

Študij atmosferskih procesov v Vipavski dolini na podlagi razširjanja aerosolov

Maruška Mole¹, Longlong Wang¹, Asta Gregorič¹, Klemen Bergant^{1,2}, Luka Drinovec^{3,4},
Griša Močnik^{3,4}, Samo Stanič¹, Janja Vaupotič⁴, Marko Vučković¹

Povzetek

Vipavska dolina je geomorfološko dokaj zaprta, kar po eni strani omogoča pojav močne burje, po drugi strani pa ob stabilnih meteoroloških razmerah ugodne pogoje za kopičenje aerosolov znotraj prizemne mejne plasti. Poznavanje dinamike višinske porazdelitve aerosolov s sočasno uporabo prizemnih meritev omogoča raziskave lokalnih emisij aerosolov, transporta aerosolov na daljše razdalje ter značilnih atmosferskih struktur, ki se pojavijo v različnih vremenskih pogojih. Pri meritvah smo uporabili metode daljinskega zaznavanja z lidarjem, ki omogočajo opazovanje časovnega in prostorskega spreminjanja koncentracij aerosolov, ter točkovne meritve, ki omogočajo njihovo prepoznavanje in določanje njihovih lastnosti. Ugotovili smo, da je mogoče lidarske meritve uporabiti za študij vrste atmosferskih procesov in struktur v zelo različnih vremenskih pogojih. Opazili smo manjše konvekcijske strukture znotraj prizemne mejne plasti in gravitacijske valove nad njo. Meritve vsebnosti in lastnosti aerosolov pri tleh kažejo, da se lahko ob stabilnih atmosferskih pogojih v primerih povečanja lokalnih emisij njihove koncentracije hitro povečajo. Dinamiko in strukturo razširjanja aerosolov znotraj Vipavske doline bomo v prihodnje podrobneje raziskali s sočasnim prostorskim pregledovanjem z metodami daljinskega zaznavanja.

Ključne besede: aerosoli, atmosferski procesi, daljinsko zaznavanje, Vipavska dolina
Keywords: aerosols, atmospheric processes, remote sensing, Vipava valley

Uvod

Na področju raziskav atmosfere postaja v zadnjih letih vedno pomembnejše poznavanje vzrokov razširjanja in značilnih prostorskih porazdelitev aerosolov, ki igrajo pomembno vlogo v atmosferski fiziki, kemiji in pri klimatskih spremembah, vplivajo pa tudi na zdravje ljudi (Pósfai & Buseck, 2010). Aerosoli so suspenzija trdnih delcev in kapljic v zraku z velikostmi od nekaj 10 nm do nekaj 10 μ m. S sipanjem in absorbcijo sončnega sevanja vplivajo na Zemljino radiacijsko ravnovesje. Ker delujejo kot nukleacijska jedra, vplivajo na razvoj oblakov in padavin ter s tem posledično na hidrološki cikel, hkrati pa aerosoli preko kemijskih reakcij s plini v atmosferi vplivajo tudi na koncentracije plinskih komponent (Lohmann & Feichter, 2005; Pöschl, 2005). Opazovanja dinamike prostorskih porazdelitev aerosolov lahko izkoristimo tudi za sledenje gibanja zračnih mas, saj so dovolj lahki, da se gibljejo z zračnimi masami. Na osnovi izmerjene časovne dinamike porazdelitev aerosolov je mogoče slediti tako regionalnemu gibanju zračnih mas kot tudi lokalnim procesom in strukturam znotraj prizemne mejne plasti (PBL, ang. *Planetary Boundary Layer*).

¹ Univerza v Novi Gorici, Center za raziskave atmosfere, Vipavska 11c, 5270 Ajdovščina

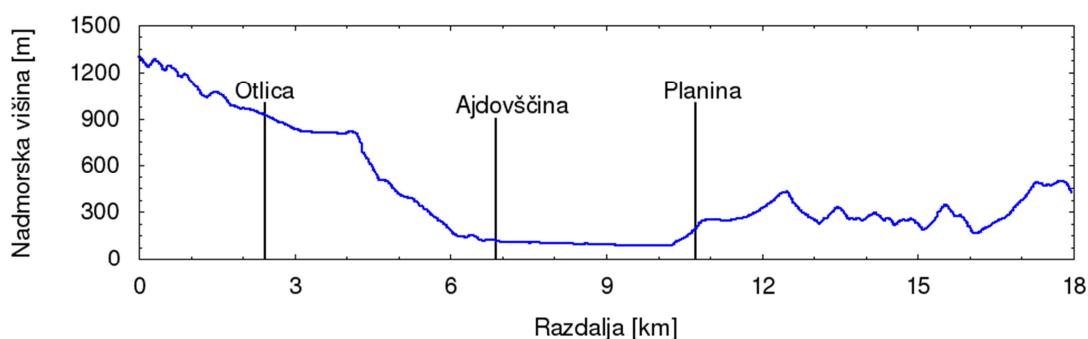
² MOP, ARSO, Urad za meteorologijo, Vojkova 1b, 1000 Ljubljana

³ Aerosol d.o.o., Kamniška 41, 1000 Ljubljana

⁴ Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

Aerosoli lahko izvirajo iz različnih naravnih in antropogenih virov. Velike količine primarnih aerosolov izhajajo v ozračje ob vulkanski izbruhih (Gao et al., 2011; Shibata & Kinoshita, 2016) in z vetrno erozijo (mineralni prah, na primer saharški pesek) (Abdelkader et al., 2015; Knippertz & Todd, 2012), glavni antropogeni vir primarnih aerosolov pa predstavljajo ogljični delci, ki absorbirajo svetlobo in so produkt nepopolnega izgorevanja ogljičnih goriv. Najpomembnejši delež predstavlja črni ogljik, za katerega je značilna močna absorpcija svetlobe v vidnem delu svetlobnega spektra (Petzold et al., 2013). Poleg aerosolov, ki so produkt primarnih emisij, nastajajo v ozračju s pretvorbo iz plinastega v trdno agregatno stanje tudi sekundarni aerosoli (Wonaschütz et al., 2015). Aerosoli so v ozračju podvrženi številnim fizikalnim in kemijskim interakcijam in pretvorbam. Tako imenovano staranje aerosola predstavlja spremembe velikosti delcev, njihove strukture in sestave (Kojima et al., 2006) ter posledično vpliva na njihove optične lastnosti (Adachi et al., 2014; Drinovec et al., 2015). Časovno in prostorsko spreminjanje koncentracije in sestave aerosolov v večji meri zavisi tudi od atmosferskih pogojev. Izpusti antropogenih aerosolov so večinoma v spodnjem delu troposfere, v prizemni mejni plasti. Aerosoli se s časom zaradi turbulentnega mešanja razpršijo (McGrath-Spangler et al., 2015; Quan et al., 2013). Vertikalni, horizontalni transport in redčenje emitiranih delcev so odvisni od stabilnosti atmosfere, zato je poznavanje dinamike PBL izredno pomembno pri študiju izvorov emisij.

