

## HISTORIA I WSPÓŁCZESNOŚĆ BADAŃ NAD KLIMATEM WROCŁAWIA – POMIARY I BADANIA MODELOWE

### Historical and contemporary studies of Wrocław's climate – measurements and models

MARIUSZ SZYMANOWSKI\*<sup>1</sup> , ANETTA DRZENIECKA-OSIADACZ\*<sup>2</sup> ,  
TYMOTEUSZ SAWIŃSKI\*<sup>3</sup> , MACIEJ KRYZA\*<sup>4</sup> 

**Zarys treści.** W artykule przedstawiono rozwój i zakres badań dotyczących klimatu miasta i atmosfery miejskiej we Wrocławiu, prowadzonych przez pracowników Uniwersytetu Wrocławskiego, głównie Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery (ZKiOA). Opisano główne wątki badawcze realizowane w ośrodku, tj. badania cech mezoklimatu i bioklimatu, miejskiej warstwy granicznej oraz warunków aerosanitarnych Wrocławia. Szczególną uwagę zwrócono na dwie fazy rozwoju badań nad klimatem i atmosferą miasta w ośrodku: na przełomie XX/XXI w. i w drugiej dekadzie XXI w. Obie związane były z wprowadzeniem nowoczesnych technologii pomiarowych i unikalnej metodologii badawczej. W pierwszej fazie było to wprowadzenie automatycznych stacji meteorologicznych i platform mobilnych do pomiarów meteorologicznych i sondażu akustycznego atmosfery oraz zastosowanie technik GIS w modelowaniu i analizie struktury czasowo-przestrzennej elementów mezo- i bioklimatu Wrocławia. W drugiej fazie więcej uwagi poświęcono warunkom aerosanitarnym miasta, wprowadzono nowoczesne urządzenia do pomiarów zanieczyszczeń powietrza oraz rozwijano metody modelowania numerycznego (WRF, WRF-Chem). Dużo większy nacisk poświęcono także aplikacjom wyników badań (projekt LIFE-APIS/PL).

**Słowa kluczowe:** klimat miasta, miejska wyspa ciepła, miejska warstwa graniczna, zanieczyszczenia i jakość powietrza, Wrocław

**Abstract.** In this paper, we present the history and development of urban climate research in Wrocław, undertaken at the University of Wrocław (UWr), mainly at the Department of Climatology and Atmosphere Protection (DCAP). The main scientific topics, such as mesoclimate, bioclimate, urban heat island, and air quality in Wrocław are described. There were two milestones in urban climate research at UWr. First, the turn of the 21st century was associated with the introduction of automatic weather stations, mobile measurements and acoustic soundings, supported with GIS analysis, for the spatio-temporal studies of Wrocław (bio)climate. In the second decade of the 21st century, our research is mostly related to urban air quality. New measuring techniques have been introduced, supported with numerical models (WRF, WRF-Chem), and much greater attention has been devoted to scientific research applications (the LIFE-APIS/PL project).

**Key words:** urban climate, urban heat island, urban boundary layer, air pollution, air quality, Wrocław

### Wstęp

Historia obserwacji i pomiarów meteorologicznych sięga we Wrocławiu XVII w. Systematyczne instrumentalne pomiary rozpoczęto w 1791 r. (Pyka 2003) i choć prowadzone były one w centralnej części miasta (wieża gmachu głównego Uniwersytetu Wrocławskiego), to oczywiście trudno w tym przypadku mówić o celowo ustanowionym programie badań klimatu miasta. Zwłaszcza, że w owym czasie nie było równoległe prowadzonych pomiarów poza miastem, czy w rejonach peryferyjnych Wrocławia.

Możliwość porównania warunków meteorologicznych w gęsto zabudowanym centrum i poza miastem pojawiła się w roku 1921, kiedy to uruchomione zostało obserwatorium meteorologiczne w podwrocławskiej wsi Krzyki, położonej w odległości kilku kilometrów w kierunku SSW od Uniwersytetu. Systematyczne pomiary na Uniwersytecie zostały jednak zakończone w roku 1930, a obserwatorium z Krzyków przeniesiono w 1936 r. na lotnisko w Gądowie Małym (zachodnie peryferie miasta), gdzie obserwacje prowadzono (z przerwą w 1945 r.) do roku 1965. Wtedy to obserwatorium zostało przeniesione dalej na

\* Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, pl. Uniwersytecki 1, 50-137 Wrocław; e-mail: [mariusz.szymanowski@uwr.edu.pl](mailto:mariusz.szymanowski@uwr.edu.pl); <sup>1</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2556-3187>; <sup>2</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3876-9865>; <sup>3</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4990-193X>; <sup>4</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0873-7560>

WSW od centrum w pobliże lotniska na Strachowicach, gdzie pomiary prowadzone są do dziś.

W okresie powojennym zostały założone także dwa obserwatoria związane z uczelniami Wrocławia. Obserwatorium Meteorologiczne Uniwersytetu Wrocławskiego powstało w 1946 r. z inicjatywy Aleksandra Kosiby i jest zlokalizowane we wschodniej części miasta (osiedle Biskupin). Obserwatorium Agrometeorologiczne na Swojczytach, należące do obecnego Uniwersytetu Przyrodniczego, funkcjonuje od 1961 r. (Pyka 2003).

Pierwszy kompleksowy projekt, który w pewnej mierze można zaklasyfikować jako badania klimatu miasta, rozpoczęto we Wrocławiu w 1971 r. Był on realizowany przez pracowników Instytutu Geograficznego Uniwersytetu Wrocławskiego, a w jego ramach ustanowiono sieć 20 posterunków pomiarów topoklimatycznych w mieście i jego otoczeniu. Projekt trwał 3 lata, a wynikiem było m.in. opracowanie 8 map klimatologicznych w skali 1:50 000 (Pyka 2003). Później materiał ten posłużył jako jedno ze źródeł do opracowania serii map regionalnych w skalach 1:1 500 000 i 1:2 000 000, zamieszczonych w Atlasie Śląska Dolnego i Opolskiego (1997).

Od początkowych lat działalności Obserwatorium Meteorologicznego Uniwersytetu Wrocławskiego prowadzono w nim, oprócz standardowych pomiarów i obserwacji meteorologicznych, także pomiary aktynometryczne, a uzyskane wyniki analizowano między innymi pod kątem wpływu zanieczyszczeń atmosferycznych na wielkość promieniowania. Pionierskie badania, obejmujące pomiary promieniowania słonecznego w różnych zakresach widma, prowadzono nie tylko na terenie Wrocławia, ale i na Górnym Śląsku (Dubicka, Pyka 2005).

Ostatnie dwie dekady XX w. przyniosły w ośrodku wrocławskim aktywizację działań w zakresie szczegółowego poznania cech klimatu Wrocławia. Obejmowały one wiele wątków tematycznych, które koncentrowały się na:

1. rozpoznaniu struktury przestrzenno-czasowej elementów klimatu i bioklimatu Wrocławia oraz ich zależności od czynników urbanistycznych i pogodowych,
2. badaniach struktury miejskiej warstwy granicznej (*urban boundary layer* – UBL) oraz jej wpływu na inne elementy klimatu i warunki arosanitarne miasta,
3. ocenie jakości powietrza w mieście, badaniach zależności stężeń zanieczyszczeń od warunków urbanistycznych i meteorologicznych oraz modelowaniu zanieczyszczeń atmosfery. Ostatni z aspektów obejmuje także tworzenie

systemów prognostycznych jakości powietrza oraz prognozę warunków meteorologicznych i biometeorologicznych.

## Badania mezoklimatu Wrocławia

Badania mezoklimatyczne prowadzone na Uniwersytecie Wrocławskim od lat 90. XX w. zorientowane były głównie na podstawowe elementy klimatu: temperaturę powietrza, na podstawie której badano zjawisko miejskiej wyspy ciepła (*urban heat island* – UHI), oraz wilgotność powietrza i warunki bioklimatyczne. Pierwsze prace omawiały kształtowanie się warunków klimatu Wrocławia w zależności od dynamiki atmosfery. Kompleksowe opracowanie Marii Dubickiej (1994) było jednym z pierwszych w Polsce wykazującym rolę cyrkulacji atmosfery i warunków synoptycznych w kształtowaniu się cech klimatu miasta. Wyniki analiz potwierdziły wiodącą dla rozwoju UHI o dużej intensywności rolę antycyklonalnych typów cyrkulacji atmosfery, zwłaszcza układów wyżowych centralnych lub wyżowych z adwekcją masy z sektora zachodniego (wyż nad Europą Zachodnią lub Atlantykem, sięgający klinem nad Polskę) oraz południowo-zachodniego i południowego (wyż z centrum nad Karpatami) (Dubicka 1994).

W pełni nowoczesny program badań klimatu lokalnego został zainicjowany przez Marię Dubicką w roku 1997, kiedy to rozpoczęto kompleksowe, systematyczne pomiary. Prowadzono je za pomocą 5 automatycznych stacji meteorologicznych (fot. 1), uzupełnionych o pomiary patrolowe za pomocą stacji mobilnej – samochodu wyposażonego w aparaturę do psychrometrycznego pomiaru temperatury i wilgotności powietrza (fot. 2a). Po trzech latach działania system stacjonarny został przeorganizowany do pracy z wyższą rozdzielczością czasową – 1 minuty (pierwotnie 1 godzina) i uzupełniony o drugi zestaw mobilny (fot. 2b), z możliwością powtarzania pomiaru na poziomie kilkusekundowym (Drzeniecka i in. 2003). W ramach programu zrealizowano szereg prac badawczych, których wyniki opublikowano w artykułach naukowych (Dubicka, Szymanowski 2000; Dubicka i in. 2003; Szymanowski 2003b) i pracach doktorskich, podejmujących zagadnienia klimatu Wrocławia, w tym: warunków termicznych (Szymanowski 2003a, 2004), wilgotnościowych (Rosiński 2005) i bioklimatycznych (Sikora 2005, 2008).



