Łodzi (Fortuniak 2010; Fortuniak i in. 2016). Tak jak w przypadku innych miast o podobnej strukturze, w Łodzi w godzinach południowych obserwuje się mniej więcej dwukrotną przewagę strumienia ciepła jawnego Q_H nad strumieniem ciepła utajonego Q_E (stosunek Bowena ok. 2). Latem w godzinach okołopołudniowych wartości Q_H najczęściej osiągnęły ok. 150–200 $W \cdot m^{-2}$, podczas gdy Q_E jedynie 80–100 $W \cdot m^{-2}$ (Fortuniak i in. 2014). Zimą jest to odpowiednio 30–60 $W \cdot m^{-2}$ i 10–40 $W \cdot m^{-2}$. W tych samych godzinach saldo promieniowania utrzymuje się poziomie 400–450 $W \cdot m^{-2}$ latem i ok. 100 $W \cdot m^{-2}$ zimą. Strumień ciepła utajonego jest w Łodzi dodatni (skierowany od powierzchni do atmosfery) praktycznie przez całą dobę niezależnie od pory roku, chociaż w nocy przyjmuje z reguły niewielkie, często bliskie zera, wartości. Natomiast strumień ciepła jawnego stosunkowo często, mniej więcej w 2/3 przypadków, przyjmuje w godzinach nocnych niewielkie ujemne wartości, co świadczy o tym, że mimo istnienia MWC transport ciepła odbywa się od atmosfery do podłoża (Fortuniak 2010). Otrzymane rezultaty nie potwierdzają zatem dość popularnej tezy o przewadze na obszarach zurbanizowanych dodatnich wartości Q_H w godzinach nocnych. Dostatecznie powszechną cechą bilansu cieplnego miast jest natomiast obserwowany również w Łodzi fakt utrzymywania się w godzinach wieczornych dodatnich wartości Q_H przez stosunkowo długi czas po zmianie na ujemny znaku salda promieniowania.

Dopełnieniem badań kowariancyjnych w Łodzi były pomiary strumienia ciepła jawnego wykonywane przy pomocy **scyntylometru** o dużej aperturze (Zieliński i in. 2013, 2017, 2018). Metoda ta umożliwia poznanie średniej wartości Q_H wzdłuż kilkukilometrowej ścieżki pomiarowej. Nadajnik scyntylometru (BLS900) umieszczony był na maszcie przy ul. Lipowej 81, a odbiornik

na budynku odległym o 3,2 km w kierunku północno-wschodnim (w pobliżu punktu pomiarowego przy ul. Narutowicza 88). Badania scyntylometryczne wykonywane od sierpnia 2009 do listopada 2012 roku potwierdzają dużą zbieżność z danymi otrzymanymi metodą kowariancji wirów, co jednocześnie dowodzi ich reprezentatywności dla centralnych dzielnic miasta.

Oprócz bezpośrednich pomiarów radiacyjnych i turbulencyjnych strumieni energii istotny przyczynek do poznania pełnego bilansu cieplnego miało przeprowadzone przez Kłysika (1996) oszacowanie zróżnicowania emisji ciepła antropogenicznego Q_A na obszarze Łodzi. W okresie, dla którego przeprowadzono analizy antropogeniczny strumień ciepła w centralnych dzielnicach Łodzi sięgał 71 $W \cdot m^{-2}$ zimą i 18 $W \cdot m^{-2}$ latem, ze średnią roczną na poziomie 40 $W \cdot m^{-2}$. Należy jednak zaznaczyć, że przemiany na terenach zurbanizowanych, jakie zaszły w latach 90. ubiegłego wieku (docieplanie budynków, wzrost ruchu samochodowego itp.), mogły przyczynić się do znacznej zmiany struktury Q_A .