V prispevku predstavljamo različne vidike raziskav procesov v troposferi na območju Vipavske doline (Slika 1), ki se odražajo v značilnih porazdelitvah in lastnostih aerosolov. Vipavska dolina je geomorfološko dokaj zaprta, kar po eni strani omogoča občasno pojavljanje močne burje, po drugi strani pa ob stabilnih meteoroloških razmerah ugodne pogoje za kopičenje aerosolov znotraj PBL. Izbrana lokacija tako nudi široke možnosti za raziskave procesov znotraj PBL, od določanja lokalnih izvorov in raziskav procesov staranja aerosolov do nukleacije sekundarnih aerosolov. Pri tem je pomembno tudi zaznavanje prispevka aerosolov, ki niso lokalnega izvora, saj lahko ob ugodnih razmerah pomembno vplivajo na koncentracije, prostorske in časovne porazdelitve aerosolov znotraj PBL. Poznavanje dinamike prostorske porazdelitve aerosolov lahko koristno uporabimo tudi pri raziskavah značilnosti burje. Prispevek nudi pregled raziskav treh procesov: lokalnih emisij aerosolov, kjer z uporabo prizemnih meritev in daljinskega zaznavanja opazujemo razširjanje aerosolov v PBL, transporta aerosolov na daljše razdalje, pri čemer opazujemo vnos mineralnih delcev ter atmosferskih struktur, ki se pojavijo ob burji ali v obdobjih mirnega vremena.



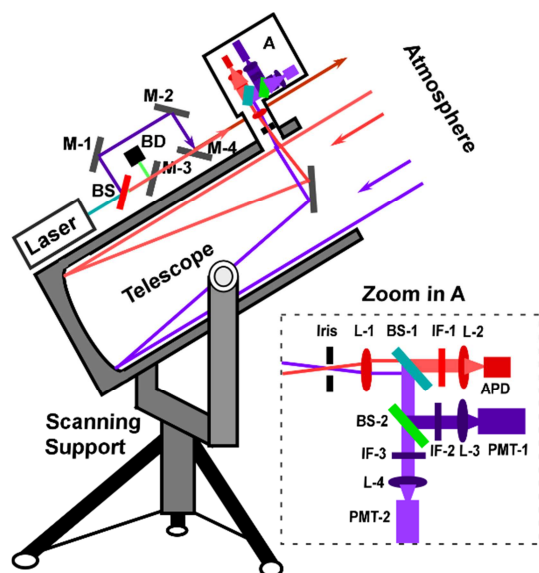
Slika 1 – Prerez Vipavske doline od Otlice do Planine (S – J). Iz planote Trnovskega gozda (1300 m n.v.) na severu pade teren v Vipavsko dolino (100 m n.v.) ter se nato proti jugu dvigne v Kraško planoto (500 m n.v.).

Merilne metode

Pri raziskavah atmosferskih procesov v Vipavski dolini smo uporabili različne merilne metode, ki omogočajo tako opazovanje časovnega in prostorskega spreminjanja koncentracij aerosolov kot njihovo prepoznavanje (identifikacijo) in določanje njihovih lastnosti (karakterizacijo). Meritve višinskih profilov atmosferskih struktur smo izvedli z lidarjem, ki deluje na osnovi detekcije povratno sipane svetlobe na aerosolih. Da bi dobili celostno sliko o dogajanju v atmosferi, smo lidarskim meritvam dodali lokalne točkovne meritve koncentracij in velikostnih porazdelitev delcev, koncentracij aerosoliziranega črnega ogljika in točkovne meritve vetra. Vse časovno odvisne meritve uporabljajo lokalni čas (CET oziroma LT).

Lidar

Lidar je naprava za meritve povratnega sipanja kratkih pulzov svetlobe na molekulah in aerosolih v ozračju (Kovalev & Eichinger, 2004). Mobilni lidarski sistem, ki smo ga uporabili pri meritvah, sestavljajo Nd:YAG laser⁵ kot svetlobni izvor ter Newtonski teleskop in sistem fotopomnoževalk kot sprejemnik (Slika 2). Laser oddaja sunke svetlobe dolžine 9 ns s frekvenco 10 Hz v infrardečem (IR, 1064 nm) in ultravijoličnem (UV, 266 nm) delu spektra. Povratno sipano svetlobo, ki jo zbere Newtonski teleskop premera 300 mm, s spektroskopskim filtrom razdelimo na tri komponente (1064 nm, 295 nm in 266 nm) in jih v elektronske signale spremenimo s fotopomnoževalkami. Signale ojačamo in digitaliziramo s komercialnim digitalizatorjem⁶, ki omogoča zajem podatkov s prostorsko ločljivostjo 3,75 m.



Slika 2 – Mobilni lidarski sistem Centra za raziskave atmosfere Univerze v Novi Gorici.

Leva slika prikazuje shemo sprejemnika sipane svetlobe, ki zbrano svetlobo s pomočjo filtrov loči na UV, ki jo vodimo dalje na fotopomnoževalko (PMT), oz. IR, ki pot nadaljuje

⁵ Nd:YAG pulsed laser ULTRA CFR400 (Quantel)

⁶ TR40-160 transient recorder (Licel)

na plazovno fotodiodo (APD). Desna slika prikazuje lidar med terenskim delom v Portorožu.

Pri analizi lidarskih meritev moramo upoštevati upadanje moči svetlobnega toka s kvadratom razdalje, ki se odraža v časovnem profilu velikosti izmerjenih signalov, šum ozadja, ki je posledica sipanja sončne svetlobe v ozračju, ter elektronski šum fotopomnoževalke. Končna meritev časovne oblike izmerjenega sunka nam opiše prostorsko porazdelitev koncentracije sipalcev vzdolž poti pulza laserske svetlobe.

Podatke o relativni koncentraciji aerosolov dobimo iz meritev Mievega sipanja, ponavljanje meritve pa nam omogoča opazovanje atmosferskih struktur in preverjanje modelov regionalnega transporta aerosolov v višjih plasteh ozračja. Pomanjkljivost meritve je odsotnost informacije o lastnostih delcev (oblika, velikost, sestava), na katerih se svetloba siplje, ter vrednosti absolutnih koncentracij delcev v ozračju. Relativna koncentracija opiše razmerje med absolutnimi koncentracijami na različnih višinah, kar pomeni, da potrebujemo za določitev absolutnih koncentracij umeritveno točko, kjer lokalno določimo koncentracijo delcev, ter jo nato uporabimo za izračun absolutnih koncentracij v kombinaciji z izmerjenimi relativnimi koncentracijami. Iz lidarskih meritev lahko določimo tudi koeficient atmosferske ekstinkcije, ki lahko služi kot dodaten kriterij pri razločevanju plasti v atmosferi. Koeficient ekstinkcije opisuje, koliko svetlobe na enoto dolžine se zaradi sipanja in absorpcije izgubi ob prehodu skozi posamezno plast v atmosferi. Za oblačne plasti večinoma velja, da se njihove lastnosti v primeru raztrganih oblakov spreminjajo na časovni skali nekaj 10 minut, v primeru homogene oblačne plasti pa lahko koeficient ekstinkcije ostane visok ves čas njenega trajanja. V obeh primerih je koeficient ekstinkcije višji od tistega, ki ga lahko izmerimo ob prisotnosti saharkega prahu, vulkanskega pepela ali drugih aerosolov v ozračju. Oblačne plasti so tako največja težava lidarskih meritev, saj v večini primerov omejijo doseg meritev na višino baze najnižjih oblakov. V primeru Mievega sipanja moramo za določitev koeficienta ekstinkcije predpostaviti matematično zvezo med koeficientom povratnega sipanja in koeficientom atmosferske atenuacije (Klett, 1981).