Fot. 1. Automatyczna stacja meteorologiczna Campbell Scientific Inc. w zabudowie blokowej na wrocławskim osiedlu Gaj (Szymanowski 2004)

Automatic meteorological station Campbell Scientific Inc. in high-rise development, Gaj district, Wrocław (Szymanowski 2004)



Fot. 2. Mobilne stacje meteorologiczne wykorzystywane w pomiarach miejskich: Tarpan Honker (a) i Renault Kangoo (b) z zainstalowanymi na przodzie urządzeniami do pomiaru temperatury i wilgotności powietrza, samochód elektryczny Nissan eNV 200 (c) z zainstalowaną na dachu głowicą do pomiarów jakości powietrza (archiwum ZKiOA)

Mobile meteorological stations used in surveys in urban areas: Tarpan Honker (a) and Renault Kangoo (b) with air temperature and humidity measuring devices installed in front, Nissan eNV 200 electric car (c) with a roof mounted air quality measurements head (DCAP archive)

Całościową charakterystykę warunków termicznych Wrocławia zaprezentowano w monografii miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu (Szymanowski 2004). Było to jedno z pierwszych kompleksowych opracowań opisujących to zjawisko w Polsce i Europie. Korzystając ze stacjonarnych i mobilnych pomiarów temperatury powietrza, uzupełnionych o szczegółową analizę innych elementów meteorologicznych (m.in. zachmurzenia, warunków anemologicznych, struktury UBL) i synoptycznych, dokonano analizy uwarunkowań UHI i jej ogólnej charakterystyki, której zwieńczeniem było opracowanie statystycznych modeli pola miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu.

Wrocławską UHI można zaliczyć do zjawisk o cechach typowych pod względem natężenia, częstości oraz struktury czasowej i przestrzennej dla dużych ośrodków miejskich umiarkowanych szerokości geograficznych (Szymanowski 2004). W oparciu o pomiary stacjonarne stwierdzono, że średnie roczne natężenie UHI w centrum Wrocławia wynosi 1,0 K. W przebiegu rocznym największa średnia intensywność UHI obserwowana jest w lecie (2,4 K) i wiosną (2,2 K), a najmniejsza zimą (1,2 K). Maksymalne wartości natężenia wyspy ciepła sięgają 9,0 K, jednak pomiary patrolowe wskazują, że różnicowanie temperatury w granicach miasta może być większe i przekraczać nawet 10,0 K. W odróżnieniu od wielkości średnich, maksymalnie wykształcona UHI nie jest zależna od cyklu rocznego i może wystąpić praktycznie w każdej porze roku, mimo iż silna UHI ( $> 3,0$  K) obserwowana jest w lecie pięciokrotnie częściej niż w zimie. W cyklu dobowym największe natężenie zjawiska występuje nocą, kiedy 2–3-krotnie, a w lecie nawet 4–5-krotnie, przewyższa intensywność wyspy ciepła obserwowaną w dzień. W porze dziennej UHI osiąga maksymalnie 5,0–6,0 K i to praktycznie jedynie tuż przed zachodem, albo tuż po wschodzie Słońca. W dzień nadwyżka ciepła w obszarach zabudowanych jest obserwowana częściej w zimie niż w pozostałych porach roku, co świadczy o istotnej roli, jaką odgrywa emisja ciepła sztucznego w sezonie grzewczym w kształtowaniu termicznego środowiska miasta. Tak zwane jeziora chłodu, czyli sytuacje, w których obszar zabudowany jest chłodniejszy od niezabudowanego, pojawiają się w 12% godzin w roku i w ekstremalnych przypadkach sięgają  $-6,0$  K. Za główną przyczynę występowania jeziora chłodu w ciągu dnia uznaje się wolniejsze tempo radiacyjnego nagrzewania obszarów zabudowanych, typowe zwłaszcza do południa, przy niskim położeniu Słońca (Szymanowski 2004).

Warunki pogodowe ściśle determinują intensywność i przebieg zjawiska UHI. Do elementów meteorologicznych wywierających najsilniejszy wpływ na zjawisko miejskiej wyspy ciepła należy zaliczyć: prędkość wiatru oraz stopień zachmurzenia. Wzrost prędkości wiatru powyżej  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  w nocy i  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  w dzień, bez względu na stopień zachmurzenia, powoduje zanik lub znaczną redukcję intensywności wyspy ciepła. Wpływ stopnia zachmurzenia ogólnego i zachmurzenia w piętrze dolnym jest praktycznie niezauważalny w dzień, a w nocy dopiero wzrost stopnia zachmurzenia powyżej 6/8 stopnia odzwierciedla się w istotnym zmniejszeniu intensywności UHI. Zarówno w odniesieniu do wiatru, jak i zachmurzenia wyraźnie zaznacza się ich rola sezonowa. Najsilniejsze oddziaływanie tych elementów obserwowane jest w sezonie letnim, a najsłabsze w sezonie zimowym (Szymanowski 2004).

W czasie tzw. pogody radiacyjnej, kształtowanej w warunkach słabo zachmurzonego nieba i małej prędkości wiatru, zwłaszcza nocą, dochodzi do wykształcenia się klasycznej, radiacyjnej wyspy ciepła. Wtedy najczęściej są obserwowane największe intensywności zjawiska, z maksimum około 3 godziny po zachodzie lub około wschodu Słońca. Wyspa ciepła we Wrocławiu jest także obserwowana podczas nietypowych z tego punktu widzenia warunków pogodowych, zwłaszcza przy dużym zachmurzeniu. Sytuacja taka szczególnie wyraźnie zaznacza się w sezonie grzewczym, nawet w ciągu dnia. Obserwowane wtedy różnicowanie termiczne na obszarze miasta nie jest znaczące i sięga 1,0–1,5 K, a jego zasadniczą przyczyną jest emisja ciepła sztucznego w procesach komunalnych, przemysłowych i transportowych. Oprócz zachmurzenia, czynnikiem najsilniej wpływającym limitująco na natężenie UHI jest wzrost prędkości wiatru. W takich sytuacjach nadwyżka ciepła obszarów zurbanizowanych jest usuwana na drodze wymiany turbulencyjnej, co prowadzi do redukcji kontrastów termicznych, a przy dalszym wzroście prędkości do całkowitego zaniku wyspy ciepła. Specyficzny typ dużego różnicowania temperatury w obrębie miasta kształtuje się jednak nawet podczas silnego wiatru, gdy ma to związek z adwekcją świeżej masy powietrza. Wyraźny kontrast termiczny pomiędzy różnymi obszarami miasta jest obserwowany zwłaszcza w przypadku adwekcji chłodnej masy powietrza. Ten typ wyspy ciepła (rozumianej wprost jako różnica temperatury obserwowanej w mieście i poza nim) może, ale nie musi być dodatkowo wspomagany oddziaływaniem miasta jako obszaru o zwiększonej szorstkości, czego rezultatem jest opóź-

nione usuwanie masy autochtonicznej (Szymanowski 2004, 2005).

Procesy decydujące o genezie wyspy ciepła znajdują swoje odbicie w strukturze przestrzennej i stopniu nawiązania UHI do układu urbanistyczno-architektonicznego miasta. W przypadku wyspy ciepła pochodzenia adwekcyjnego o krótkotrwałym, dynamicznym charakterze, o jej strukturze przestrzennej decydują głównie czynniki synoptyczno-meteorologiczne. Napływająca masa powietrza prowadzi na ogół do wykształcenia UHI o strukturze niekoncentrycznej, w następstwie przemieszczania się frontu atmosferycznego. Szczególnie czytelnie procesy te zaznaczają się w przypadku adwekcji chłodnej. W trakcie adwekcji o mniejszej dynamice może dojść do wytworzenia się krótkotrwałej struktury UHI o charakterze koncentrycznym, związanej z dłuższym zaleganiem pomiędzy zabudowaniami cieplejszego powietrza autochtonicznego. Struktura zróżnicowania termicznego kształtowana kontrastami temperatury mas powietrza może być dodatkowo modyfikowana w sposób nieregularny poprzez ochładzające oddziaływanie stref przelotnych opadów związanych z frontem atmosferycznym (Szymanowski 2004, 2005). Takie krótkotrwałe, ale intensywnością odpowiadające najsilniej zaznaczonym epizodom UHI o genezie radiacyjnej (do 9 K) epizody, stały się podstawą do rozważań nad definicją miejskiej wyspy ciepła oraz sposobami jej monitoringu (Szymanowski 2005).

Strukturę przestrzenną klasycznej, radiacyjnej wyspy ciepła determinują głównie czynniki urbanistyczne. We Wrocławiu wykształca się wtedy UHI o cechach wielokomórkowych, odzwierciedlając strukturę pokrycia terenu, z wyraźnym nawiązaniem do układu urbanistycznego. Rezultatem jest pole podwyższonej temperatury o koncentrycznym, ale nieregularnym kształcie, z wyraźnie zaznaczonymi lokalnymi ekstremami w postaci ognisk ciepła i jezior chłodu. Struktura przestrzenna UHI odzwierciedla w tym przypadku klasyczny, odwołujący się do geomorficznej reprezentacji wyspy, podział na strefy: klifu (*cliff*), płaskowyżu (*plateau*) i kulminacji – szczytu (*peak*) (Oke 1987). Obszar najwyższej temperatury (*peak*) we Wrocławiu związany jest ze zwartą zabudową śródmiejską centrum miasta. Dwudzielność tej strefy jest wywołana przerwą w ciągłości zabudowy wzdłuż koryta Odry. Strefy klifowe, czytelnie zaznaczone w przypadku lokalnych ognisk ciepła, w niektórych obszarach miasta nie odznaczają się silnym gradientem temperatury i przechodzą płynnie w strefę plateau (Szymanowski 2004; Szymanowski, Kryza 2009, 2012).

Analiza struktury przestrzennej wrocławskiej UHI była możliwa dzięki nowatorskiemu wówczas zastosowaniu empirycznego, regresyjnego modelowania pola UHI za pomocą narzędzi analizy przestrzennej w środowisku Systemów Informacji Geograficznej (GIS). Doskonalenie metodyki w tym zakresie i rozwój modeli deterministyczno-stochastycznych (kriging reszt regresji ważonej geograficznie) stanowił dość ważny wątek badawczy w ośrodku wrocławskim w ostatnich latach (m.in. Szymanowski, Kryza 2009, 2011, 2012).