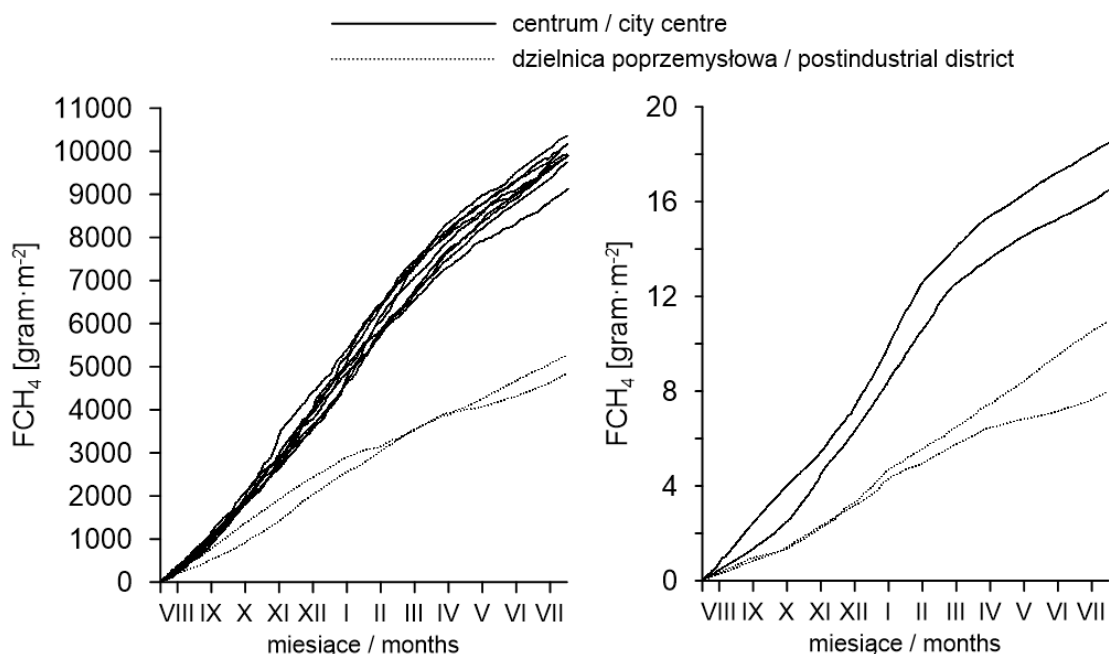
Wyniki pomiarów składników bilansu cieplnego, otrzymane zarówno z pomiarów metodą kowariancji wirów, jak i metodą scyntylometryczną, dostarczyły bazy empirycznej do weryfikacji modeli numerycznych utworzonych początkowo w celu badania czynników determinujących miejską wyspę ciepła (Fortuniak 2003a, b). Stworzony w ten sposób autorski **model bilansu cieplnego** powierzchni miejskiej, mimo stosunkowo prostego schematu opartego bezpośrednio na parametryzacjach teorii Monina-Obuchowa, poprawnie opisuje ewolucję turbulencyjnych strumieni ciepła jawnego i utajonego. Porównanie z innymi modelami, niejednokrotnie o znacznie większym stopniu komplikacji, wskazuje na dużą użyteczność prostych modeli „masowych” (Grimmond i in. 2010a, 2011) w parametryzacjach procesów powierzchniowych na terenach zurbanizowanych. Niektóre koncepcje wypracowane przy analizie prostych modeli numerycznych w Łodzi zostały również wykorzystane w bardziej zaawansowanych modelach klimatu miasta (Wouters i in. 2016). Istotne znaczenie dla weryfikacji możliwości stosowania teorii Monina-Obuchowa na obszarach miejskich mają też prace dotyczące całkowych (Fortuniak i in. 2013) i spektralnych (Fortuniak, Pawlak 2015) charakterystyk turbulencji nad terenem zurbanizowanym powstałe na bazie pomiarów kowariancyjnych.

Funkcjonujący w latach 2006–2015 system pomiarowy przy ul. Lipowej pozwalał na pomiary wymiany dwutlenku węgla między pod-

łożem a atmosferą, dlatego również badania strumienia tego gazu stanowiły istotny element aktywności naukowej KMik UŁ (Pawlak i in. 2011; Pawlak 2016). Ciągłe, cogodzinne pomiary **strumienia dwutlenku węgla** (FCO_2) ujawniły zdecydowaną przewagę wymiany o charakterze dodatnim (skierowanym od powierzchni do atmosfery), co oznacza, że niezależnie od pory roku badany fragment centrum Łodzi jest źródłem dwutlenku węgla dla atmosfery (Pawlak i in. 2011; Pawlak 2016). Średnia wartość FCO_2 w latach 2006–2015 wyniosła $7,5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, przy czym należy zwrócić uwagę na istnienie wyraźnego cyklu rocznego. Strumień FCO_2 był znacząco wyższy w chłodnej połowie roku (maksymalne wartości sięgały $60 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) oraz niższy w lecie (do $-10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Taki rytm wywołany był intensywną emisją antropogenicznego CO_2 w ziemi, będącą efektem spalania paliw kopalnych w silnikach samochodowych i podczas ogrzewania mieszkań. W lecie obserwowano obniżenie antropogenicznej emisji CO_2 – natężenie ruchu samochodowego w wakacje ulegało zmniejszeniu, wstrzymany był proces ogrzewania mieszkań, a dodatkową rolę odgrywał proces fotosyntezy, podczas którego roślinność miejska pobiera dwutlenek węgla z powietrza w pewnym stopniu kompensując emisje antropogeniczne. Z przeprowadzonych pomiarów wynika również, że FCO_2 cechuje się wyraźnym rytmem dobowym z podwójnym maksimum w godzinach przedpołudniowych i popołudniowo-wieczornych (Pawlak i in. 2011; Pawlak 2016). Taka zmienność szczególnie widoczna była zimą – pierwsze maksimum jest wówczas efektem porannego szczytu samochodowego, a na popołudniowe, zwykle wyższe, składa się nie tylko wzmożony ruch samochodowy, lecz także aktywność mieszkańców (gotowanie i ogrzewanie mieszkań). Decydująca o intensywności i zwrocie wymiana antropogeniczna CO_2 jest również przyczyną istnienia tygodniowego rytmu FCO_2 . Podczas weekendów strumień ten był niższy od obserwowanego w dni robocze o 32–41% (w zależności od pory roku). Skumulowany roczny strumień w badanej części centrum Łodzi został oszacowany na 9–10 $\text{kg CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (rys. 2). W latach 2016–2018 pomiary FCO_2 przeprowadzono również w dzielnicy przemysłowej Łodzi, która charakteryzuje się nieco większym odsetkiem powierzchni pokrytych roślinnością, ale przede wszystkim pełni odmienną funkcję. W otoczeniu punktu pomiarowego (który zainstalowany został na wieży na terenie Jednostki Ratowniczo-Gaśniczej PSP nr 10 w Łodzi przy ul. Pojezierskiej 92) dominują dawne hale