Aethalometer

Meritve koncentracije črnega ogljika v zraku so potekale z aethalometrom⁷ (Drinovec et al., 2015b), ki vzorči zrak skozi filtrski trak iz steklenih vlaken. Nad filtrom je vir svetlobe, pod njim pa so detektorji, ki merijo prepustnost traku za svetlobo. Koncentracijo črnega ogljika izračunamo iz sprememb atenuacije svetlobe z valovno dolžino 880 nm. Na delu filtra, skozi katerega teče zrak, se nabirajo aerosoli. Absorpcijo (oziroma atenuacijo) merimo relativno glede na vzporedno meritev optične prepustnosti referenčnega dela istega filtra, skozi katerega zrak ne teče. To naredimo enkrat na merilno periodo, ki je tipično nekaj minut. Atenuacija je definirana kot logaritem razmerja izmerjene intenzitete svetlobe pod referenčnim delom filtra in delom, na katerem se nabirajo aerosolizirani delci. Aethalometer AE33 omogoča meritve absorpcije svetlobe v širokem svetlobnem spektru (pri valovnih dolžinah 370 nm, 470 nm, 520 nm, 590 nm, 660 nm, 880 nm in 950 nm), kar omogoča karakterizacijo absorpcije aerosolov v področju od ultravijolične do infrardeče. Ångströmov eksponent opisuje, kako se absorpcijski koeficient aerosolov spreminja z valovno dolžino svetlobe in predstavlja parameter, na osnovi katerega je mogoče ločiti delež črnega ogljika, ki nastaja pri izgorevanju dizelskih goriv, in delež, ki nastaja pri

⁷ Aethalometer AE33 (Magee Scientific / Aerosol d.o.o.)

izgorevanju lesa in biomase (Sandradewi et al., 2008). Pri tem je Ångströmov koeficient za popolnoma črne aerosole enak 1, kar pomeni, da ti povsem absorbirajo svetlobo ne glede na njeno valovno dolžino. Vrednost Ångströmovega koeficienta je visoka za tiste aerosole, ki dobro absorbirajo pri nizkih valovnih dolžinah.

Razvrščevalnik delcev po velikosti (SMPS)

Za meritve velikostne porazdelitve in številčne koncentracije aerosolov v velikostnem razredu od 10 do 1000 nm smo uporabili SMPS⁸. Instrument je sestavljen iz dveh delov, DMA (Differential Mobility Analyzer) in CPC (Condensation Particle Counter) enote. Vzorec zraka gre najprej skozi DMA, ki delce loči po velikosti glede na njihovo mobilnost v električnem polju. Električna mobilnost zavisi od velikosti delca in naboja. S spreminjanjem napetosti v DMA poteka zaporedna meritev delcev v različnih velikostnih razredih, tako da en ciklus meritev odvisno od nastavitve traja nekaj minut. Po velikosti ločena frakcija delcev nato vstopi v CPC enoto, kjer se delci najprej oplaščijo v zraku, nasičenem z alkoholom, da so dovolj veliki, da jih lahko zazna laserski detektor. Tako dobimo porazdelitev števila delcev v različnih velikostnih razredih.

Ultrazvočni merilec hitrosti vetra

Ultrazvočni 2D anemometer⁹ omogoča visokofrekvenčno zajemanje podatkov o hitrosti in smeri vetra. Hitrost vetra določa na osnovi časa preleta zvočnih sunkov med sprejemnikom in oddajnikom zvoka, informacijo o smeri vetra pa prejmemo na podlagi meritev hitrosti vetra med tremi sprejemniki/oddajniki.

Rezultati meritev

Lokalne emisije aerosolov

Pri meritvah lokalnih emisij aerosolov nas zanimajo predvsem antropogeni izvori, ki jih na tem območju praviloma predstavljajo kmetijska dejavnost (kmetijski stroji na dizelsko gorivo) in lokalna kurišča v hišah. Merilno kampanjo v obdobju 15. 4. 2015 do 8. 5. 2015 smo izvedli z namenom ugotavljanja velikostne porazdelitve in koncentracije aerosolov, povezanih s kurjenjem ob kresovanju v noči s 30. 4. na 1. 5. (Slika 3).

⁸ Scanning Mobility Particle Sizer (Grimm Aerosol Technik)

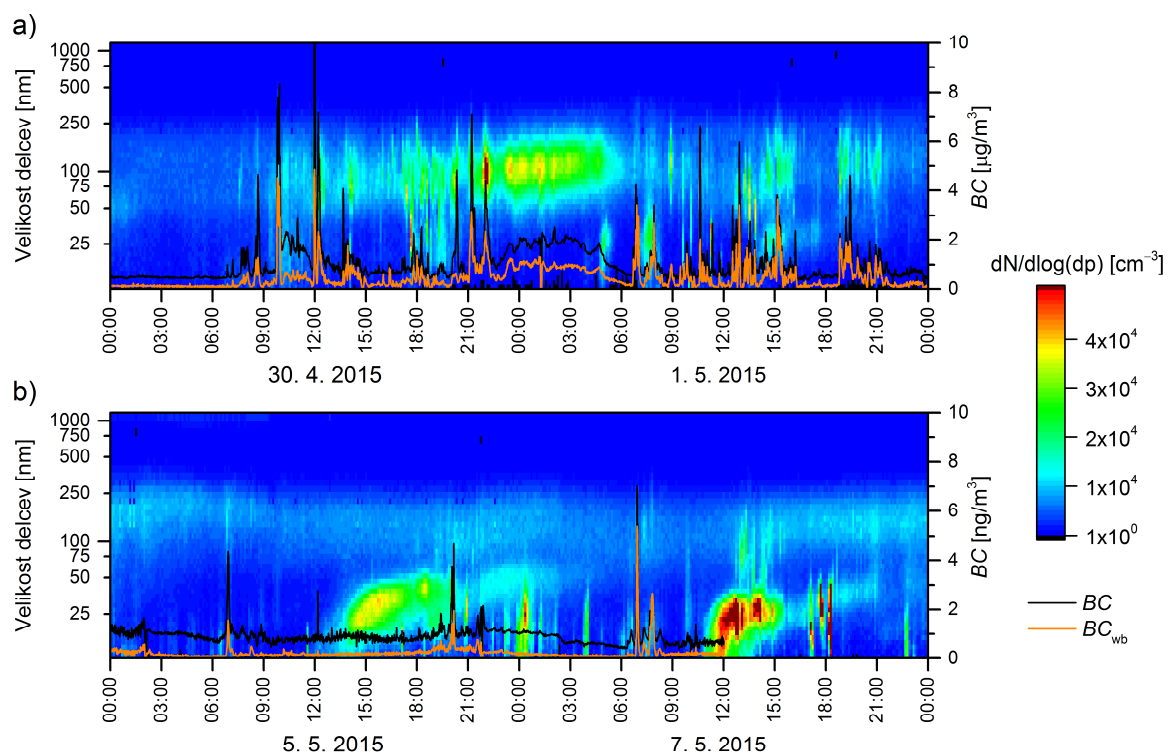
⁹ Ultrasonic Wind Sensor WMT702 (Vaisala)



Slika 3 – Pogled z Otlice na kresove v Vipavski dolini v noči na 1. 5. 2015
(avtor: Jurij Lavrenčič).