Dalsze badania nad zróżnicowaniem termicznym miasta przeprowadzono w latach 2007–2009 w ramach grantu MNiSW nr N305 099 32/3408 pt. „Zróżnicowanie przestrzenne warstwy granicznej atmosfery na przykładzie Wrocławia i Krakowa” kierowanego przez Marię Dubicką. System pomiarowy został w tym projekcie rozszerzony o 4 dodatkowe rejestratory temperatury (Minikin firmy Environmental Measuring Systems), które umieszczono w osłonach antyradiacyjnych zamocowanych na słupach oświetleniowych. Pomiary i analiza zgromadzonych danych potwierdziła obserwowane wcześniej prawidłowości temperatury powietrza i zjawiska miejskiej wyspy ciepła. Ponieważ głównym celem projektu była analiza procesów zachodzących w warstwie granicznej za kluczowe źródło danych wejściowych do analizy uznano ciągłą przestrzennie, wysokorozdzielczą informację o temperaturze powierzchni czynnej. Pozyskano ją ze zobrażeń satelitarnych Landsat 7 ETM+, głównie w kanale podczerwieni termalnej. Wykorzystano w tym celu metodykę przedstawioną przez Sobrino i Raissouni’ego (2000) i rozwiniętą w dalszych pracach (Sobrino i in. 2004, 2008), a nieznacznie zmodyfikowaną dla terenów zurbanizowanych przez Stathopoulou i in. (2004). Pozwoliło to dla wybranych, bezchmurnych scen satelitarnych obliczyć temperaturę powierzchni w dowolnym punkcie pola, z rozdzielczością przestrzenną 60 m. Estymowana temperatura odniesiona do klas pokrycia terenu z bazy CORINE Land Cover 2000, pozwoliła na kompleksową charakterystykę zróżnicowania termiki powierzchni. Jeśli chodzi o wielkości średnie najcieplejsze były klasy: zabudowy zwartej, terenów przemysłowych i handlowych, terenów komunikacyjnych oraz zabudowy luźnej, a najchłodniejsze: lasów, wód powierzchniowych oraz łąk i pastwisk. Lasy odznaczały się także najmniejszą zmiennością temperatury. Małą zmiennością, ale w obrębie wysokich wartości temperatury, charakteryzowała się zabudowa zwarta centrum miasta. Z kolei największą zmiennością odznaczały się

grunty orne. Wynikało to w dużej mierze ze zróżnicowania upraw, a więc niejednorodnego stopnia pokrycia pól przez rośliny, które znajdowały się w różnych fazach rozwoju.

Prace nad polem temperatury powierzchni czynnej i tzw. powierzchniową miejską wyspą ciepła (*surface urban heat island* – SUHI) były kontynuowane w kolejnych latach przez Mariusza Szymanowskiego we współpracy z zespołem Uniwersytetu Jagiellońskiego (Anita Bokwa, Jakub Walawender) i Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (Monika Hajto) i znalazły zwieńczenie w publikacji dotyczącej Krakowa (Walawender i in. 2014). Współpraca w tym samym zespole dotyczyła także roli rzeźby w kształtowaniu warunków termicznych Krakowa (Bokwa i in. 2015).

Kompleksowego opracowania warunków wilgotnościowych na terenie Wrocławia dokonał i przedstawił w rozprawie doktorskiej Dariusz Rosiński (2005). Posługując się analogicznymi metodami pomiarowymi, do tych, które zastosowano przy badaniu miejskiej wyspy ciepła (pomiarystationarne i mobilne), zebrał dane umożliwiające szczegółową analizę wybranych parametrów wilgotności powietrza: wilgotności względnej, prężności pary wodnej i niedosytu wilgotności. Było to pionierskie opracowanie, gdyż zagadnieniom wilgotności obszarów zurbanizowanych poświęcano do tamtej pory w badaniach i literaturze naukowej zdecydowanie mniej uwagi niż termice. Przeprowadzone badania wykazały, że podobnie jak w przypadku temperatury powietrza, z którą parametry wilgotności są silnie skorelowane, to warunki pogodowe i urbanistyczne mają zasadniczy wpływ na kształtowanie się wielkości różnic wilgotności i jej swoistości w przebiegu dobowym i rocznym.

Obecność, a w dużej części miasta dominacja, nieprzepuszczalnych powierzchni sztucznych, poprzez modyfikację procesów parowania i kondensacji, a także odprowadzanie wody do systemów kanalizacji oraz obecność antropogenicznych źródeł pary wodnej w istotny sposób modyfikują bilans wodny miasta. Efektem tego jest powstawanie różnic wilgotności i kształtowanie charakterystycznego cyklu rocznego i dobowego. Analiza częstości występowania różnic parametrów wilgotnościowych pomiędzy obszarem miejskim i pozamiejskim wykazała, że analogicznie do występowania miejskiej wyspy ciepła, atmosfera w terenach zurbanizowanych jest suchsza niż poza miastem (*urban moisture deficit* – UMD). Suchość miasta przejawia się częstym występowaniem ujemnych różnic wilgotności względnej, jednak przy dodatnich różnicach prężności pary wodnej i niedosytu wilgot-

ności. Ponadto stwierdzono, że prędkość wiatru jest główną determinantą zróżnicowania przestrzennego wilgotności powietrza. W dalszej kolejności dynamika wilgotności względnej zależy od zachmurzenia ogólnego i w piętrze niskim (Rosiński 2005).

Ustalenia te pozwoliły na opracowanie statystycznego modelu przestrzenno-czasowego zróżnicowania temperatury i wilgotności powietrza we Wrocławiu oraz jego weryfikację. Model powstał na bazie założeń dotyczących zmienności czasowej różnic i amplitud różnic temperatury i wilgotności powietrza, będących funkcją zmienności rocznej i dobowej tych elementów, modyfikowanej aktualnymi warunkami pogodowymi. Utworzony model pozwalał na estymację parametrów termicznych i wilgotnościowych dla dowolnego momentu i punktu miasta na podstawie informacji o zachmurzeniu i prędkości wiatru z poprzedzających trzech godzin oraz wartości temperatury termometrów suchego i zwilżonego w stacji tła pozamiejskiego. Model dał podstawę do szczegółowej analizy pola wilgotności, opisanego różnymi parametrami, w nawiązaniu do zjawiska UHI, struktury urbanistycznej miasta, jak i panujących warunków pogodowych (Rosiński 2005).

Spośród badań dotyczących innych elementów mezoklimatu Wrocławia na przywołanie zasługuje także opracowanie dotyczące pewnego aspektu warunków anemologicznych, których zróżnicowanie jest w mieście w przeważającej mierze warunkowane przez zabudowę. Takim zadaniem badawczym, zrealizowanym dla Wrocławia było wyznaczenie parametrów aerodynamicznych miasta, a na tej podstawie – korytarzy przewietrzania Wrocławia (Suder, Szymanowski 2014).

Właściwości aerodynamiczne zabudowy, która modyfikuje pole wiatru na ogół w znacznie większym stopniu niż tereny niezurbanizowane, determinują wiele procesów i zjawisk klimatu miejskiego, w tym i te związane z dyspersją zanieczyszczeń. W przywołanym artykule, parametry aerodynamiczne – przesunięcie płaszczyzny zerowej (*zero-plane displacement*) i współczynnik szorstkości (*roughness length*) – zostały obliczone na podstawie bazy danych wektorowych budynków z przypisaną wysokością na podstawie skanowania LiDAR. Posługując się metodami analizy przestrzennej wyznaczono powierzchnie frontalne budynków dla 8 podstawowych kierunków wiatru, co pozwoliło na obliczenie parametrów aerodynamicznych dla tych kierunków. Następnie, bazując na regułach wskazanych wcześniej przez Gála i Ungera (2009), zaproponowano i wdrożono komple-

ksową procedurę wyznaczania kanałów wentylacyjnych w obszarze miejskim na przykładzie Wrocławia. Umożliwiło to określenie potencjalnych dróg wentylacyjnych w mieście, które mogą formować przy danym kierunku wiatru główne kanały przewietrzania. Układ urbanistyczny i kształtowanie zabudowy w takich kanałach powinno być szczególnie uważnie rozpatrywane w procesach planistycznych i inwestycyjnych ze względu na potrzebę kształtowania odpowiednich dla mieszkańców warunków arosanitarnych (Suder, Szymanowski 2014).

## Bioklimat

Szczegółowe rozpoznanie klimatu Wrocławia, będące efektem długoletnich prac badawczych prowadzonych w Zakładzie Meteorologii i Klimatologii (obecnie Zakład Klimatologii i Ochrony Atmosfery) UWr (Dubicka, Szymanowski 2000; Dubicka i in. 2003; Dubicka, Sikora 2003; Sikora 2003; Szymanowski 2004; Rosiński 2005), jak również zdobyte w trakcie tych prac doświadczenia metodyczne w zakresie klimatologii miejskiej (Drzeniecka i in. 2003; Szymanowski 2004) pozwoliło na podjęcie próby rozpoznania czasowych i przestrzennych uwarunkowań bioklimatu stolicy Dolnego Śląska. Badania te zainicjowała Maria Dubicka, a kontynuował je w pierwszym dziesięcioleciu XXI w. Sebastian Sikora, w ramach przygotowywania swojej rozprawy doktorskiej (Sikora 2005). Efektem tych prac jest wydana w roku 2008 monografia pt. „Bioklimat Wrocławia” (Sikora 2008).

W badaniach tych wykorzystano dobrze ugruntowaną metodykę pomiarów, opartą o sieć automatycznych stacji pomiarowych, na stanowiskach reprezentujących typy pokrycia terenu najbardziej charakterystycznych dla przestrzeni miejskiej (zabudowy niskiej i rozproszonej, wielopiętrowej zabudowy blokowej, zwartej zabudowy mieszkaniowej i usługowej centrum miasta oraz niezabudowanych obszarów podmiejskich). Stanowiska te zlokalizowane były w tych samych punktach, co stanowiska wykorzystywane we wcześniejszych badaniach nad miejską wyspą ciepła i przestrzennym zróżnicowaniem wilgotności powietrza we Wrocławiu (Szymanowski 2004; Rosiński 2005). Szerokie spektrum parametrów meteorologicznych mierzonych na tych stacjach (temperatura i wilgotność powietrza, prędkość i kierunek wiatru, promieniowanie całkowite) pozwoliło na wykonanie

analiz bioklimatycznych, opartych o kompleksowe wskaźniki biometeorologiczne, przede wszystkim takie jak: wskaźnik temperatury odczuwalnej (*sensible temperature index* – STI), wskaźnik ochładzania wiatrem (*wind chill index* – WCI), wskaźnik stresu cieplnego (*heat stress index* – HSI), uwzględniające sumaryczny wpływ całego zespołu bodźców meteorologicznych na klimat odczuwalny. Analizie poddano również wpływ tych bodźców na składowe bilansu cieplnego ciała człowieka (konwekcyjna, ewapotranspiracyjna, respiracyjna i radiacyjna wymiana ciepła między człowiekiem a otoczeniem) w różnych typach pokrycia terenu. Tłem dla tych analiz była generalna charakterystyka bioklimatu Wrocławia, wykonana w oparciu o te same wskaźniki, z wykorzystaniem danych klimatologicznych z lat 1981–2000, zgromadzonych w Obserwatorium Meteorologicznym UWr. Ponadto, w oparciu o te dane dokonano biotermiczno-meteorologicznej klasyfikacji pogody we Wrocławiu, zgodnie z metodyką opracowaną w 2002 r. przez Krzysztofa Błażejczyka dla Warszawy (Błażejczyk 2002).