fabryczne zamienione obecnie na hurtownie oraz sklepy wielkopowierzchniowe. Wyjątek stanowi obszar położony na południowy wschód od stanowiska obejmujący tereny elektrociepłowni EC3, który z uwagi na specyfikę funkcji został wyłączony z analizy. W okresie pomiarowym wartości strumienia FCO_2 były wyraźnie niższe od obserwowanych w centrum Łodzi i nie przekraczały $25 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (średnio w całym okresie pomiarowym $3,7 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Mniejsza intensywność wymiany wynikała z mniejszej emisji antropogenicznego CO_2 – dzielnica przemysłowa charakteryzuje się mniejszym ruchem samochodowym, ale również zdecydowanie mniejszą intensywnością spalania paliw kopalnych na ogrzewanie mieszkań czy gotowanie (w otoczeniu punktu pomiarowego znajdują się wyłącznie sklepy i hurtownie, brak natomiast budynków mieszkalnych). W cieplej porze roku strumień FCO_2 w znacznym stopniu kompensował pobór dwutlenku węgla przez rośliny podczas fotosyntezy. Podobnie jak w centrum miasta FCO_2 charakteryzowało się rytmem rocznym i dobowym z nieco mniej widocznym podwójnym maksimum. Rytm tygodniowy był z kolei wyraźniejszy niż w centrum miasta, ponieważ FCO_2 w weekend było średnio niższe od obserwowanego podczas dni roboczych – od 44% jesienią do 71% w wiosną. Roczny strumień był o około połowę niższy.

Na obu opisanych stanowiskach (ul. Lipowa 81 oraz Jednostka PSP) prowadzono również unikatowe pomiary **strumienia metanu** (FCH_4) – dotychczas oprócz Łodzi (Pawlak, Fortuniak 2016) podobne badania w warunkach miejskich prowadzono tylko w Londynie (Helfter i in. 2016). Koncentracja metanu w powietrzu jest około 200 razy mniejsza w porównaniu z dwutlenkiem węgla, ale ze względu na co najmniej 25-krotnie wyższy potencjał cieplarniany analizom wymiany tego gazu między podłożem a atmosferą należy poświęcać tyle samo uwagi co dwutlenkowi węgla (Nicolini i in. 2013; Christen 2014). W centrum Łodzi notowano stosunkowo niskie wartości strumienia CH_4 (średnio $25,6 \text{ nmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), ale podobnie jak w przypadku strumienia CO_2 , charakteryzował się on zdecydowaną przewagą wartości dodatnich oraz wyraźnym rytmem rocznym z podwyższonymi wartościami w chłodnej połowie roku (Pawlak, Fortuniak 2016). Centrum Łodzi można zatem uznać za źródło metanu dla atmosfery w ciągu całego roku. Przyczyną takiej zmienności są, podobnie jak w przypadku FCO_2 , emisje antropogeniczne będące efektem spalania paliw kopalnych w silnikach samochodowych, ale również niecałkowitego spalania gazu ziemnego, wycieków z gazociągów, jak



Rys. 2. Skumulowany roczny strumień dwutlenku węgla (FCO₂) i metanu (FCH₄) w centrum Łodzi oraz w dzielnicy przemysłowej w latach 2006–2018

The cumulative annual flux of carbon dioxide (FCO₂) and methane (FCH₄) in the centre of Lodz and in the post-industrial district in 2006–2018

też metanogenezy w kanalizacji miejskiej. Rytm dobowy FCH₄ nie jest tak wyraźny jak w przypadku FCO₂, a podwójne maksimum w ciągu doby pojawiało się tylko w chłodnej połowie roku. W ciągu tygodnia obserwowane były niższe wartości FCH₄ w weekendy, ale różnice te nie przekraczały 16% (Pawlak 2016). W dzielnicy przemysłowej strumienie FCH₄ były o około 30–40% niższe (średnia w latach 2016–2018 wyniosła 17 nmol·m⁻²·s⁻¹) i podobnie jak w centrum miasta, dominowały tu wartości dodatnie. Cykl dobowy pozbawiony był podwójnego maksimum, a różnice strumieni obserwowanych w weekendy były tylko kilka procent niższe od pojawiających się w dniach roboczych. Skumulowaną roczną wymianę metanu w centrum Łodzi oszacowano na około 16–18 g·m⁻², podczas gdy w dzielnicy przemysłowej zanotowano wartości rzędu 8–10 g·m⁻².