Meritve velikostnih porazdelitev in koncentracij delcev v velikostnem območju do $1\ \mu\text{m}$ ter koncentracij črnega ogljika (BC) smo izvedli v vasi Planina (Slika 1). Zanimalo nas je predvsem prostorsko razširjanje lesnega dima (dim, ki nastaja pri izgorevanju lesa) in redčenje koncentracij delcev v zraku po končanem kresovanju. V obdobju izvedbe meritev je prevladovalo stabilno vreme s šibkimi vetrovi brez prevladujoče smeri.

Meritve črnega ogljika kažejo na veliko število kratkotrajnih povišanj njegove koncentracije. Povišane vrednosti BC so posledica lokalnih izvorov iz prometa oziroma kurjenja lesa. Povišanja so običajno kratkotrajna, saj se vnešeni delci v ozračju hitro razredčijo. V meritvah je še posebej opazno povečanje koncentracije BC ob kresovanju v noči s 30. 4. na 1. 5. Prvemu vrhu, ko so koncentracije BC narastle na $5000\ \text{ng}/\text{m}^3$, je sledilo obdobje s konstantno povišanimi vrednostmi, kar je posledica prisotnosti lesnega dima iz večjega števila lokalnih izvorov na širšem območju Vipavske doline. Koncentracije so se znižale šele dne 1. 5. zjutraj. Meritve BC se skladajo z meritvami številčne koncentracije in velikostne porazdelitve delcev, iz katerih lahko razberemo, da so v omenjenem obdobju prevladovali delci velikosti od 60 do 180 nm (Slika 4a).



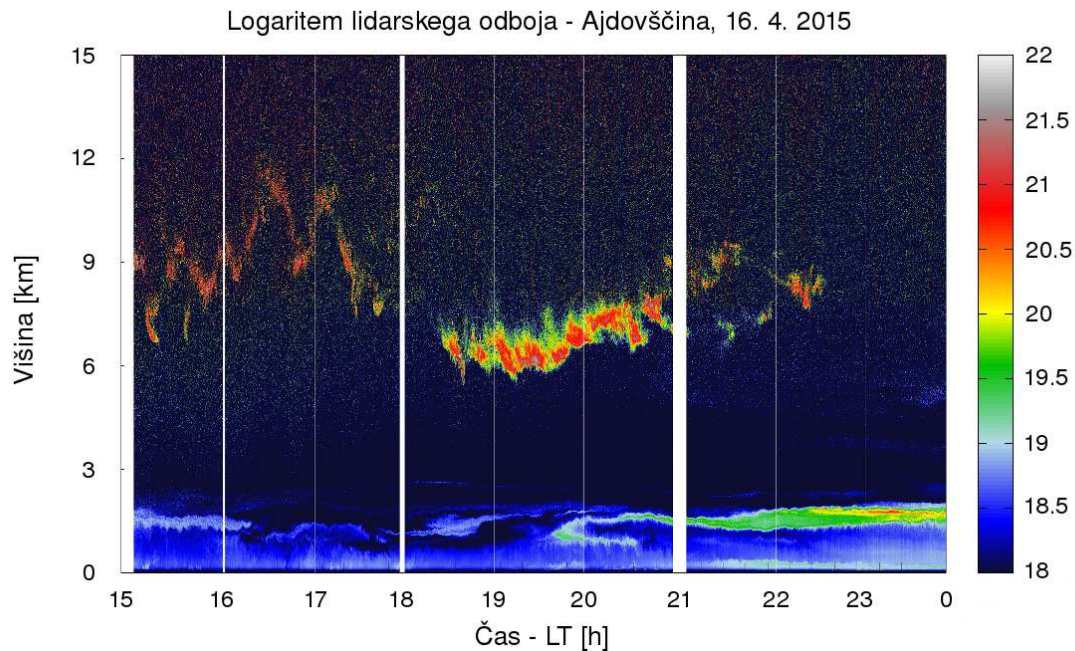
Slika 4 – Izsek meritev koncentracije in velikostne porazdelitve delcev in koncentracije črnega ogljika: a) obdobje kresovanja: opazne so visoke koncentracije delcev v velikostnem območju 60 – 200 nm in povišane koncentracije črnega ogljika od 30. 4. zvečer do 1. 5. zjutraj, b) dva dogodka nukleacije sekundarnih delcev: 5. 5. od 13:00 do 18:00 in 6. 5. od 11:00 do 15:00 (BC – koncentracija črnega ogljika, BC_{wb} – prispevek izgorevanja biomase).

Iz meritev dne 5. 5. in 6. 5., ko je prevladovalo sončno vreme, je opazen pojav nukleacije sekundarnih delcev (Slika 4b). Sekundarni delci nastajajo neposredno v atmosferi s pretvorbo iz plinastega v trdno stanje pod vplivom fotokemičnih reakcij, zato je njihova velikost v začetku rasti na nivoju okrog 1 nm (v našem primeru pod mejo detekcije), s časom pa se delci večajo. Dne 5. in 6. 5. je bila koncentracija delcev (premer delcev 10–1100 nm) pred nukleacijskim dogodkom okrog 5000 delcev/cm³, prevladovali pa so delci velikosti 100 do 200 nm. V obeh dnevih je v popoldanskem času prišlo do nastanka sekundarnih delcev, kar lahko vidimo iz povišanih koncentracij: okrog 35000 delcev/cm³ v prvem primeru in okrog 50000 delcev/cm³ v drugem primeru. Ob začetku nukleacijskega dogodka so delci veliki 10 nm ali manj, v prvih dveh urah, ko je rast najhitrejša, pa dosežejo velikost 40 nm. Med nukleacijskimi dogodki je koncentracija BC ostajala nespremenjena, saj se sekundarno nastali delci po sestavi razlikujejo od črnega ogljika.

