

Abstract

The atmospheric boundary layer (ABL) is either directly or indirectly related to different weather and climate phenomena. Aerosol and clouds can affect the Earth's radiation budget and the whole climate system. The study of ABL, atmospheric aerosol, and clouds contributes to the improvement of environmental pollution prediction, weather prediction and climate models.

The main focus of my doctoral thesis was on the study of characteristics of ABL and properties of aerosol and clouds. During my studies, I pursued the following three research goals, which resulted in three papers of which I am the first author and which constitute the main body of this portfolio doctoral thesis. All three goals were successfully achieved.

The first goal was to derive and analyse the atmospheric boundary layer height (ABLH) over the Remote Sensing Laboratory (RS-Lab) in Warsaw (52.21°N, 20.98°E, 54 m a.s.l.), Poland. The collocated measurements of the CHM15k ceilometer (from January 2008 to October 2013) and the PollyXT Raman lidar (from July 2013 to December 2018) were used to derive the ABLH. A large sample of 1841 diurnal cycle ABLH retrievals were derived using the wavelet covariance transform method (WCT). A scaling threshold-based algorithm was proposed to homogenize ceilometer and lidar datasets, which improved the results' coherence significantly. The statistical analysis of these long-term observations indicated pronounced seasonal changes of monthly mean diurnal cycles of ABLH. The annual and seasonal variability of 10 years of ABLH record revealed that it was affected by the change of the climate classification over the region, the global heating (El Niño) and cooling (La Niña), reflected in the changes of surface air temperature. The annual mean well-mixed layer (WML), residual layer (RL), and nocturnal layer (NL) under clear-sky and cloudy conditions were compared, indicating that the cloud cover and the urban heat island played an important role in the ABL processes. Finally, the frequency distribution of ABLH revealed a strong seasonal variability in terms of distribution peak and shape.

The second goal was to investigate optical properties of aerosol within ABL using the PollyXT Raman lidar data in Warsaw in July, August, and September of 2013, 2015, and 2016. Profiles stored in the EARLINET/ACTRIS database were used for statistical analysis. In total, 246 sets of intact profiles were used, each set comprising the following intensive aerosol properties: the particle extinction (α) and backscatter coefficients (β), as well as linear particle depolarization ratios (δ) at 355 nm and 532 nm. From those, other properties were calculated, such as the aerosol optical depth (AOD), the lidar ratio (LR), and the Ångström exponent ($\text{\AA E}$). Interrelations between these different aerosol optical properties derived within boundary layer, as well as relations between them, the ABLH, the particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10}) and the relative humidity (RH) at the surface were studied. As a result, the AOD_{ABL} and LR_{ABL} revealed a positive correlation, the $\text{\AA E}_{\text{ABL}}$ and LR_{ABL} a negative correlation, whereas the δ_{ABL} with water vapor mixing ratio (WV_{ABL}) and the surface relative humidity (RH) showed negative trends. During the measured period, the aerosol composition within the boundary layer was assessed, which consisted of: urban anthropogenic pollution (~ 61 %) or mixtures of anthropogenic aerosol with biomass burning

aerosol (< 14 %), local pollen (< 7 %), or Arctic marine particles (< 5 %). No significant contribution of mineral dust was found within the boundary layer.

The third goal was to assess properties and vertical extent of tropospheric aerosol and clouds using the synergy of active and passive remote sensing instruments. Measurements over the period of June-August 2019 with the ESA's Mobile Raman Polarization and Water Vapor Lidar (EMORAL), the LATMOS Bistatic Doppler Cloud Radar System for Atmospheric Studies (BASTA), and the INOE Scanning Microwave Radiometer (HATPRO-G2) were conducted over the PolWET peatland site in Rzecin (52.75°N, 16.30°E, 54 m a.s.l.), Poland. A new scheme for target classification (aerosol-cloud typing) was developed to determine molecules, aerosol (spherical, non-spherical, fine, coarse), the cloud phase (liquid, ice, supercooled droplets), using data synergetic combination of the three instruments. Different types of scatter targets (boundary layer particles, rain, drizzle, supercooled layer, ice cloud, liquid cloud, mixed-phase cloud, aerosol, and molecules) were successfully classified, which was demonstrated based on a case study in a meteorologically complicated situation.

Streszczenie

Atmosferyczna warstwa graniczna (z ang. *atmospheric boundary layer* ABL) jest bezpośrednio lub pośrednio związana z różnymi zjawiskami pogodowymi i klimatycznymi. Aeroszol atmosferyczny i chmury mogą wpływać na budżet promieniowania Ziemi i system klimatyczny. Badanie właściwości ABL, aerozolu i chmur przyczynia się do poprawy prognozowania zanieczyszczenia środowiska, prognoz pogody i modeli klimatycznych.

Głównym celem mojej pracy doktorskiej było badanie atmosferycznej warstwy granicznej oraz właściwości aerozolu atmosferycznego i chmur. W swoich badaniach wydzieliłem trzy cele szczegółowe, które zaowocowały trzema publikacjami, których byłem pierwszym autorem, i które składają się na niniejszą pracę doktorską. Wszystkie trzy cele zrealizowałem.