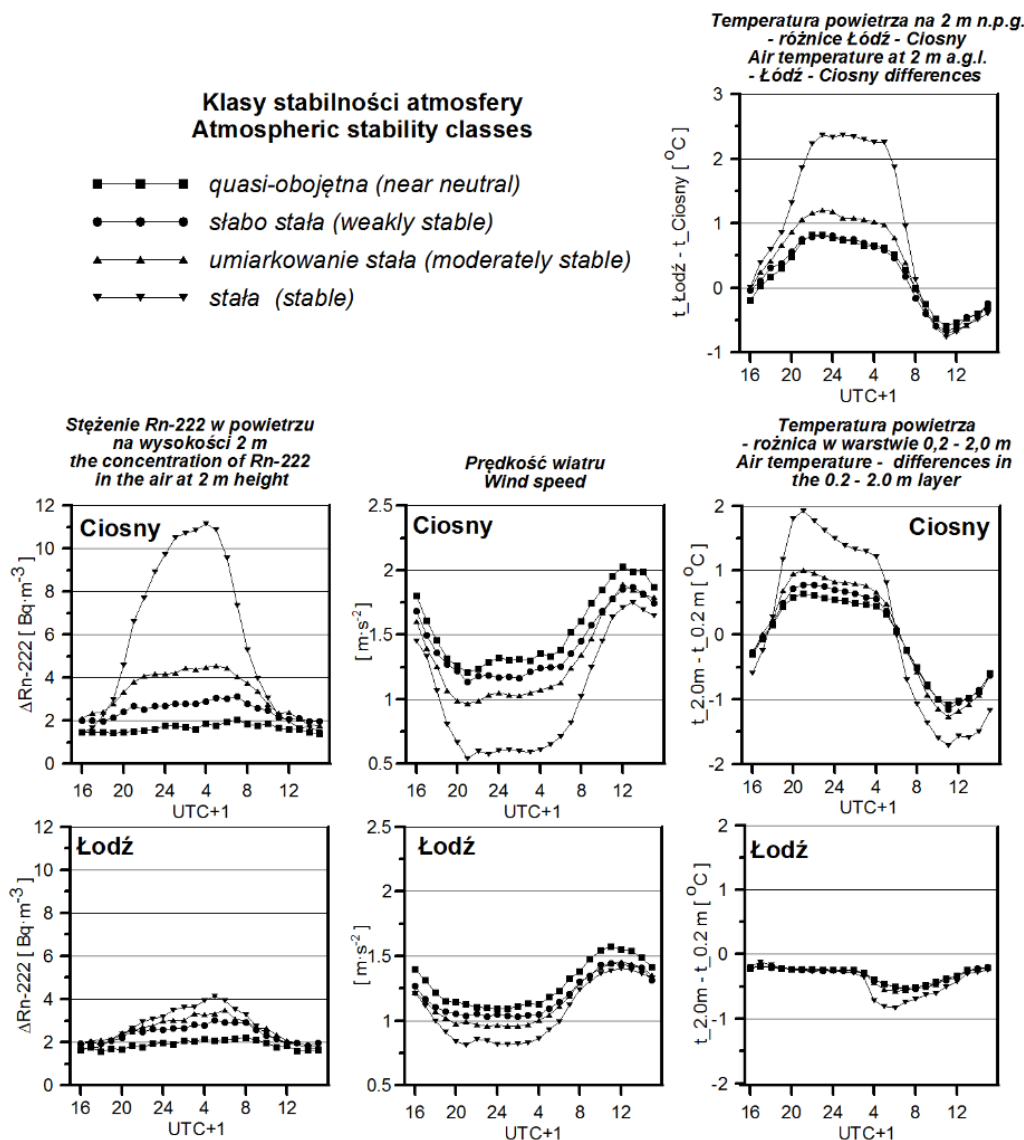
Od 2007 roku Katedra Meteorologii i Klimatologii UŁ prowadzi w Łodzi i na terenie zamiejskim ciągle pomiary stężenia **radonu (Rn-222)** w powietrzu atmosferycznym. W latach 2007–2010, badania te realizowano przy współpracy z Laboratorium Ekspertyz Radiometrycznych Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie. Do monitorowania stężenia Rn-222 w powietrzu stosowano automatyczną komorę jonizacyjną Alpha GUARDPQ2000 Pro umieszczoną w klatce meteorologicznej na wysokości 2 m nad gruntem. Podstawę opracowań

stanowiły średnie 60-minutowe stężenia Rn-222 (Podstawczyńska 2013). Studia porównawcze prowadzone w centrum Łodzi (Miejska Stacja Meteorologiczna) oraz na stacji zamiejskiej Ciosny (51°55'24"N, 19°24'38"E, 150 m n.p.m., 25 km na północ od centrum Łodzi, teren rolniczy) pozwoliły stwierdzić, że odpowiednie średnie wieloletnie na tych stacjach wynoszą 5 i 6 Bq·m⁻³. Najwyższe zarejestrowane w latach 2007–2011 stężenie Rn-222 osiągnęło 25 Bq·m⁻³ na MSM i 40 Bq·m⁻³ w Ciosnach. Największe ujemne różnice stężenia Rn-222 między Łodzią, a stacją w Ciosnach < -20 Bq·m⁻³ przypadają od kwietnia do września. W przebiegu rocznym w centrum miasta i Ciosnach stężenia są najwyższe w miesiącach jesienno-zimowych, a tylko na stacji zamiejskiej obserwuje się latem drugorzędne roczne maksimum. Wyraźny rytm dobowy, z minimum w godzinach popołudniowych i maksimum w godzinach porannych ujawnia się od marca do grudnia na obu stacjach z najwyższą amplitudą dobową w czerwcu (Ciosny) oraz we wrześniu (Łódź). Rozpoznanie zmienności czasowej stężenia Rn-222 na tle wybranych elementów meteorologicznych pozwoliło stwierdzić, że najsilniejsze związki statystyczne ze stężeniem Rn-222 wykazują: strumień ciepła glebowego oraz temperatura powietrza na wysokości 2 m nad gruntem (Podstawczyńska i in. 2010; Podstawczyńska 2013; Podstawczyńska, Pawlak 2016).

Badając uwarunkowania cyrkulacyjne (Podstawczyńska, Piotrowski 2010) pokazano, że największe amplitudy dobowe stężenia Rn-222 w Łodzi notowuje się podczas cyrkulacji antycyklonalnej z kierunków SE i W, podczas gdy w Ciosnach w czasie adwekcji z kierunku E.

Drugim aspektem badawczym dotyczącym radonu w Łodzi, aktualnie intensywnie rozwijanym, jest wykorzystanie tego gazu jako pasywnego znacznika procesów pionowego mieszania w warstwie granicznej atmosfery (Podstawczyńska

2016a, b; Chambers i in. 2016; Podstawczyńska, Chambers 2018; Chambers i in. 2019). Zastosowano nową technikę wyznaczania klas stabilności atmosfery w przebiegu dobowym, wykorzystującą jedynie nocne wartości stężenia Rn-222 (ang. *radon-based stability classification technique*). Wykorzystując dane ze stacji Ciosny wydzielono 4 klasy stabilności charakteryzujące się wyraźnie odmiennym przebiegiem elementów meteorologicznych i kontrastów termicznych między miastem a terenem zamiejskim (rys. 3).