Transport aerosolov na velike razdalje

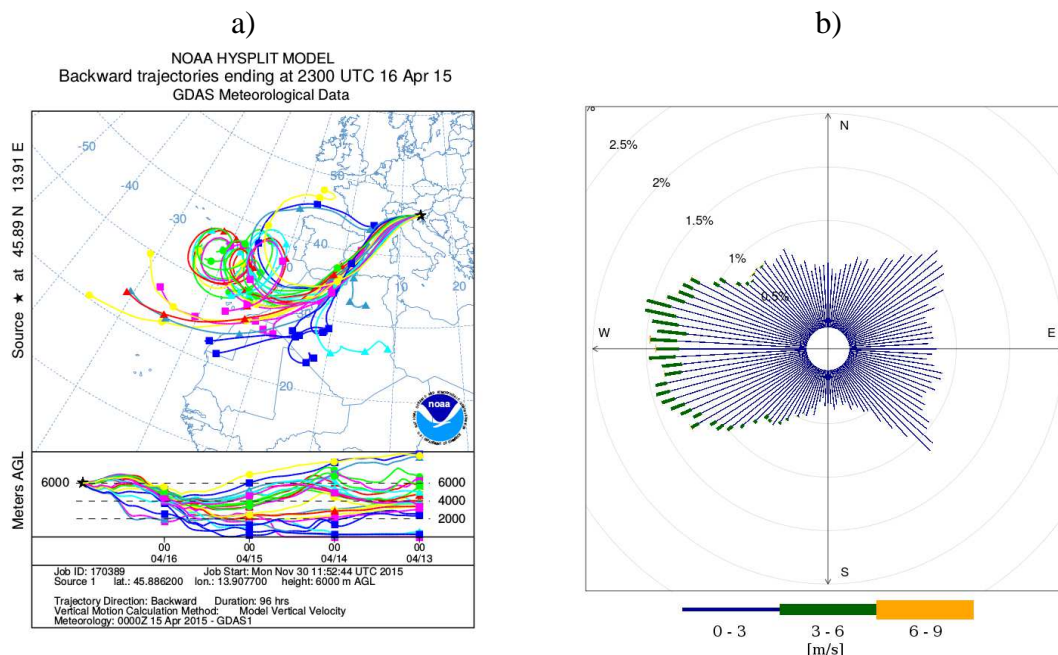
Meritve transporta aerosolov na velike razdalje so potekale v obdobjih prisotnosti mineralnega prahu v aprilu in maju 2015. Z lidarskim sistemom smo merili višinske profile relativnih koncentracij aerosolov in koeficientov atmosferske ekstinkcije med višinami 0,2

in 15 km. Prvo povišanje ekstinkcijskega koeficienta v zgornjih plasteh troposfere smo opazili 16. 4. 2015 (Slika 5), kar se sklada s petdnevno napovedjo povratnih trajektorij za Ajdovščino modela HYSPLIT (Draxler & Rolph), ki nakazuje prihod zračnih mas iznad severne Afrike (Slika 6). Na Sliki 5 je prikazan časovni razvoj lidarskega signala med 15:00 in 24:00 uro, iz katerega lahko razberemo, da je na višini med 6 in 12 km kot posledica povišanih koncentracij aerosolov prihajalo do močnega sipanja svetlobe. Močnejše sipanje je po pričakovanju opazno tudi v spodnji plasti atmosfere, kjer je signal povišan zaradi vnosa snovi s površja v PBL. Dogajanje v spodnjih 2 km atmosfere je prikazano na Sliki 7. Od 20:00 ure dalje so se pojavili oblaki nad planetarno mejno plastjo in po 22:30 popolnoma onemogočili nadaljnja opazovanja na večjih višinah.

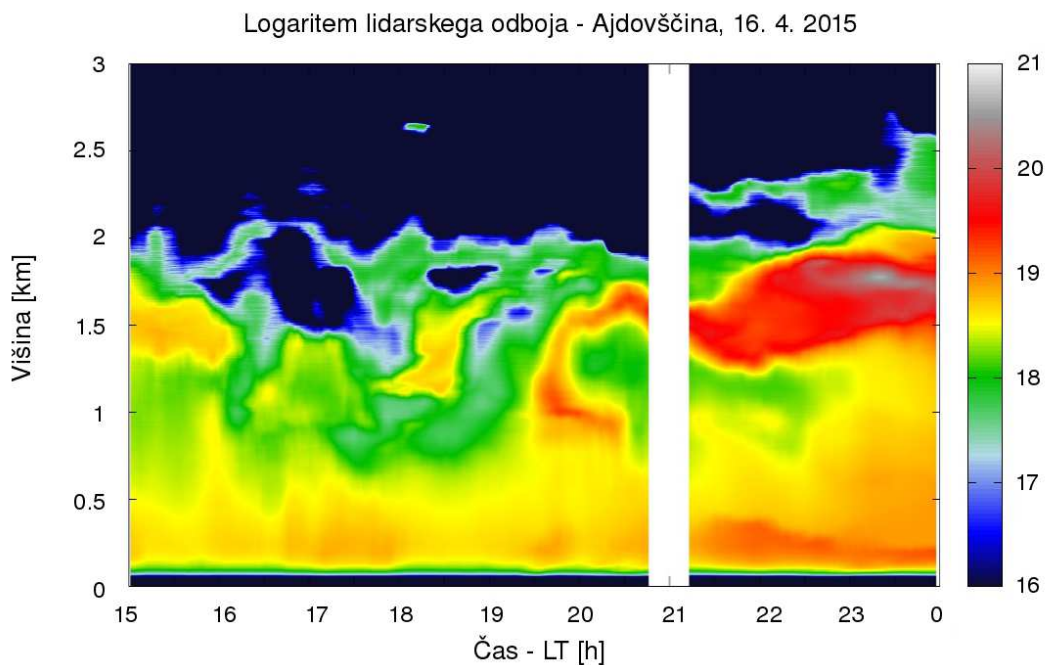


Slika 3 – Lidarske meritve povratnega sipanja na aerosolih v ozračju dne 16. 4. 2015. Barvna skala predstavlja logaritem velikosti izmerjenega signala. Med 18:30 in 21:00 je na višini okoli 6 km še posebej lepo opazna plast aerosolov, ki s prostim očesom ni bila vidna. V večernih urah je na višini okrog 2 km opazen nastanek oblačne plasti, kar onemogoča opazovanje struktur v višjih plasteh atmosfere. Razvoj oblakov smo potrdili tudi vizualno.

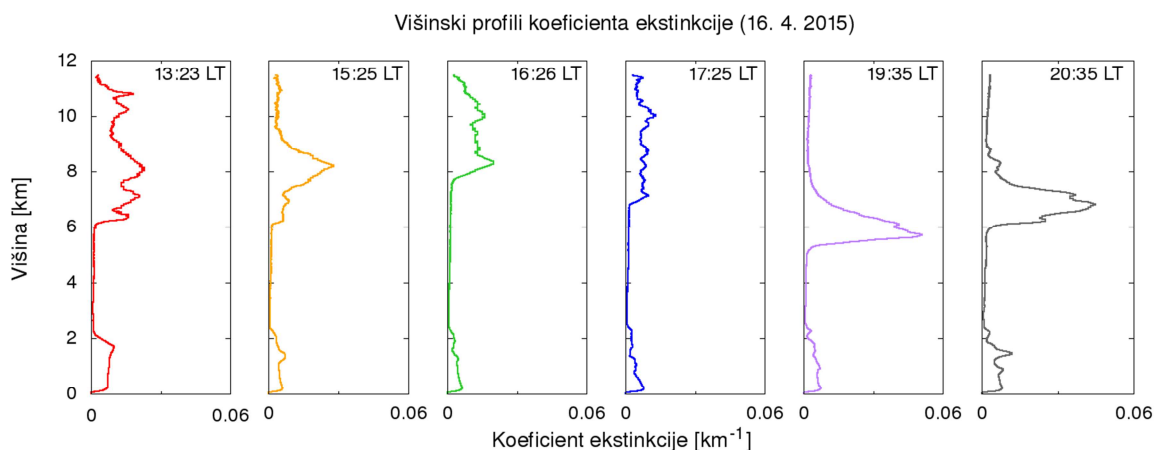
Obnašanje različnih plasti v ozračju je razvidno tudi iz višinskih profilov koeficienta atmosferske ekstinkcije (Slika 8 in Slika 9). V popoldanskih urah 16. 4. je bilo ozračje še pretežno jasno. Zgornja meja planetarne mejne plasti se je nahajala na višinah med 2 in 2,5 km, kar sovпада s strmim padcem ekstinkcijskega koeficienta nad to višino (Slika 8). Nad PBL pade vrednost koeficienta ekstinkcije praktično na nič, na višinah med 5 in 10 km, kjer je prisoten mineralni prah, pa ponovno naraste in doseže svoj maksimum. Ob prehodu vremenske fronte se je pooblačilo, kar je razvidno tudi iz koeficienta ekstinkcije (Slika 9), modra in zelena krivulja). Pojavi se močan vrh na višini med 2 in 4 km, kjer se je nahajala oblačna plast. Koeficient ekstinkcije je za oblake bistveno večji kot za plast mineralnega prahu.