Uzupełnieniem rezultatów pomiarów stacjonarnych, były pomiary mobilne, prowadzone na obszarze Wrocławia. Ich metodyka została zmodyfikowana w stosunku do wykorzystywanej wcześniej, w ramach badań nad miejską wyspą ciepła i zróżnicowaniem wilgotnościowym miasta. O ile wcześniejsze pomiary wykonywane były przede wszystkim w godzinach nocnych, pomiary na potrzeby badań bioklimatycznych wykonywano w godzinach okołopołudniowych (10–11 UTC), zgodnie z obowiązującymi w biometeorologii standardami. Skrócono również trasę przejazdu, ograniczając ją do transektu o długości 16–17 km, przecinającego Wrocław z północy na południe. Zabieg ten spowodował skrócenie czasu przejazdu i ograniczenie wpływu zmienności parametrów meteorologicznych związanych z ich dobową rytmiką, przy jednoczesnym zachowaniu informacji o zmianach związanych z wpływem różnych typów pokrycia terenu. Ze względu na ówczesne ograniczenia techniczne pomiarów mobilnych (wyłącznie pomiar psychrometryczny), wykonywano je w warunkach pogody bezchmurnej, zakładając jednolity dopływ promieniowania słonecznego na obszarze całego miasta. Niezbędne do kalkulacji kompleksowych wskaźników biometeorologicznych dane o prędkości wiatru na trasie transektu uzyskano w oparciu o dane z pomiarów stacjonarnych. Dane te modyfikowano przy użyciu współczynników korekcyjnych wykorzystują-

cych informacje o szorstkości podłoża dla danego obszaru i wyliczonych na podstawie cyfrowego modelu pokrycia terenu dla obszaru Wrocławia (Szymanowski 2004), uzyskując w ten sposób przestrzenny rozkład pola prędkości wiatru. W oparciu o tak pozyskany zestaw danych wyliczane były wskaźniki STI, HSI oraz maksymalny czas przebywania (*maximum time of exposition* – MTE), stanowiący pochodną salda bilansu cieplnego ciała człowieka w różnych warunkach biometeorologicznych (Błażejczyk 2004).

Rozwój badań nad metodami numerycznego modelowania warunków meteorologicznych oraz doświadczenia zdobyte w badaniach nad bioklimatem Wrocławia pozwoliły włączyć problematykę bioklimatologiczną w zakres aplikacyjnych projektów realizowanych w Zakładzie Klimatologii i Ochrony Atmosfery UW. Kamieniem milowym było tu operacyjne uruchomienie prognoz meteorologicznych o dużej rozdzielczości czasowej i przestrzennej, przygotowywanych za pomocą modelu WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) i uwzględniających nie tylko uwarunkowania synoptyczne, ale również wpływ pokrycia i ukształtowania terenu. Szeroki zakres modelowanych parametrów obejmujący kluczowe w bioklimatologii informacje o termice powietrza i gruntu, warunkach wilgotnościowych, prędkości i kierunku wiatru oraz warunkach radiacyjnych, z uwzględnieniem wpływu zachmurzenia, pozwolił na uzyskanie prognoz warunków biometeorologicznych, opartych o wcześniej wykorzystywane wskaźniki kompleksowe, takie jak HSI, WCT (*wind chill temperature* – temperatura ochładzania wiatrem) oraz nowy, uniwersalny wskaźnik odczuć cieplnych UTCI (*universal thermal climate index*). Mimo że model WRF pracuje obecnie w rozdzielczości przestrzennej 4 km x 4 km, przeprowadzone analizy pokazują, że rozdzielczość ta zapewnia informacje umożliwiające podstawową ocenę zróżnicowania warunków biometeorologicznych na obszarze dużych miast (Ojrzyńska i in. 2015).

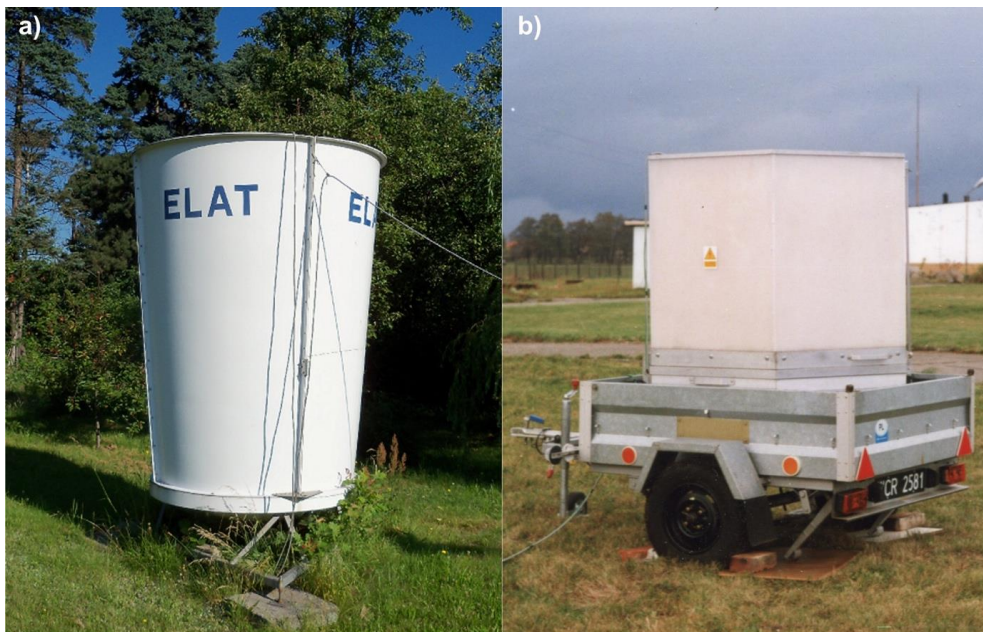
## Warstwa graniczna

Warstwa graniczna atmosfery (*planetary* lub *atmospheric boundary layer* – PBL, ABL) jest najniższą częścią atmosfery, sięgającą w naszych szerokościach geograficznych do wysokości około 2000–2500 m n.p.g. (Stull 1988). Mimo relatywnie niewielkiej miąższości jest najważniejszą częścią atmosfery, stanowiąc drogę wymiany strumieni pędu, ciepła i wilgoci ze swobodną atmosferą, a przez to wpływając na procesy pogodowe.

Ponadto jest to główny obszar aktywności ludzi, a przede wszystkim miejsce emisji zanieczyszczeń powietrza. W ciągu ostatnich 20–30 lat atmosferyczna warstwa graniczna nad miastem (UBL) stała się przedmiotem zainteresowania naukowców, przede wszystkim właśnie z powodu jej znaczenia w modelowaniu jakości powietrza. UBL jest skomplikowaną trójwymiarową strukturą, co sprawia ołbrzymie trudności w jej kompleksowym opisie i interpretacji danych pomiarowych, a także we właściwej parametryzacji z wykorzystaniem modeli matematycznych. Metody pomiarowe UBL obejmują zarówno pomiary *in situ* z wykorzystaniem masztów meteorologicznych, balonów, samolotów oraz pomiary teledetekcyjne, m.in. lidarowe i sodarowe. W roku 1984 w ówczesnym Zakładzie Meteorologii i Klimatologii powstało drugie w Polsce (pierwszym był nieistniejący już Zakład Teledetekcji atmosfery IMGW w Krakowie) stanowisko akustycznego monitoringu atmosfery. Od tego czasu pomiary sodarowe prowadzone są w sposób ciągły. Początkowo urządzenie pozwalało śledzić przebieg warunków termicznych UBL do wysokości ok. 600 m n.p.g. (Pyka 1988), a po wymianie na nowszy typ – do 1000 m n.p.g. Po przejściu na cyfrowy system rejestracji możliwy stał się pomiar pionowej składowej prędkości ruchu powietrza. Na przestrzeni lat sprzęt podlegał rozbudowie i licznym modernizacjom. Najważniejszym etapem był zakup sodaru mobilnego, natomiast w pomiarach stacjonarnych przejście z wersji jednoantenowej do trójantenowej (fot. 3). W chwili obecnej w Obserwatorium Meteorologicznym UW działają trójmonostatyczny sodar dopplerowski, mobilny minisodar dopplerowski oraz sodar bistatyczny (tab. 1).

Podstawowym parametrem, jaki uzyskuje się dzięki sondażowi sodarowemu, jest siła echa zapisana w funkcji wysokości i czasu. Natomiast główny problem w opracowywaniu danych o strukturze warstwy granicznej uzyskanych na drodze sondażu akustycznego polega na powiązaniu informacji o rozproszonym wstecznie dźwięku z podstawowymi stanami ABL. Najpopularniejszą metodą jest analiza cech morfologicznych zapisu echa sodarowego, tzw. sodarogramu, i powiązanie ich z określonymi procesami zachodzącymi w warstwie granicznej. Poza możliwością wydzielenia okresów o określonym typie równowagi, oceną zasięgu inwersji oraz intensywności konwekcji, sodar dostarcza również informacji o gradiencie temperatury wyrażonym parametrem struktury  $C_T^2$ , a w przypadku sodaru dopplerowskiego – także prędkości wiatru (tab. 1).