Rys. 3. Przebieg dobowy średnich godzinnych wartości różnic temperatury powietrza na wysokości 2 m n.p.g. między centrum Łodzi a stacją Ciosny, stężenia Rn-222, prędkości wiatru, różnic temperatury powietrza w warstwie 0,2–2,0 m na obu stacjach podczas 4 klas stabilności atmosfery wyznaczonych na podstawie danych Rn-222 ze stacji Ciosny w latach 2008–2011 (Podstawczyńska 2016a, zmodyfikowane)

The daily pattern of average hourly values of differences in air temperature at a height of 2 m AGL between the centre of Łódź and the station in Ciosny, the concentration of Rn-222, wind speed, air temperature differences in the 0.2 – 2.0 m layer at both sites during 4 atmospheric stability classes based on Rn-222 data from the Ciosny site in 2008–2011 (Podstawczyńska 2016a, modified)

Uwagi końcowe

Wieloletnie badania klimatu miasta prowadzone w Łodzi, głównie przez (obecnie) Katedrę Meteorologii i Klimatologii Wydziału Nauk Geograficznych Uniwersytetu Łódzkiego, zaowocowały bogatym piśmiennictwem, znacznym wkładem w rozwój tej subdyscypliny w Polsce, a także intensywną współpracą międzynarodową. Tematyka podejmowanych studiów dotyczyła zarówno typowych, dosyć często analizowanych problemów obejmujących takie zagadnienia jak miejska wyspa ciepła czy wpływ miasta na warunki solarne, jak również problemów zupełnie nowych. Niektóre z rozwijanych w KMiK nurtów badawczych, dotyczące między innymi pomiarów strumieni turbulencyjnych, wymiany gazowej dwutlenku węgla i metanu czy pomiarów scyntylogometrycznych na terenach zurbanizowanych, można uznać za pionierskie, również w skali międzynarodowej. Szczególną aktywizację działań w zakresie klimatologii miejskiej, związaną między innymi z automatyzacją pomiarów i pojawieniem się nowoczesnych metod pomiarowych, przyniosła w ośrodku łódzkim ostatnia dekada XX w. i początek obecnego stulecia. Klimatolodzy, w tym zajmujący się klimatem miast, wnieśli w tym czasie decydujący wkład w międzynarodową rozpoznawalność łódzkiego ośrodka geograficznego (Bański 2017). Niestety w ostatnich latach aktywność KMiK została w znacznym stopniu ograniczona przez redukcję potencjału naukowego (zmniejszenie składu osobowego Katedry o 30% w latach 2008–2016), wynikającą z polityki kadrowej ówczesnych władz Wydziału, ukierunkowanej głównie na działalność dydaktyczną. W efekcie tych działań zakres badań klimatu miast prowadzonych przez KMiK w Łodzi uległ zawężeniu, co wynika z ograniczonych możliwości realizacji dużych projektów badawczych, zwłaszcza przy współpracy międzynarodowej i rodzi obawy o dalszy rozwój tej dziedziny w ośrodku łódzkim.

Literatura

Bański J. 2017. Analiza dorobku publikacyjnego samodzielnych pracowników naukowych z polskich placówek geograficznych. *Przegląd Geograficzny* 89, 4: 595-616.

Barlow J., Best M., Bohnenstengel S.I., Clark P., Grimmond S., Lean H., Christen A., Emeis S., Haefelin M., Harman I.N., Lemonsu A., Martilli A., Pardyjak E., Rotach M.W., Ballard S., Boutle I., Brown A., Cai X.M., Carpentieri M., Coceal O.,

Crawford B., Di Sabatino S., Dou J.X., Drew D.R., Edwards J.M., Fallmann J., Fortuniak K., Gornall J., Gronemeier T., Halios C.H., Hertwig D., Hirano K., Holtslag A.A.M., Luo Z.W., Mills G., Nakayoshi M., Pain K., Schlunzen K.H., Smith S., Soulhac L., Steeneveld G.J., Sun T., Theeuwes N.E., Thomson D., Voogt J.A., Ward H.C., Xie Z.T., Zhong J. 2017. Developing a research strategy to better understand, observe, and simulate urban atmospheric processes at kilometer to subkilometer scales. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98, 10: ES261-ES264.

Chambers S.D., Podstawczyńska A., Pawlak W., Williams A.G., Fortuniak K., Griffiths A.D. 2019. Characterizing the state of the urban surface layer using radon-222. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124, 2: 770-788.

Chambers S.D., Podstawczyńska A., Williams A.G., Pawlak W. 2016. Characterising the influence of atmospheric mixing state on urban heat island intensity using radon-222. *Atmospheric Environment* 147: 355-368.

Christen A. 2014. Atmospheric measurement techniques to quantify greenhouse gas emissions from cities. *Urban Climate* 10, 2: 241-260.

Dubaniewicz H. 1977. Wpływ miasta na kształtowanie się wilgotności powietrza obszarów przyległych na przykładzie Łodzi. *Studia Regionalne I (VI)*: 95-103.

Fortuniak K. 1994. Wpływ aglomeracji łódzkiej na usłonecznienie. *Przegląd Geofizyczny* XXXIX, 2: 169-178.

Fortuniak K. 2003a. A slab surface energy balance model (SUEB) and its application to the study on the role of roughness length in forming an urban heat island. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20th century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne* 75: 368-377.