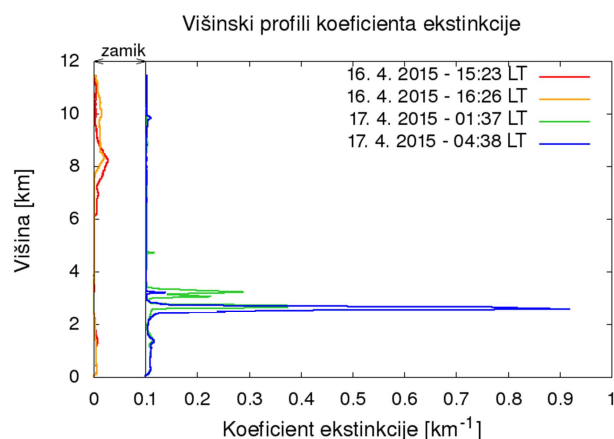
Slika 4 – Meteorološke razmere v času meritev mineralnega prahu, 16. 4. 2015: a) 5-dnevne povratne trajektorije modela HYSPLIT (Draxler & Rolph) prikazujejo prihod zračnih mas iz severne Afrike; b) Vetrovne razmere v dolini v času lidarskih meritev. Prevladoval je šibek zahodni veter, ki je ponoči z vremensko fronto prinesel oblake in padavine.



Slika 5 – Podrobna lidarska slika prizemne mejne plasti ob prisotnosti mineralnega prahu 16. 4. 2015 kaže 10-minutno glajeno povprečje lidarskega signala. V večernih urah je na višini med 1,5 in 2 km opazen nastanek oblačne plasti. Barvna skala predstavlja logaritem velikosti izmerjenega signala.



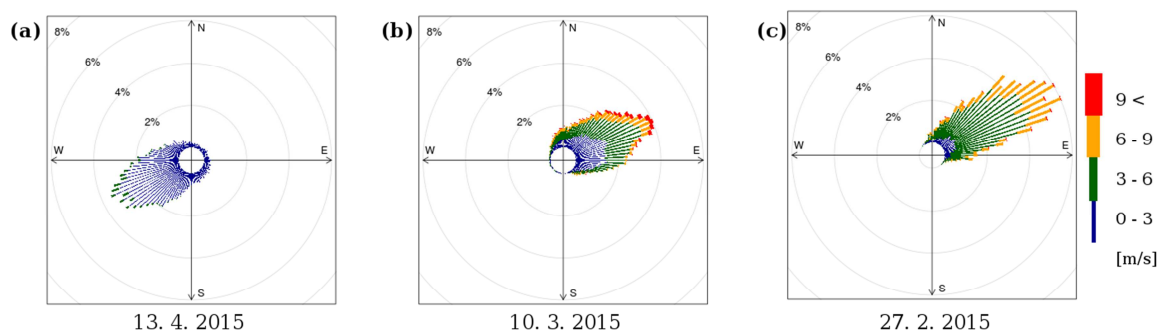
Slika 6 – Ekstinkcijski koeficient ob različnih časih tekom 16. 4. 2015. Na višinah med 0 in 2,0 do 2,5 km je razvidna prizemna mejna plast s povečanim koeficientom ekstinkcije. Nad to višino ekstinkcije praktično ni, pojavi pa se zopet na višinah med 5 in 10 km, kjer je bila prisotna plast mineralnega prahu.



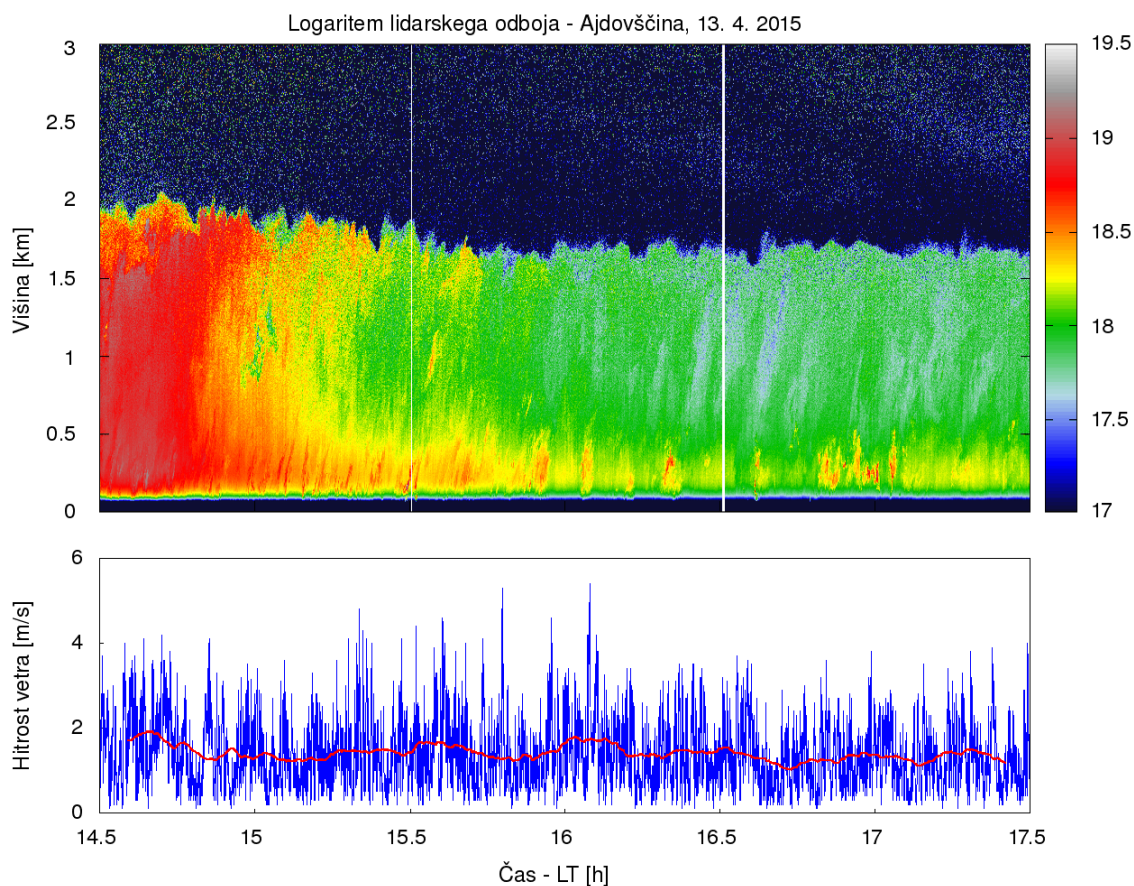
Slika 7 – Koeficient ekstinkcije v primeru jasnega vremena (rdeča in oranžna krivulja), kjer prevladuje plast aerosolov na višini približno 8 km, ter oblačnega vremena (modra in zelena krivulja), kjer prevladuje oblačna plast. Koeficient ekstinkcije za oblake je bistveno večji od koeficienta za mineralni prah. Profila za oblačno vreme sta zaradi boljše preglednosti zamaknjena za 0,1 glede na profila ob jasnem vremenu.