Fot. 3. Główna, pionowa antena SODAR-u 3d zainstalowanego na terenie Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery UWr (a) oraz SODAR mobilny na stanowisku pomiarowym podczas pomiarów terenowych (b) (archiwum ZKiOA)

Main, vertical antenna of 3d SODAR installed in the Observatory of the UWr Department of Climatology and Atmospheric Protection (a) and mobile SODAR during field survey (b) (DCAP archive)

Tabela 1

Charakterystyka sodarów pracujących w Zakładzie Klimatologii i Ochrony Atmosfery

Characteristics of SODARs used for measurements in the Department of Climatology and Atmosphere Protection

	Trójmonostatyczny sodar dopplerowski <i>Three-antennas doppler SODAR</i>	Minisodar mobilny <i>Mobile doppler MiniSODAR</i>	Sodar bistatyczny <i>Bistatic doppler SODAR</i>
Zasięg <i>Range</i>	1000 m n.p.g. <i>1000 m a.g.l.</i>	350 m n.p.g. <i>350 m a.g.l.</i>	500 m n.p.g. <i>500 m a.g.l.</i>
Częstotliwość generowanego sygnału <i>Acoustic signal frequency</i>	2000 Hz	4000 Hz	3500–4200 Hz
Rozdzielczość pionowa <i>Vertical resolution</i>	2 m (uśredniane do 10 m) <i>2 m (expressed as signal averaged over 10 meters)</i>	2 m	1 m
Rozdzielczość czasowa <i>Temporal resolution</i>	6 s	2 s	3 s
Mierzone wielkości <i>Measured parameters</i>	Siła echa, prędkość pionowa, prędkość i kierunek wiatru w poziomie <i>The intensity of the acoustic backscatter signal, vertical wind speed, horizontal wind speed and direction</i>	Siła echa, prędkość pionowa <i>The intensity of the acoustic backscatter signal, vertical wind speed</i>	Siła echa, prędkość pionowa <i>The intensity of the acoustic backscatter signal, vertical wind speed</i>

Do głównych zalet pomiarów teledetekcyjnych UBL z wykorzystaniem sondażu akustycznego należy zaliczyć możliwość ciągłego monitoringu dolnej części atmosfery, dużą rozdzielczość czasową i pionową oraz niewielką martwą strefę detekcji, nieprzekraczającą 30 m.

Badania sodarowe warstwy granicznej atmosfery realizowane w ZKiOA UW r obejmowały trzy główne zagadnienia: klimatologiczną zmienność miejskiej warstwy granicznej, zmienność czasową i przestrzenną zasięgu inwersji przygrunтовой oraz wpływ stanu warstwy granicznej na jakość powietrza. W ramach badań nad UBL zrealizowane zostały trzy prace doktorskie: Anetty Drzenieckiej (2005), w której podjęto problematykę struktury termicznej UBL we Wrocławiu i jej wpływu na koncentrację zanieczyszczeń powietrza, Jacka Ślopka (2008), podejmującą zagadnienie modelowania rozkładu energii w UBL Wrocławia i Pawła Netzela (2009), dotyczącą możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych w interpretacji obrazu sodarowego oraz w prognozowaniu stanu warstwy granicznej w oparciu o standardowe pomiary meteorologiczne. Wszystkie te osoby były także zaangażowane w realizację wspomnianego wcześniej grantu, kierowanego przez Marię Dubicką, w którym rozpoznano cechy warstwy granicznej Wrocławia i Krakowa.

Do głównych cech warstwy granicznej rejestrowanej nad Wrocławiem należy dominujący udział równowagi stałej. Inwersje temperatury rejestrowane są przeciętnie przez ponad 50% godzin w ciągu roku, przy czym największy ich udział przypada na chłodną porę roku (71% godzin), a minimum – latem (40% godzin). Przez około 36% godzin rejestrowane jest echo konwekcyjne (latem – 50%, zimą – 17% godzin), z czego w około 34% przypadków konwekcję ogranicza występująca na pewnej wysokości inwersja wzniesiona (Drzeniecka 2005).

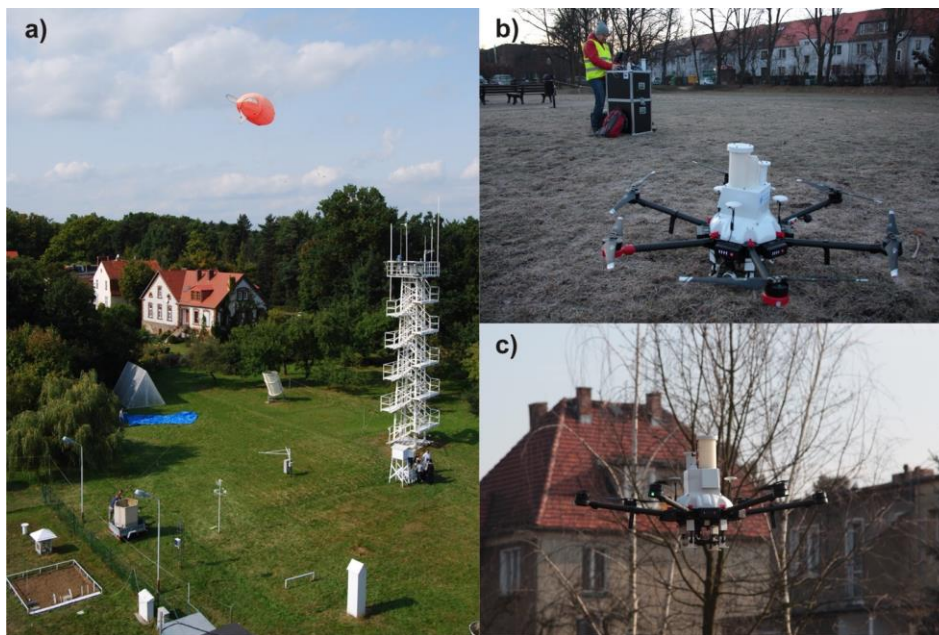
Uzupełnieniem pomiarów teledetekcyjnych były sondaże balonem na uwięzi (Drzeniecka i in. 2003), realizowane m.in. w ramach pracy doktorskiej Anetty Drzenieckiej (2005), które dostarczyły informacji o pionowej zmienności temperatury, wilgotności powietrza oraz prędkości wiatru (rys. 4a). Balon meteorologiczny wyposażony był w prototypową sondę umożliwiającą pomiar temperatury i wilgotności powietrza metodą psychrometryczną oraz pomiar prędkości wiatru. Zmierzone dane transmitowane były drogą radiową do odbiornika znajdującego się na Ziemi, a następnie przez kartę przekaźnikową do komputera pomiarowego, gdzie były zapisywane w interwale 25 ms. Uzyskane dane po usunięciu szumu (spowodowanego np. proble-

mami z transmisją) były uśredniane. W zależności od tempa wznoszenia uzyskiwano średnio od 1 do 4 pomiarów na 1 m wysokości.

Pomiary balonowe, mimo zalet, jakimi są duża rozdzielczość pionowa uzyskiwanych danych oraz możliwość wykonania wielu powtórzeń w bliskim odstępie czasu, mają pewne ograniczenia. Ich przeprowadzenie wymaga odpowiednich warunków pogodowych: prędkości wiatru nie przekraczającej  $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (optymalnie do  $2\text{--}3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) oraz niezbyt intensywnej konwekcji. Pomiary z wykorzystaniem balonu na uwięzi miały na celu weryfikację danych teledetekcyjnych oraz ocenę parametru  $C_T^2$  w oparciu o siłę echa. O ile w pierwszym przypadku zasięg inwersji oszacowany na podstawie badań sodarowych był zgodny z pomiarami bezpośrednimi, o tyle nie udało się uzyskać jednoznacznego związku pomiędzy siłą echa sodarowego a parametrem struktury  $C_T^2$  (Drzeniecka 2005).

Rozszerzeniem pomiarów profilowych było uruchomienie pomiarów temperatury na wieży meteorologicznej na wysokościach: 0 m, 0,5 m, 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 15 m n.p.g. Pomiary te pozwoliły na analizę zmienności gradientu temperatury w warstwie przygrunтовой, szybkości rozwoju inwersji i związku tych parametrów ze stężeniem pyłu zawieszonego. W przypadku stabilnych warunków wyżowych, z małą prędkością wiatru i brakiem zachmurzenia, gradient temperatury sięgał nawet  $-30 \div -50 \text{ K}/100 \text{ m}$  (Drzeniecka-Osiadacz i in. 2018).

Porównanie z pomiarami bezpośrednimi dało podstawę do szerszego wykorzystania pomiarów sodarowych, m.in. w analizie przestrzennej zmienności zasięgu inwersji oraz wykorzystaniu danych sodarowych w weryfikacji zasięgu warstwy mieszaniny uzyskanej w wyniku modelowania. Sondaż akustyczny z wykorzystaniem sodaru mobilnego prowadzony w różnych punktach Wrocławia wskazał na znaczne zróżnicowanie stanu równowagi termodynamicznej, wzrost chwiejności atmosfery na obszarach o zwartej zabudowie, a także, w określonych sytuacjach synoptycznych, zwiększanie się zasięgu inwersji w porównaniu do stacji bazowej zlokalizowanej w Obserwatorium Meteorologicznym UW r. Chwilowe różnice pomiędzy zasięgiem inwersji sięgają nawet 100% w stosunku do stacji bazowej w ZKiOA. Zmiany w strukturze miejskiej warstwy granicznej o równowadze stałej były podobne do układu przestrzennego UHI, uzależnione w znacznym stopniu od prędkości i kierunku wiatru (Netzel i in. 2011). Zgromadzony materiał badawczy dał również możliwość weryfikacji modeli matematycznych wykorzystywanych do wyznaczania zasięgu inwersji temperatury (Netzel i in. 2012).



Fot. 4. Urządzenia wykorzystywane do pomiarów *in situ* pionowej struktury atmosfery: meteorologiczny balon uwięziowy nad Obserwatorium Meteorologicznym ZKiOA (a) oraz bezzałogowy statek powietrzny (dron) z zainstalowaną głowicą do pomiarów jakości powietrza na stanowisku pomiarowym (b) i podczas lotu (c) (archiwum ZKiOA)

Equipment used for *in situ* measurements of the vertical structure of the atmosphere: tethered meteorological balloon over the ZKiOA Meteorological Observatory (a) and UAV (drone) with air quality measurement head at the measurement stand (b) and during the flight (c) (DCAP archive)

Mimo rozwoju metodyki pomiarowej w badaniach warstwy granicznej atmosfery ciągle nierozwiązanym problemem jest prawidłowa parametryzacja zasięgu warstwy mieszania w modelach meteorologicznych. Jak wskazują badania, różnice mogą sięgać nawet 100%, co w przypadku modelowania dyspersji zanieczyszczeń prowadzi do błędów w ocenie jakości powietrza (Hanna, Yang 2001; Holtslag i in. 2013; Bessagnet i in. 2016). Dane sodarowe zostały wykorzystane także do weryfikacji zasięgu warstwy mieszania w warunkach równowagi stałej wyznaczonej w oparciu o różne parametryzacje w modelu WRF (Kryza i in. 2015).