Fortuniak K. 2003b. Miejska wyspa ciepła. Podstawy energetyczne, studia eksperymentalne, modele numeryczne i statystyczne. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 1-233.

Fortuniak K. 2008. Numerical estimation of the effective albedo of an urban canyon. *Theoretical and Applied Climatology* 91, 1-4: 245-258.

Fortuniak K. 2010. Radiacyjne i turbulencyjne składniki bilansu cieplnego terenów zurbanizowanych na przykładzie Łodzi. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 1-232.

Fortuniak K., Kłysik K. 1998. The model of winter night-time temperature distribution in Łódź. *Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica* 3: 393-402.

Fortuniak K., Kłysik K. 2008. Osobliwości klimatu miast na przykładzie Łodzi. W: K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.) *Klimat i bioklimat*

- miast. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 477-488.
- Fortuniak K., Pawlak W. 2015. Selected spectral characteristics of wind turbulence over urbanised area in the centre of Łódź, Poland. *Boundary-Layer Meteorology* 154, 1: 137-156.
- Fortuniak K., Kłysik K., Pawlak W., Podstawczyńska A., Siedlecki M., Wibig J., Zieliński M. 2014. Singularities of the urban climate of Łódź, Central Poland. W: E. Kobojeck, T. Marszał (red.) *Natural environment of Poland and its protection in Łódź University Geographical Research*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 125-150.
- Fortuniak K., Kłysik K., Wibig J. 2006. Urban-rural contrasts of meteorological parameters in Łódź. *Theoretical and Applied Climatology* 84, 1-3: 91-101.
- Fortuniak K., Offerle B.D., Grimmond C.S.B., Oke T.R., Kłysik K., Wibig J. 2001. A system to observe the urban energy balance: Initial results from winter-time measurements in Łódź. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio B – Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia* LV/LVI, 20: 167-176.
- Fortuniak K., Pawlak W., Siedlecki M. 2013. Integral turbulence statistics over a central European city centre. *Boundary-Layer Meteorology* 146, 2: 257-276.
- Fortuniak K., Pawlak W., Siedlecki M. 2015. Urban-rural differences in longwave radiation – Łódź case study. 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, 20-24 July 2015, Toulouse, France, Presentations. Wyd. International Association for Urban Climate, World Meteorological Organization, American Meteorological Society, Centre National de la Recherche Scientifique, MétéoFrance: 1-4 (CD).
- Fortuniak K., Pawlak W., Siedlecki M. 2016. Multi-annual eddy-covariance measurements of surface energy balance components for urban, agricultural and natural wetland sites in Poland. W: M. Reckermann, S. Köppen (red.) 1st Baltic Earth Conference “Multiple drivers for Earth system changes in the Baltic Sea region”, Nida, Curonian Spit, Lithuania, 13-17 June 2016. Conference Proceedings. International Baltic Earth Secretariat Publication No. 9: 139-140.
- Grimmond C.S.B., Blackett M., Best M.J., Baik J.-J., Belcher S.E., Beringer J., Bohnenstengel S.I., Calmet I., Chen F., Coutts A., Dandou A., Fortuniak K., Gouvea M.L., Hamdi R., Hendry M., Kanda M., Kawai T., Kawamoto Y., Kondo H., Krayerhoff E.S., Lee S.-H., Loridan T., Martilli A., Masson V., Miao S., Oleson K., Ooka R., Pigeon G., Porson A., Ryu Y.-H., Salamanca F., Steeneveld G.-J., Tombrou M., Voogt J.A., Young D., Zhang N. 2011. Initial Results from Phase 2 of the International Urban Energy Balance Comparison Project. *International Journal of Climatology* 31, 2: 244-272.
- Grimmond C.S.B., Blackett M., Best M.J., Barlow J., Baik J.-J., Belcher S.E., Bohnenstengel S.I., Calmet I., Chen F., Dandou A., Fortuniak K., Gouvea M.L., Hamdi R., Hendry M., Kawai T., Kawamoto Y., Kondo H., Krayerhoff E. S., Lee S.-H., Loridan T., Martilli A., Masson V., Miao S., Oleson K., Pigeon G., Porson A., Ryu Y.-H., Salamanca F., Shashua-Bar L., Steeneveld G.-J., Tombrou M., Voogt J., Young D., Zhang N. 2010a. The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49, 6: 1268-1292.
- Grimmond C.S.B., Roth M., Oke T.R., Au Y.C., Best M., Betts R., Carmichael G., Cleugh H., Dabberdt W., Emmanuel R., Freitas E., Fortuniak K., Hanna S., Klein P., Kalkstein L.S., Liu C.H., Nickson A., Pearlmutter D., Sailor D., Voogt J. 2010b. Climate and More Sustainable Cities: Climate Information for Improved Planning and Management of Cities (Producers/Capabilities Perspective). *Procedia Environmental Sciences* 1: 247-274.
- Helfter C., Tremper A.H., Halios C.H., Kotthaus S., Bjorkegren A., Grimmond C.S.B., Barlow J.F., Nemitz E. 2016. Spatial and temporal variability 1 of urban fluxes of methane, carbon monoxide and carbon dioxide above London, UK. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16: 10543-10557.
- Kłysik K. 1974. Cechy dobowego i rocznego przebiegu usłonecznienia w Łodzi. *Zeszyty Naukowe UŁ, Seria II - Nauki Matematyczno-Przyrodnicze* 63: 23-32.
- Kłysik K. 1985. Wpływ struktury termiczno-wilgotnościowej przyziemnych warstw powietrza na klimat lokalny w wybranych warunkach terenowych. *Acta Geographica Lodziensia* 49: 1-119.
- Kłysik K. 1996. Spatial and seasonal distribution of anthropogenic heat emission in Lodz, Poland. *Atmospheric Environment* 30, 20: 3397-3404.