Vpliv vetra na porazdelitev aerosolov v ozračju

Podatke o hitrosti in smeri vetra z visoko časovno ločljivostjo neprekinjeno shranjujemo od februarja 2015 dalje. Za meritve uporabljamo ultrazvočni anemometer na strehi stavbe Univerze v Novi Gorici v Ajdovščini. Analiza smeri vetra za celotno obdobje meritev je pokazala tri prevladujoče smeri – jugozahodnik (JZ), jugovzhodnik (JV) in severovzhodnik (SV oziroma burja), ki dobro sovpadajo s potekom orografije v okolici Ajdovščine. Jugozahodnik je običajno šibek veter, pri katerem hitrosti vetra večinoma ne presegajo 5 m/s. Jugovzhodnik se pojavlja po prehodu vremenske fronte ali ob oslabitvi burje in v nekaterih primerih lahko dosega primerljive hitrosti kot zmerna burja (20 – 30 m/s). Najbolj značilen veter za Ajdovščino je zagotovo burja, ki ob svojem višku lahko preseže 50 m/s.



Slika 8 – Frekvenčna porazdelitev smeri in hitrosti vetra z vetrnimi rožami za izbrana obdobja z različno jakostjo vetra. a) 13. 4. 2015 – šibek JZ veter; b) 10. 3. 2015 – šibka burja; c) 27. 2. 2015 – zmerna burja.

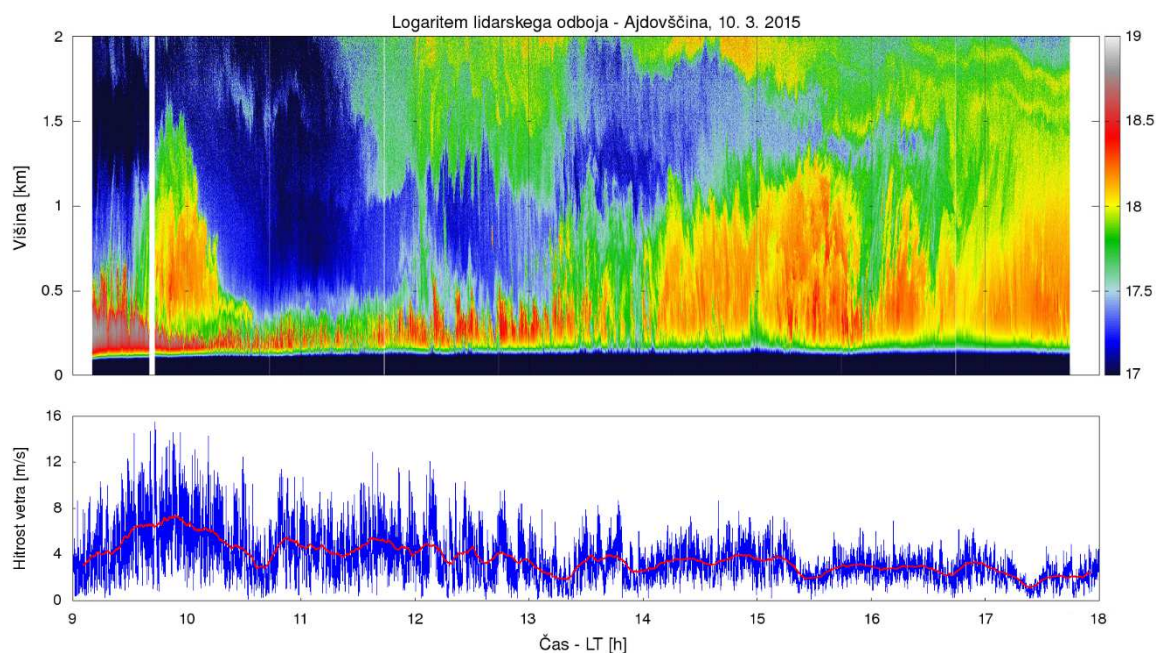


Slika 9 – Lidarske meritve in hitrost vetra ob šibkem JZ vetru dne 13. 4. 2015. Meritve so potekale v popoldanskem času. Slabjenje vertikalnega mešanja je posledica zmanjševanja sončnega obsevanja, ki je bilo do 15:00 še dovolj veliko, da so aerosoli dosegli vrh PBL. Kasneje se pojavljajo zgolj manjša vertikalna gibanja, ki ne premešajo celotne plasti. Barvna skala na grafu lidarskih meritev predstavlja logaritem velikosti izmerjenega

signala. Hitrost vetra je prikazana na intervalu med 0 in 6 m/s, kjer modra črta prikazuje trenutne meritve, rdeča pa je 1-minutno glajeno povprečje meritev.