Rozszerzenie badań warstwy granicznej atmosfery nad miastem było możliwe dzięki zakupowi bezzałogowego statku powietrznego (*unmanned aerial vehicle* – UAV) – drona, przeznaczonego do monitoringu jakości powietrza (fot. 4b). Zakup został sfinansowany z dotacji celowej Urzędu Miasta Wrocławia. Wykorzystane urządzenie to heksakopter DJI Matrice 600 wyposażony w głowicę środowiskową, umożliwiającą pomiar temperatury i wilgotności powietrza metodą psychrometryczną oraz stężenia pyłu  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  i ozonu. Dane zapisywane są z rozdzielczością 1 s na wewnętrznej karcie i dodatkowo transmitowane do stacji na-

ziemnej. Pomiary z wykorzystaniem UAV wykonywane są w dwóch trybach: poziomym i pionowym. Zasięg przestrzenny lotów ograniczony jest przede wszystkim przepisami prawnymi związanymi z maksymalnym dopuszczalnym pułapem (ograniczenia związane ze strefami podejścia do lotniska Wrocław-Strachowice) oraz z wymogiem widoczności drona podczas całego lotu (przy zbyt niskim pułapie dron znika za przeszkodami terenowymi, co może istotnie ograniczyć efektywny zasięg pomiarów). Pomiary w transektach poziomych odbywają się z prędkością nie przekraczającą  $5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  i trwają przeciętnie od 15 do 30 minut (w zależności od długości trasy). Długotrwałość lotu ograniczona jest pojemnością baterii urządzenia. Pozwalają one na 40 minut lotu, przy czym misje planowane są tak, by lot nie trwał dłużej niż 30 minut, a 10 minut lotu stanowi rezerwa, zachowywana na wypadek konieczności sprawdzenia statku w sytuacji awaryjnej (np. silny przeciwny wiatr podczas drogi powrotnej i tym podobne).

Profile pionowe za pomocą UAV wykonywane są z prędkością  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , przy czym pomiarowo wykorzystywane są wyłącznie dane uzyskane podczas lotu wznoszącego – podczas opadania dron porusza się w masie powietrza silnie

zaburzonej i zmieszanej przez strumień podsmięgłowy, co powoduje niewiarygodność wyników uzyskanych w tych warunkach. Czas wykonania pojedynczego profilu (wzlot na pułap docelowy i powrót) nie przekracza 15 min. Pomiar UAV pozwalają prześledzić dynamikę zmian temperatury i wilgotności powietrza w profilu do 350–400 m n.p.g., zwłaszcza w okresach porannego i wieczornego przełomu oraz pozwalają ocenić zmienność temperatury powyżej poziomu dachów.

## Jakość powietrza

Jednym z niewątpliwie ważniejszych (z punktu widzenia użyteczności badań) nurtów w klimatologii miejskiej są badania dotyczące jakości powietrza. Zainteresowania naukowe problematyką zanieczyszczeń powietrza i wpływu na środowisko w Zakładzie Klimatologii i Ochrony Atmosfery mają swoją długą historię. Początkowo dotyczyły one przede wszystkim obszarów górskich, a od końca lat 90. XX w. duży nacisk został położony na badania jakości powietrza na obszarach miejskich. Również w tym przypadku analizowane zagadnienia dotyczą kilku obszarów, wzajemnie ze sobą powiązanych i obejmujących: ocenę czasowej zmienności stężeń zanieczyszczeń oraz wpływu warunków meteorologicznych na jakość powietrza, wykorzystanie pomiarów mobilnych w ocenie przestrzennego zróżnicowania stężenia pyłu i ozonu, modelowanie i prognozowanie emisji, dyspersji i depozycji zanieczyszczeń oraz wpływ zanieczyszczeń na zdrowie. Pomiar instrumentalny związane z jakością powietrza zostały zainaugurowane pomiarami pH opadu atmosferycznego, wykonywanymi w latach 1992–1999 w Obserwatorium Meteorologicznym UW r. W tym okresie odnotowano zarówno bardzo niskie wartości pH, jak i opad o odczynie zasadowym, a minimalne stężenie jonów wodorowych wynosiło  $10^{-3}$  mol·dm<sup>-3</sup> (zwłaszcza w pierwszej połowie lat 90. XX w.).

Mimo znaczącej poprawy jakości powietrza w skali całego kraju, w chwili obecnej we Wrocławiu nierozwiązanym problemem są ponadnormatywne stężenia pyłu zawieszonego PM<sub>10</sub> i PM<sub>2.5</sub> oraz benzo(α)pirenu, które przede wszystkim występują w sezonie zimowym, co związane jest z emisją ze źródeł komunalno-bytowych. Struktura przestrzenna tego rodzaju emisji oraz wielkość ładunku uzależniona jest od rodzaju i rozmieszczenia systemów grzewczych. Mimo złej jakości powietrza na terenie Wrocławia funkcjonują zaledwie 3 stacje automatyczne dostarczające

danych on-line o stężeniu pyłu zawieszonego, spełniających wysokiej jakości standardy pomiaru. Dwie z tych stacji funkcjonują w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (PMŚ), natomiast trzecia stacja należy do ZKiOA.

Z punktu widzenia dynamiki zmian stężenia analizowanych substancji rozdzielczość czasowa 1 godziny lub w niektórych przypadkach 24 godzin nie jest wystarczająca. Z tego powodu w 1999 r. został zakupiony pierwszy pyłomierz do pomiaru stężenia PM<sub>10</sub>. Pyłomierz TEOM 1400a produkcji Ruprecht&Pataschnick dzięki wykorzystaniu mikrowagi oscylacyjnej pozwala uzyskać wysoką rozdzielczość czasową pomiarów, a dane są zapisywane do bazy danych co 1 min. W następnych latach zakupiono cyklon separujący frakcję PM<sub>2.5</sub>. W chwili obecnej w Zakładzie Klimatologii i Ochrony Atmosfery działają trzy pyłomierze TEOM 1400a: pomiar PM<sub>10</sub> na wysokości 4 m, pomiar PM<sub>2.5</sub> oraz PM<sub>10</sub> na wysokości 15 m, dwa pyłomierze optyczne TSI, analizator ozonu MLU (fot. 5). Prowadzone analizy wskazują, że zmienność czasowa stężenia pyłu jest bardzo zbliżona we wszystkich punktach pomiarowych we Wrocławiu, jednak stężenia w centrum miasta są o około 20–30% wyższe niż w ZKiOA (Krynicka, Drzeniecka-Osiadacz 2013).

Wysoka rozdzielczość czasowa pomiarów stężenia pyłu pozwala na ocenę dynamiki w odniesieniu do warunków meteorologicznych: struktury ABL, prędkości i kierunku wiatru, intensywności i rodzaju opadu (Drzeniecka-Osiadacz, Sawiński 2012). Przede wszystkim jednak analizie podlegają sytuacje charakteryzujące się wysokimi stężeniami zanieczyszczeń, co w połączeniu z unikatowymi badaniami struktury warstw granicznej atmosfery daje szerokie możliwości interpretacji. Równocześnie prowadzone były też badania nad chemizmem osadów atmosferycznych: rosy i szrogu (Gałek i in. 2015).

Ze względu na zmienność przestrzenną źródeł emisji pyłu we Wrocławiu, trzy punkty automatycznego monitoringu wydają się niewystarczające. Aby wypełnić tę lukę w Zakładzie Klimatologii i Ochrony Atmosfery UW r. podjęto prace nad szczegółowym rozpoznaniem przestrzennego zróżnicowania stężeń zanieczyszczeń pyłowych na obszarze miasta. Podczas planowania badań zdecydowano się posłużyć metodą patrolową, polegającą na prowadzeniu pomiarów w ruchu, za pomocą urządzeń zainstalowanych na platformie samochodowej (fot. 2c). W przypadku pomiarów prowadzonych na obszarze Wrocławia wykorzystywany jest samochód elektryczny Nissan eNV200, na jego dachu instalowana jest czerpnia pyłomierza optycznego TSI,



Fot. 5. Czerpnie urządzeń do pomiarów jakości powietrza na platformie pomiarowej na dachu budynku Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery – od lewej: czerpnia czujnika do pomiarów stężenia ozonu oraz czerpnie pyłomierzy TEOM, do pomiaru stężeń  $PM_{2.5}$  i  $PM_{10}$  (archiwum ZKiOA)

Intakes of air quality measurement devices installed on a measuring platform on the roof of the Department of Climatology and Atmosphere Protection building – from the left: an intake of ozone concentration sensor and TEOM dust meter intakes for  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  measurements (DCAP archive)

która może być stosowana zamiennie z głowicą środowiskową z UAV. Uzupełnieniem jest pomiar podstawowych parametrów meteorologicznych. Zaletą takiego rozwiązania jest przede wszystkim możliwość uzyskania danych o dużej rozdzielczości przestrzennej, z obszaru znacznie wykraczającego poza obszar objęty standardowym monitorin- giem jakości powietrza. Pomiary tego typu sprawdzają się zwłaszcza tam, gdzie wskazana jest duża rozdzielczość przestrzenna danych, na przykład ze względu na zróżnicowanie badanego obszaru (rzeźbę terenu, pokrycie terenu czy układ urban- styczny), który istotnie wpływa na zmienność mier- zonych parametrów. Wykorzystywane są one np. w badaniach nad mikroklimatem i bioklimatem miast (Pinho, Manso Orgaz 2000; Brandsma, Wol- ters 2012). Stosowane są również w badaniach nad jakością powietrza, zwłaszcza w obszarach zurban- izowanych (np. Padró-Martínez i in. 2012; Deva- rakonda i in. 2013). Obecnie metodyka wykorzys-

tywana przede wszystkim w ocenie UHI została przystosowana do pomiarów jakości powietrza, zarówno w obszarach zurbanizowanych (Bilińska i in. 2017b), jak i podgórskich (Bilińska i in. 2017a). Badania te mają na celu: szczegółowe roz- poznanie zmienności pola pyłowych zanieczysz- czeń powietrza na obszarze Wrocławia w różnych warunkach pogodowych, wyznaczenie obszarów szczególnie narażonych na niekorzystne warunki aerosanitarne związane z wysokimi stężeniami za- nieczyszczeń pyłowych, weryfikację dostępnej bazy emisji zanieczyszczeń dla obszaru Wrocławia w oparciu o wyniki pomiarów *in situ*. Również pomiary z wykorzystaniem UAV zwiększyły możliwości oceny zmienności stężenia pyłu, za- równo w profilu pionowym, jak i w ujęciu prze- strzennym.