Za pierwszy cel wziąłem badanie wysokości warstwy granicznej atmosfery (z ang. *atmospheric boundary layer height* ABLH) na podstawie analizy teledetekcyjnych pomiarów ceilometru CHM15k (od stycznia 2008 r. do października 2013 r.) oraz lidarów PollyXT (od lipca 2013 r. do grudnia 2018 r.) w Laboratorium Pomiarów Zdalnych (z ang. *Remote Sensing Laboratory* RS-Lab) w Warszawie (52.21°N, 20.98°E, 54 m a.s.l.). Wykorzystałem je do wyznaczenia ABLH w skali ponad 10 lat. Wysoka próba statystyczna (1841) odzyskanych cykli dobowych ABLH została uzyskana przy użyciu metody transformacji kowariancji falkowej (z ang. *wavelet covariance transform* WCT). Algorytm oparty na wartościach progowych użytych do skalowania wartości ABLH został opracowany w celu ujednolicenia danych ceilometru i lidarów, a wykonane przeze mnie testy algorytmu wykazały znaczną poprawę spójności wyników. Analiza statystyczna długoterminowych obserwacji wykazała wyraźne sezonowe zmiany średnich miesięcznych cykli dobowych ABLH. Roczna i sezonowa zmienność ABLH ujawniła, że wpływ na nią miało globalne ogrzewanie (El Niño) i chłodzenie (La Niña), odzwierciedlone w zmianach temperatury powietrza na powierzchni. Ponadto porównanie średniej rocznej warstwy wymieszanej (z ang. *well-mixed layer* WML), rezydualnej (z ang. *residual layer* RL) i nocnej (z ang. *nocturnal layer* NL) w warunkach czystego nieba i zachmurzenia, wskazało, że pokrywa chmur i miejska wyspa ciepła odgrywały ważną rolę w procesach ABL. Wreszcie rozkład częstotliwości ABLH ujawnił silną zmienność sezonową pod względem maksymalnej amplitudy i kształtu rozkładu.

Drugim celem było zbadanie właściwości optycznych aerozolu atmosferycznego w warstwie granicznej. Wykorzystałem tu dane lidarów PollyXT w Warszawie w lipcu, sierpniu i wrześniu 2013, 2015 i 2016. Profile przechowywane w bazie danych EARLINET / ACTRIS zostały wykorzystane do badań statystycznych. W sumie zastosowano 246 zestawów profili własności optycznych, każdy zawierający współczynniki ekstynkcji (α) i rozpróśnienia wstecznego (β) na cząstkach aerozoli atmosferycznych, a także liniowe współczynniki depolaryzacji cząstek (δ). Profile te posłużyły mi do wyliczenia kolejnych własności optycznych: grubości optycznej aerozolu (AOD), ilorazu lidarowego (LR) i wykładnika Ångströma ($\text{\AA}$). Zbadałem zależności między różnymi właściwościami optycznymi aerozolu w warstwie granicznej oraz relacje między nimi a pyłem zawieszonym ($\text{PM}_{2.5}$ i PM_{10}) oraz wilgotnością względną (RH) przy powierzchni. W rezultacie

AOD_{ABL} i LR_{ABL} wykazały dodatnią korelację, AE_{ABL} i LR_{ABL} ujemną korelację, a δ_{ABL} ze współczynnikiem mieszania pary wodnej (WV_{ABL}) i RH wykazały ujemne trendy. Kompozycja aerozolu w warstwie granicznej w analizowanym okresie składała się z: antropogenicznych zanieczyszczeń miejskich ($\sim 61\%$) lub ich mieszanin z aerozolem pochodzącym ze spalania biomasy ($<14\%$), lokalnym pyłkami biogenicznymi ($<7\%$) lub cząstkami aerozolu transportowanego znad Arktyki ($<5\%$). W warstwie granicznej nie stwierdzono znaczącego udziału pyłu mineralnego.

Jako trzeci cel postawiłem sobie badanie aerozolu i chmurami w troposferze przy użyciu synergii aktywnych i pasywnych pomiarów teledetekcyjnych. Pomiary wykonane w okresie od czerwca do sierpnia 2019 r. z wykorzystaniem mobilnego lidar ramanowskiego ESA (EMORAL), bistatycznego dopplerowskiego radaru chmurowego LATMOS (BASTA) oraz skaningowego radiometru mikrofalowego INOE (HATPRO-G2) przeprowadzono na torfowisku w Rzecinie ($52.75^{\circ}N$, $16.30^{\circ}E$, 54 m a.s.l.). Opracowany nowy schemat klasyfikacji cząstek, aerozolu i stanu fazy chmur na podstawie połączonych danych z trzech instrumentów pozwolił na szczegółową analizę rozproszenia (cząstki aerozolu w warstwie granicznej, aerozol sferyczny i niesferyczny, aerozol drobno i gruboziarnisty, deszcz, mżawka, warstwa przechłodzona, chmura lodowa, ciekłą i fazy mieszanej). Zalety opracowanej metodologii zademonstrowałem dla studium przypadku podczas skomplikowanej sytuacji meteorologicznej.