- Kłysik K. 1998a. Charakterystyka powierzchni miejskich w Łodzi z klimatologicznego punktu widzenia. *Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica* 3: 173-185.
- Kłysik K. 1998b. Struktura miejskiej wyspy ciepła w Łodzi. *Acta Universitatis Lodziensis, Folia Geographica Physica* 3: 385-390.
- Kłysik K. (red) 2004. 100 lat obserwacji meteorologicznych w Łodzi. *Acta Geographica Lodziensia* 89: 1-206.
- 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.
- Kłysik K., Tarajkowska M. 1977. Niektóre cechy termicznej struktury przyziemnych warstw atmosfery nad miastem. *Przegląd Geofizyczny XXII (XXX)*, 1: 43-48.
- Kłysik K., Kafar M., Gajda-Pijanowska I. 1995a. Historia obserwacji meteorologicznych w Łodzi. W: K. Kłysik (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 279-286.
- Kłysik K., Zawadzka A., Gajda-Pijanowska I. 1995b. Wstępne wyniki rocznej działalności Miejskiej Stacji Meteorologicznej w Łodzi. W: K. Kłysik (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 79-86.
- Nicolini G., Castaldi S., Fratini G., Valentini R. 2013. A literature overview of micrometeorological CH₄ and N₂O flux measurements in terrestrial ecosystems. *Atmospheric Environment* 81: 311-319.
- Offerle B., Grimmond C.S.B., Fortuniak K. 2005. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology* 25, 10: 1405-1419.
- Offerle B., Grimmond C.S.B., Fortuniak K., Kłysik K., Oke T.R. 2006a. Temporal variations in heat fluxes over a central European city centre. *Theoretical and Applied Climatology* 84, 1: 103-115.
- Offerle B., Grimmond C.S.B., Fortuniak K., Pawlak W. 2006b. Intra-urban differences of surface energy fluxes in a central European city. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45, 1: 125-136.
- Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. 2017. *Urban Climates*. Cambridge University Press: 1-525.
- Pawlak W. 2006. Pomiar albedo efektywnego w mieście. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio B – Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia LXI*, 41: 353-361.
- Pawlak W. 2009. Efektywne albedo powierzchni miejskiej. *Acta Universitatis Lodzianensis, Folia Geographica Physica* 9: 1-166.
- Pawlak W. 2016. Wybrane wyniki pomiarów strumieni turbulencyjnych netto gazów cieplarnianych (pary wodnej, dwutlenku węgla i metanu) w centrum Łodzi w latach 2013–2015. *Acta Geographica Lodzianensis* 104: 87-99.
- Pawlak W., Fortuniak K. 2003a. Application of physical model to study effective albedo of the urban canyon. W: K. Kłysik, T. Oke, K. Fortuniak, S. Grimmond, J. Wibig (red.) *Fifth International Conference on Urban Climate*, 1-5 September, 2003, Łódź, Poland, Proceedings, Vol. 1. Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geographical Sciences, University of Łódź, Łódź: 233-236.
- Pawlak W., Fortuniak K. 2003b. Estimation of the effective albedo of the urban canyon – comparison of the two different algorithms. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20th century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne* 75: 361-367.
- 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: 8281-8294.
- Pawlak W., Fortuniak K., Siedlecki M. 2011. Carbon dioxide flux in the centre of Łódź, Poland – analysis of a 2-year eddy covariance measurements data set. *International Journal of Climatology* 31, 2: 232-243.
- Podstawczyńska A. 2007. Cechy solarne klimatu Łodzi. *Acta Universitatis Lodzianensis, Folia Geographica Physica* 7: 1-294.
- Podstawczyńska A. 2010. UV and Global Solar Radiation in Łódź, Central Poland. *International Journal of Climatology* 30, 1: 1-10.
- Podstawczyńska A. 2013. Meteorologiczne uwarunkowania stężenia radonu w przygruntowej warstwie powietrza w środowisku miejskim i zamieszkim. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 1-285.
- Podstawczyńska A. 2016a. Differences of near-ground atmospheric Rn-222 concentration between urban and rural area with reference to microclimate diversity. *Atmospheric Environment* 126: 225-234.
- Podstawczyńska A. 2016b. Wyniki rocznego monitoringu stężenia radonu w powietrzu budynku mieszkalnego w Łodzi na tle warunków meteorologicznych. *Acta Geographica Lodzianensis* 104: 137-146.
- Podstawczyńska A., Chambers S.D. 2018. Radon-based technique for the analysis of atmospheric stability – a case study from Central Poland. *Nukleonika* 63, 2: 47-54.
- Podstawczyńska A., Pawlak W. 2006. Pomiar wybranych elementów meteorologicznych w kanionie ulicznym Łodzi. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio B – Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia LXI*, 43: 370-379.
- Podstawczyńska A., Pawlak W. 2016. Soil heat flux and air temperature as factors of radon (Rn-222) concentration in the near-ground air layer. *Nukleonika* 61, 3: 231-237.
- Podstawczyńska A., Piotrowski P. 2010. Stężenie radonu (Rn-222) w przygruntowej warstwie powietrza w środkowej i południowej Polsce na tle cyrkulacji atmosferycznej. *Przegląd Geofizyczny LV*, 3-4: 145-156.
- Podstawczyńska A., Kozak K., Pawlak W., Mazur J. 2010. Seasonal and diurnal variation of outdoor radon (²²²Rn) concentrations in urban and rural