W ostatnich latach mocno rozwinęły się bada- nia związane z modelowaniem numerycznym pro- cesów meteorologicznych i jakości powietrza.

Głównym narzędziem badawczym jest model *Weather Research and Forecasting* (Skamarock i in. 2008) oraz jego rozszerzenie – WRF-Chem (Grell i in. 2005), pozwalające na zintegrowane modelowanie procesów meteorologicznych i chemicznych. Pierwsze prace dotyczyły m.in. porównania wyników modelowania meteorologicznego z pomiarami dla wysokości warstwy granicznej (Kryza i in. 2015) czy roli warunków początkowych w modelowaniu (Wałaszek i in. 2014). W zakresie modelowania jakości powietrza prace dotyczyły m.in. modelowania ozonu (Wałaszek i in. 2017) oraz prognozowania jakości powietrza, w tym pyłu zawieszonego (Werner i in. 2015). Najnowsze prace dotyczą modelowania transportu, stężeń oraz emisji pyłku roślin (bioalergenów) na terenie aglomeracji wrocławskiej (Skjøth i in. 2015; Bilińska i in. 2017c).

Początkowo prace wykorzystujące model mezoskalowy WRF dotyczyły przede wszystkim jego weryfikacji w oparciu o szerokie spektrum danych pomiarowych, gromadzonych w ramach badań prowadzonych w Zakładzie Klimatologii i Ochrony Atmosfery UWr. Wykazano m.in., że model WRF, oraz jego rozszerzenie pozwalające na modelowanie transportu zanieczyszczeń – WRF-Chem, w znacznym stopniu przeszacowuje wysokość warstwy granicznej. Ma to ważne konsekwencje dla dalszej aplikacji modelu w postaci np. niedoszacowywania przez model WRF-Chem obserwowanych stężeń zanieczyszczeń. Wykazano również dużą niepewność związaną z modelowaniem warunków anemologicznych na obszarze miasta (Kryza i in. 2015).

Ważnym krokiem w rozwoju badań związanych z aplikacją modeli WRF i WRF-Chem we Wrocławiu i SW Polsce był podjęty w roku 2013 projekt LIFE-APIS/PL „System prognoz stężeń zanieczyszczeń powietrza i warunków biometeorologicznych jako element oceny jakości życia”, finansowanego z funduszy unijnych (Instrument finansowy LIFE+) i współfinansowanego przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. W ramach tego projektu kontynuowano prace związane z aplikacją i weryfikacją modeli WRF oraz WRF-Chem. Podjęto się także budowy systemu prognoz meteorologicznych, biometeorologicznych i jakości powietrza (Werner i in. 2015). Od 2015 roku system działa operacyjnie, realizując raz na dobę zintegrowaną prognozę (warunki meteorologiczne i stężenia zanieczyszczeń) w siatce 4 km x 4 km. Na podstawie tych informacji wyliczane są kolejne wskaźniki: biometeorologiczne oraz jakości powietrza. Wyniki modelowania są dostępne poprzez geoportal Nasze

Powietrze ([powietrze.uni.wroc.pl](http://powietrze.uni.wroc.pl)), aplikację na smartfony czy tablice informacyjne, rozmieszczone w kilku miejscach we Wrocławiu (m.in.: Zakład Klimatologii i Ochrony Atmosfery UWr, Politechnika Wrocławska budynek D2, Urząd Miasta Wrocławia czy Gmach Główny Uniwersytetu Wrocławskiego – fot. 6).

Projekt LIFE-APIS/PL przygotował platformę pozwalającą na realizację dalszych prac związanych z modelowaniem jakości powietrza dla Wrocławia i Polski. Aktualnie realizowane są prace związane m.in. z prognozami kombinowanymi jakości powietrza oraz z asymilacją danych obserwacyjnych (m.in. pomiary punktowe oraz dane satelitarne) w modelach jakości powietrza. Realizowane są również badania mające na celu budowę systemu prognoz bioalergenów. O te nowe komponenty będzie systematycznie rozwijany geoportal, przygotowany w ramach LIFE-APIS/PL.

## Podsumowanie

Badania klimatu miasta i atmosfery miejskiej we Wrocławiu prowadzone są w usystematyzowany sposób przez pracowników Uniwersytetu Wrocławskiego od lat 70. XX w. Organizacja badań i dedykowane projekty naukowe w tym zakresie były i są obecnie realizowane głównie przez pracowników Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery UWr (dawniej: Zakładu Meteorologii i Klimatologii). Ich dynamiczny rozwój nastąpił w końcu XX w. i był spowodowany wprowadzeniem nowych technik badawczych (m.in. automatycznych stacji meteorologicznych do pomiarów mobilnych i *in situ*, miniaturyzacji i mobilności urządzeń do akustycznego sondażu atmosfery) i metodyki (np. zastosowania analiz przestrzennych w środowisku Systemów Informacji Geograficznej). Szczególne zasługi dla intensyfikacji badań klimatu miasta położyli profesorowie Zakładu: Maria Dubicka i Jerzy L. Pyka, dzięki którym doszło do rozwoju infrastruktury badawczej, zrealizowano szereg projektów badawczych i prac doktorskich, a wymiernym efektem były liczne publikacje w naukowych czasopismach krajowych i międzynarodowych. Badania w ośrodku wrocławskim podejmowały zarówno wątki tradycyjnie obecne w klimatologii miejskiej, jak miejska wyspa ciepła czy bioklimat miasta, jak i bardziej unikalne, np. badania miejskiej warstwy granicznej. Obszary badawcze, relatywnie rozpoznane, nabierały specyficznego kontekstu przez zastosowanie pionierskich, unikalnych metodologii, jak choćby wprowadzenie sondażu akustycznego UBL, sieci neuronowych czy modelowania determi-



Fot. 6. Po lewej interfejs geoportalu Nasze Powietrze – <http://powietrze.uni.wroc.pl>, po prawej interfejs aplikacji mobilnej NaszePowietrze (u góry) oraz zewnętrzna tablica informacyjna prezentująca wybrane prognozy jakości powietrza i warunków biometeorologicznych (na dole) (materiały Projektu LIFE-APIS/PL)

On the left, the interface of Nasze Powietrze geo-portal – <http://powietrze.uni.wroc.pl>, on the right the interface of the NaszaPowietrze mobile application (top) and an external information board presenting selected air quality and biometeorological forecasts (bottom) (materials of LIFE-APIS/PL Project)

nistycznie-stochastycznego i analizy przestrzenno-czasowej elementów klimatu w GIS.

Druga dekada XXI w. przyniosła w ośrodku wrocławskim kolejną intensyfikację badań, tym razem ukierunkowaną na warunki aerosanitarnie miasta i modelowanie numeryczne. Ponownie, niebagatelną rolę można przypisać wprowadzeniu nowych technologii pomiarowych, głównie związanych z zanieczyszczeniami powietrza (pyłomierze, UAV) oraz metod modelowania fizycznego (WRF, WRF-Chem). Charakterystyczną cechą aktywności naukowej, oprócz prowadzenia badań podstawowych, stało się rozwijanie wątków aplikacyjnych. Szczególną rolę należy tu przypisać projektowi LIFE-APIS/PL, dzięki któremu mieszkańcy Wrocławia i regionu otrzymali system prognostyczno-ostrzegawczy dotyczący warunków aerosanitarnych i bioklimatycznych, dostępny poprzez nowoczesne platformy informacyjne (geoportal, aplikacja mobilna, elektroniczne tablice informacyjne). Utrzymanie równowagi pomiędzy badaniami podstawowymi i apli-

kacjami, a w przyszłości komercjalizacją badań, jest celem na najbliższe lata działalności naukowej Uniwersytetu Wrocławskiego w zakresie klimatologii miast.

## Literatura

- Atlas Śląska Dolnego i Opolskiego. 1997. Pracownia Atlasu Dolnego Śląska, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- Bilińska D., Drzeniecka-Osiadacz A., Korzystka-Muskała M., Modzel P., Muskała P., Sawiński T. 2017a. Air quality in complex terrain on the example of Karpacz area (Karkonosze Mts., SW Poland). 2<sup>nd</sup> Symposium “Air Quality and Health” Book of Abstracts. Wrocław 12–14.06.2017. Institute of Geography and Regional Development, University of Wrocław, Wrocław: 20-21.
- Bilińska D., Drzeniecka-Osiadacz A., Korzystka-Muskała M., Modzel P., Muskała P., Sawiński T. 2017b. Pragmatics of mobile particulate matter measurements in urban and mountain areas – experiences from LIFE-APIS/PL project. 2<sup>nd</sup>

- Symposium "Air Quality and Health" Book of Abstracts. Wrocław 12–14.06.2017. Institute of Geography and Regional Development, University of Wrocław, Wrocław: 51-52.
- Bilińska D., Skjøth C.A., Werner M., Kryza M., Malkiewicz M., Krynicka J., Drzeniecka-Osiadacz A. 2017c. 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.
- Bessagnet B., Pirovano G., Mircea M., Cuvelier C., Aulinger A., Calori G., Ciarelli G., Manders A., Stern R., Tsyro S., Vivanco M.G., Thunis P., Pay M.-T., Colette A., Couvidat F., Meleux F., Rouil L., Ung A., Aksoyoglu S., Baldasano J.M., Bieser J., Briganti G., Cappelletti A., D'Isidoro M., Finardi S., Kranenburg R., Sili-bello C., Carnevale C., Aas W., Dupont J.-C., Fagerli H., Gonzalez L., Menut L., Prévôt A.S.H., Roberts P., White L. 2016. Presentation of the EURODELTA III intercomparison exercise-evaluation of the chemistry transport models' performance on criteria pollutants and joint analysis with meteorology. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16: 12667-12701.
- Błażejczyk K. 2002. Znaczenie czynników cyrkulacyjnych i lokalnych w kształtowaniu klimatu i bioklimatu aglomeracji warszawskiej. *Dokumentacja Geograficzna* 26: 1-160.
- Błażejczyk K. 2004. Bioklimatyczne uwarunkowania rekreacji i turystyki w Polsce. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN* 192: 1-291.
- 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: 365-382.
- Brandsma T., Wolters D. 2012. Measurements and Statistical Modeling of the Urban Heat Island of the City of Utrecht (the Netherlands). *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51, 6: 1046-1060.
- Devarakonda S., Sevusu P., Liu H., Liu R., Iftode L., Nath B. 2013. Real-time air quality monitoring through mobile sensing in metropolitan areas. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing, UrbComp 2013, Chicago: 1-8.
- Drzeniecka A. 2005. Struktura termiczna warstwy granicznej atmosfery we Wrocławiu i jej wpływ na koncentrację zanieczyszczeń powietrza. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- 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. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20<sup>th</sup> century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne* 75: 599-608.
- Drzeniecka-Osiadacz A., Sawiński T. 2012. Możliwość wykorzystania automatycznych pomiarów opadu atmosferycznego oraz stężenia pyłu PM<sub>2.5</sub> w wyznaczeniu współczynników wymywania. *Przegląd Geofizyczny* LVII, 2: 113-125.
- 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 pyłu we Wrocławiu. W: M. Kosmala (red.) *Tereny zielone w ochronie powietrza*. Wydawnictwo PZLiTS, Toruń: 11-36.
- Dubicka M. 1994. Wpływ cyrkulacji atmosfery na kształtowanie warunków klimatu (na przykładzie Wrocławia). *Acta Universitatis Wratislaviensis No 1581, Studia Geograficzne* 60: 1-295.
- Dubicka M., Pyka J.L. 2005. Meteorologia i klimatologia. W: J. Łoboda, P. Migoń (red.) *Kierunki badań geograficznych ośrodka wrocławskiego*. Wydawnictwo GAJT, Wrocław: 61-86.
- Dubicka M., Sikora S. 2003. Influence of the city on the structure of the net heat storage in Wrocław. 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: 173-176.
- Dubicka M., Szymanowski M. 2000. Struktura miejskiej wyspy ciepła i jej związek z warunkami pogodowymi i urbanistycznymi Wrocławia. *Acta Universitatis Wratislaviensis No 2269, Studia Geograficzne* 74: 99-118.
- Dubicka M., Rosiński D., Szymanowski M. 2003. The influence of the urban environment on the air humidity in Wrocław. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20<sup>th</sup> century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne* 75: 504-527.
- Gál T., Unger J. 2009. Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Building and Environment* 44, 1: 198-206.
- Gałek G., Sobik M., Błaś M., Polkowska Ż., Cichała-Kamrowska K., Wałaszek K. 2015. Dew and hoarfrost frequency, formation efficiency and chemistry in Wrocław, Poland. *Atmospheric Research* 151, 1: 120-129.
- Grell G.A., Peckham S.E., Schmitz R., McKeen S.A., Frost G., Skamarock W.C., Eder B. 2005. Fully coupled "online" chemistry in the WRF model. *Atmospheric Environment* 39, 37: 6957-6975.
- Hanna S.R., Yang R. 2001. Evaluations of mesoscale models' simulations of near-surface winds, temperature gradients, and mixing depths.



- Journal of Applied Meteorology* 40, 6: 1095-1104.
- Holtslag A.A.M., Svensson G., Baas P., Basu S., Beare B., Beljaars A.C.M., Bosveld F.C., Cuxart J., Lindvall J., Steeneveld G.J., Tjernstrom M., Wiel B.J.H. 2013. Stable atmospheric boundary layers and diurnal cycles: challenges for weather and climate models. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94, 11: 1691-1706.
- Krynicka J., Drzeniecka-Osiadacz A. 2013. Analysis of Variability in PM<sub>10</sub> Concentration in the Wrocław Agglomeration. *Polish Journal of Environmental Studies* 22, 4: 1091-1099.
- 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 Environment and Pollution* 58, 1-2: 3-14.
- Netzel P. 2009. Wykorzystanie sztucznej sieci neuronowej do określenia i prognozowania struktury warstwy granicznej atmosfery i jej zmienności w warunkach miejskich. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- Netzel P., Drzeniecka-Osiadacz A., Ślopek J. 2011. Mobile SODAR measurements as a source of information about spatial variability of nocturnal thermal inversion height. 2011 Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2011 Joint IEEE: 141-144.
- 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.
- Oke T.R. 1987. *Boundary Layer Climates*. Second Edition. Methuen Publishing, London: 1-435.
- Ojrzyńska H., Sawiński T., Kryza M., Wałaszek K., Werner M. 2015. Application of biometeorological forecasts for urban areas in LIFE-APIS/PL project – first approach. 31st International Conference of the Society for Environmental Geochemistry and Health, SEGh 2015, Bratislava, Slovak Republic, Book of Abstracts: 65.
- Padró-Martínez L.T., Patton A.P., Trull J.B., Zamore W., Brugge D., Durant J.L. 2012. Mobile monitoring of particle number concentration and other traffic-related air pollutants in a near-highway neighborhood over the course of a year. *Atmospheric Environment* 61: 253-264.
- Pinho O.S., Manso Orgaz M.D. 2000. The urban heat island in a small city in coastal Portugal. *International Journal of Biometeorology* 44, 4: 198-203.
- Pyka J.L. 1988. Pierwsze wyniki badań meteorologicznych przeprowadzonych za pomocą sodaru we Wrocławiu. *Przegląd Geofizyczny* XXXIII, 2: 157-166.
- Pyka J.L. 2003. Meteorological observations and measurements in Wrocław. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20<sup>th</sup> century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne* 75: 11-22.
- Rosiński D. 2005. Wpływ warunków meteorologicznych i użytkowania terenu na przestrzenne i czasowe zróżnicowanie wilgotności powietrza we Wrocławiu. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- Sikora S. 2003. Biometeorological conditions in Wrocław during the Summer 2001. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20<sup>th</sup> century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne* 75: 528-538.
- Sikora S. 2005. Warunki biometeorologiczne miasta na przykładzie Wrocławia. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- Sikora S. 2008. Bioklimat Wrocławia. *Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego* 3: 1-169.
- Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda M.G., Huang X.Y., Wang W., Powers J.G. 2008. A description of the Advanced Research WRF version 3. *NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR*, Boulder, Colorado: 1-113.
- Skjøth C.A., Bilińska D., Werner M., Malkiewicz M., Adams-Groom B., Kryza M., Drzeniecka-Osiadacz A. 2015. Footprint areas of pollen from alder (*Alnus*) and birch (*Betula*) in the UK (Worcester) and Poland (Wrocław) during 2005–2014. *Acta Agrobotanica* 68, 4: 315-324.
- Sobrino J.A., Raissouni N. 2000. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring. Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing* 21, 2: 353-366.
- Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L. 2004. Land surface temperature retrieval from Landsat TM5. *Remote Sensing of Environment* 90, 4: 434-440.
- Sobrino J.A., Jiménez-Muñoz J.C., Sòria G., Romaguera M., Guanter L., Moreno J., Plaza A., Martínez P. 2008. Land Surface Emissivity Retrieval From Different VNIR and TIR Sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46, 2: 316-327.
- Stathopoulou M., Cartalis C., Keramitsoglou I. 2004. Mapping micro-urban heat islands using NOAA/AVHRR images and CORINE Land Cover: an application to coastal cities of Greece. *International Journal of Remote Sensing* 25, 12: 2301-2316.
- Stull R.B. 1988. *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 1-670.
- Suder A., Szymanowski M. 2014. Determination of ventilation channels in urban area: a case study of Wrocław (Poland). *Pure and Applied Geophysics* 171, 6: 965-975.

- Szymanowski M. 2003a. Meteorologiczne i urbanistyczne uwarunkowania miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- Szymanowski M. 2003b. Modeling the urban heat island of Wrocław. W: J. Pyka, M. Dubicka, A. Szczepankiewicz-Szmyrka, M. Sobik, M. Błaś (red.) *Man and climate in the 20<sup>th</sup> century. Acta Universitatis Wratislaviensis No 2542, Studia Geograficzne 75*: 493-503.
- Szymanowski M. 2004. Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu. *Acta Universitatis Wratislaviensis No 2690, Studia Geograficzne 77*: 1-229.
- 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.
- Szymanowski M., Kryza M. 2009. GIS-based techniques for urban heat island spatialization. *Climate Research 38*: 171-187.
- Szymanowski M. Kryza M. 2011. Application of geographically weighted regression for modelling the spatial structure of urban heat island in the city of Wrocław (SW Poland). *Procedia Environmental Sciences 3*: 87-92.
- Szymanowski M., Kryza M. 2012. Local regression models for spatial interpolation of urban heat island – an example from Wrocław, SW Poland. *Theoretical and Applied Climatology 108*, 1-2: 53-71.
- Śłopek J. 2008. Model rozkładu energii w granicznej warstwie atmosfery w warunkach miejskich na przykładzie Wrocławia. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław.
- Walawender J.P., Szymanowski M., Hajto M.J., Borkwa A. 2014. Land Surface Temperature Patterns in the Urban Agglomeration of Krakow (Poland) Derived from Landsat-7/ETM+ Data. *Pure and Applied Geophysics 171*, 6: 913-940.
- Wałaszek K., Kryza M., Szymanowski M., Werner M., Ojrzyńska H. 2017. Sensitivity Study of Cloud Cover and Ozone Modeling to Microphysics Parameterization. *Pure and Applied Geophysics 174*, 2: 491-510.
- 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.
- Werner M., Kryza M., Ojrzyńska H., Skjøth C.A., Wałaszek K., Dore A.J. 2015. Application of WRF-Chem to forecasting PM<sub>10</sub> concentration over Poland. *International Journal of Environment and Pollution 58*, 4: 280-292.

## Summary

The research into the urban climate and urban atmosphere was undertaken in the 1970s and has been continued since then, mainly by the scientists from the Department of Climatology and Atmosphere Protection (former Department of Meteorology and Climatology). The introduction of new measuring techniques (e.g. automatic weather stations for both mobile and stationary measurements and mobile acoustic soundings) at the end of the 20<sup>th</sup> century, supported with GIS analysis, was the first milestone in the history of this research. Thanks to the involvement of Professor Maria Dubicka and Professor Jerzy L. Pyka, former heads of the Department, the scientific infrastructure was significantly improved, and a number of scientific projects and PhD studies were undertaken. The research results were published in both international and national scientific journals. The studies were mainly focused on the urban heat island, bioclimatology and the urban boundary layer. Novel methods related to acoustic soundings, neural networks or GIS applications were developed.

During the second decade of the 21<sup>st</sup> century, the research has been mainly focused on air quality and modelling. This is also the time of introducing new measuring techniques related to air quality (e.g. PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> sensors, UAVs). New models have been introduced and tested, such as WRF and WRF-Chem. The research results are more applicable, and will be commercialized in the future.