- area with reference to meteorological conditions. *Nukleonika* 55, 4: 543-547.
- Róžański S. 1959. Budowa miasta a jego klimat. Wyd. Arkady, Warszawa: 1-323.
- Róžański S., Tarajkowska M., Zych S. 1961. Niektóre wyniki badań nad klimatem Łodzi. *Przegląd Geofizyczny* VI (XIV), 1-2: 19-26.
- Rzepa M., Siedlecki M., Gromek B. 2006. Zastosowanie programu BMSky-view do obliczania współczynnika widoku nieba w centrum Łodzi. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio B – Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia* LXI, 46: 400-410.
- Rzepa M., Siedlecki M., Gromek B. 2008. Correlation between temperature distribution and sky view factor in the center of Łódź. W: K. Kłysik, J. Wibig, K. Fortuniak (red.) *Klimat i bioklimat miast*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 489-500.
- Siedlecki M. 2003. Urban-rural wind speed differences in Łódź. W: K. Kłysik, T. Oke, K. Fortuniak, S. Grimmond, J. Wibig (red.) Fifth International Conference on Urban Climate, 1-5 September, 2003, Łódź, Poland, Proceedings, Vol. 1. Department of Meteorology and Climatology, Faculty of Geographical Sciences, University of Łódź, Łódź: 459-462.
- Skrzypski J., Papiernik Ź. 2006. Zmiany bioklimatu miast (na przykładzie Łodzi). *Polska Akademia Nauk, Oddział w Łodzi*, Łódź: 1-192.
- Tarajkowska M., Zawadzka A. 1984. Badania klimatu miast w Zakładzie Meteorologii, Klimatologii i Hydrologii IG UŁ. Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji nt. Klimat i bioklimat miast, Łódź, 22-24 listopada 1984 r. Uniwersytet Łódzki, Łódź: 7-20.
- Wawer J. 1997. Miejska wyspa ciepła w Warszawie. *Prace i Studia Geograficzne* 20: 145-197.
- Wouters H., Demuzere M., Blahak U., Fortuniak K., Maiheu B., Camps J., Tielemans D., van Lipzig N.P.M. 2016. The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: description and application with the COSMO-CLM model for a Belgian summer. *Geoscientific Model Development* 9, 9: 3027-3054.
- 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.
- Zieliński M., Fortuniak K., Pawlak W., Siedlecki M. 2017. Influence of Mman 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.
- 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 Meteorol.* 167, 3: 469-492.
- Zych S. 1951. Przegląd literatury z zakresu klimatologii miast. *Przegląd Meteorologiczny i Hydrologiczny* 3/4: 227-230.
- Zych S. 1961. Zagadnienia klimatyczne miasta Łodzi. *Przegląd Techniczny* 49: 9.
- Zych S., Tarajkowska M., Zawadzka A. 1964. Zanieczyszczenia atmosferyczne w miastach. W: *Warunki zdrowotne w planowaniu miast*. Materiały z konferencji, Płock 28-30.XI.1961 r. Wyd. Instytut Urbanistyki i Architektury, Seria Prac Własnych 80: 7-36.

Summary

The paper presents a historical outline and main achievements of Lodz researchers in the field of urban climate. This subject is one of the main areas of interest for climatologists from Lodz, starting with the works of Zych and Róžański (Róžański 1959; Róžański *et al.* 1961; Zych 1961). A particular intensification of studies on urban climate in Lodz took place after the creation in 1992, on the initiative of prof. Kłysik, of the Municipal Meteorological Station (MSM) (Kłysik *et al.* 1995b). The station, located in the city centre operated until 2012. The automatization of measurements in 1996 allowed further progress. The activities focused on a comparative analysis of meteorological elements, mainly air temperature and solar conditions, with a rural station (Lublinek) (e.g. Kłysik, Fortuniak 1998, 1999; Fortuniak 2003b; Fortuniak *et al.* 2006; Podstawczyńska 2007). Besides, mobile measurements were carried out. This allowed to detect an extremely intensive urban heat island (UHI), where temperature differences between the city centre and rural areas reached 12°C (Kłysik, Fortuniak 1999). Additionally, the emission of artificial heat in Lodz was estimated (Kłysik 1996). Other works focused on the modelling of urban climate phenomena including UHI (Fortuniak 2003b) or absorption of radiation in urban structures (Fortuniak 2008; Pawlak 2009). The activity of the Lodz researches in the field of urban climatology is manifested, inter alia, through periodically organized conferences "Urban climate and bioclimate" (in 1984, 1992, 1997, 2007, 2015) and the organization of the 5th International Conference on Urban Climate (ICUC-5) in 2003.

Since the beginning of the present century, micrometeorological measurements have become an important aspect of the studies on urban

climate in Lodz. The first eddy covariance (EC) system was set up in Lodz in 2000 in cooperation with Indiana University. It allowed to measure all components of urban energy balance including sensible and latent heat fluxes (Offerle *et al.* 2006a, b). Since 2006, the EC system has been extended to measure the turbulent CO₂ flux (Pawlak *et al.* 2011), and from 2013 also the CH₄ flux (Pawlak, Fortuniak 2016). In 2009–2012, studies on the intensity of turbulence and sensible heat flux over the city centre were carried out on

a three-kilometre path using a scintillometer (Zieliński *et al.* 2013, 2017, 2018). The turbulence characteristics were also analyzed based on several years of EC data from two towers (Fortuniak *et al.* 2013; Fortuniak, Pawlak 2015). In addition, in recent years, the measurements of radon concentration in the ground-level air layer in the city have become an important aspect of urban climate studies in Lodz (Podstawczyńska 2013, 2016a).