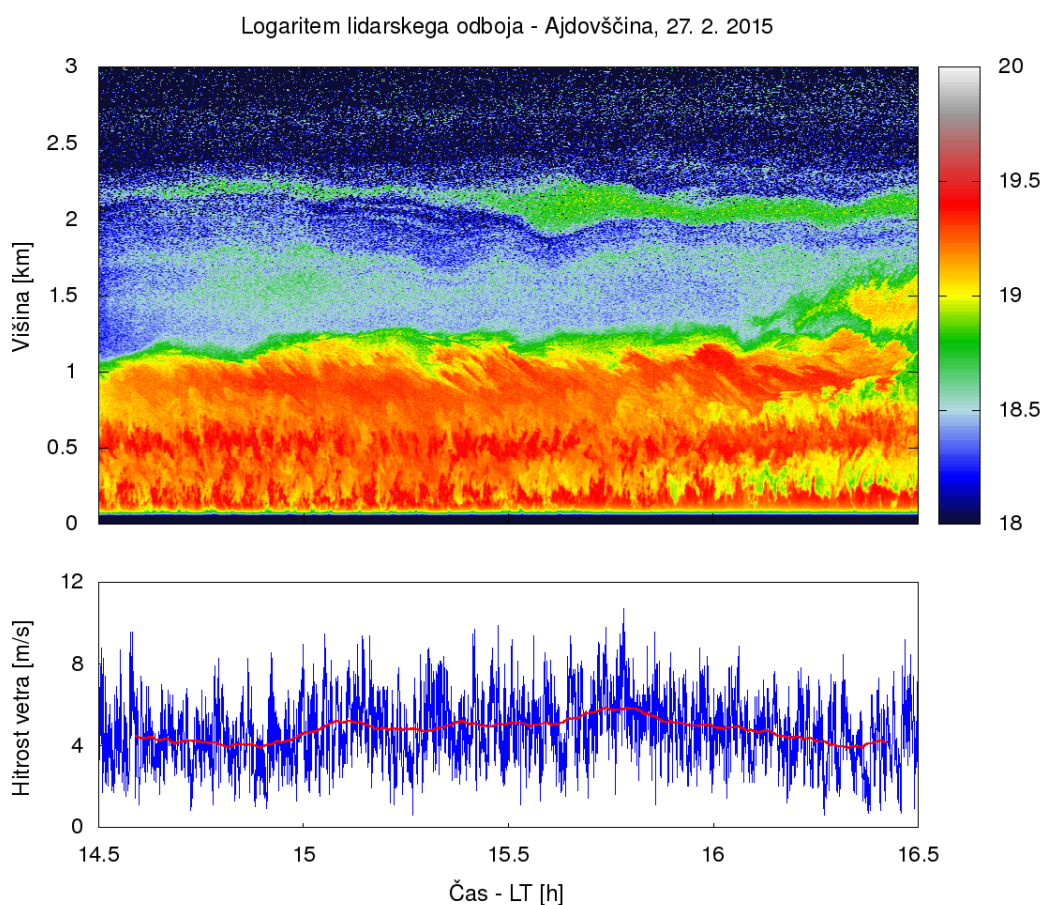
Vetrovne razmere v dolini močno vplivajo na koncentracije aerosolov in njihovo prostorsko porazdelitev. Pri interpretaciji točkovnih in lidarskih meritev aerosolov je zato informacija o hitrosti in smeri vetra ključna za ustrezno razlago stanja v atmosferi. V nadaljevanju so predstavljeni trije primeri sočasnih lidarskih in vetrovnih meritev ob različnih prevladujočih hitrostih in smereh vetra (Slika 10), ki kažejo na velike razlike v opaženi atmosferski strukturi. V prvem primeru z dne 13.4.2015 je pihal šibek JZ veter z najvišjo hitrostjo pod 6 m/s in povprečno vrednostjo okoli 2 m/s, vreme pa je bilo sončno in brez oblakov (Slika 10a, Slika 11). Zaradi nizke hitrosti vetra in sončnega obsevanja je bil opazen vertikalni razvoj PBL, kjer je mešanje potekalo po njeni celotni višini. Po 15:00 uri je začela višina PBL in vertikalno mešanje počasi upadati, kar sovpada z upadanjem moči sončnega obsevanja.

V drugem primeru smo dne 10. 3. 2015 opazovali pojav šibke burje z najvišjimi hitrostmi okoli 16 m/s in povprečno vrednostjo med 2 in 8 m/s (Slika 10b, Slika 12), ki so po 13:00 uri padle pod 6 m/s. Ob močnejšem vetru je bila višina PBL zelo nizka, vertikalni razvoj je poleg vetra zavirala tudi oblačna plast na višini nad 2 km. Po 13:00 uri, ko je veter oslabil, se je kljub spuščanju plasti oblakov začela višina PBL povečevati, mešanje aerosolov pa je podobno kot v primeru šibkega JZ vetra z dne 13. 4. 2015 zajelo celotno PBL.



Slika 10 – Lidarske meritve in hitrost vetra ob šibki burji dne 10. 3. 2015. Med 10:00 in 13:00 je bil veter še toliko močan, da je zaviral vertikalno mešanje, kar se odraža v tanjši plasti PBL. Z upadanjem hitrosti vetra je kljub prisotnosti plasti oblakov višina PBL začela naraščati. Po 16:00 uri se je oblačna plast spustila na višino okoli 1,5 km. Barvna skala na grafu lidarskih meritev predstavlja logaritem velikosti izmerjenega signala. Hitrost vetra je prikazana na intervalu med 0 in 16 m/s, kjer modra črta prikazuje trenutne meritve, rdeča pa je 1-minutno glajeno povprečje meritev.

V tretjem primeru smo dne 27. 2. 2015 opazovali atmosferske strukture ob zmerni burji (Slika 10c, Slika 13). Smer vetra kot tudi povprečna hitrost vetra sta bili na ta dan bolj stabilni kot v opazovanjih z dne 10. 3. 2015. Najvišje hitrosti vetra niso presegle 12 m/s, povprečna hitrost pa je bila 5 m/s. Ves čas meritev je bila zgornja meja PBL nekje med 1 in 1,2 km. Zaradi stalnega horizontalnega mešanja ozračja se vertikalne strukture ne morejo razviti skozi celotno PBL, zato je znotraj PBL možno razločiti tri plasti, kjer prihaja do vertikalnega mešanja. Nad PBL so skozi celoten čas meritev prisotni gravitacijski valovi, ki nastanejo ob prehodu zračnih mas čez orografsko oviro. Prisotnost gravitacijskih valov ob pojavu burje smo opazili tudi 24. 2. 2015, v preostalih primerih pa so jih zakrili nizki oblaki tik nad PBL.



Slika 11 – Lidarske meritve in hitrost ob zmerni burji, 27. 2. 2015. Ves čas meritev je bila PBL polna aerosolov, vendar zaradi prevetrenosti ni opaznega dviganja zračnih mas skozi celotno plast. Nad PBL so bili v čistejšem ozračju prisotni gravitacijski valovi, ki nastanejo kot posledica prehoda zračnih mas čez gorsko pregrado. Barvna skala na grafu lidarskih meritev predstavlja logaritem velikosti izmerjenega signala. Hitrost vetra je prikazana na intervalu med 0 in 12 m/s, kjer modra črta prikazuje trenutne meritve, rdeča pa je 1-minutno glajeno povprečje meritev.

Zaključek

Na podlagi izvedenih meritev lahko zaključimo, da je mogoče lidarske meritve porazdelitev koncentracij aerosolov v ozračju uporabiti za študij vrste atmosferskih procesov in struktur v zelo različnih vremenskih pogojih. Omogočajo nam vpogled v strukturo in dinamiko PBL ter njihovo odvisnost od meteoroloških spremenljivk, kot so smer in hitrost vetra v dolini ter sončno obsevanje, ki povzročajo horizontalno in vertikalno razširjanje aerosolov. Opazili smo manjše omejene strukture znotraj PBL, kot so na primer konveksijski stolpi, in gravitacijske valove, ki ob ustreznih vetrovnih pogojih (burja z določenimi lastnostmi) nastajajo nad PBL. Poleg lokalnih procesov lahko z daljinskim zaznavanjem spremljamo tudi aerosole v višjih slojih atmosfere, ki so posledica transporta aerosolov z zračnimi masami na večje razdalje. Predstavljen primer takega transporta je pojav mineralnega prahu iz S Afrike dne 16. 4. 2015, ki lahko v primeru depozicije prispeva k povišani koncentraciji delcev PM₁₀ (prašni delci velikosti do 10 μm) v dolini, spremenjeni velikostni porazdelitvi ter delčni sestavi aerosolov v PBL.

Atmosferski procesi, predvsem dnevna dinamika, odločilno vpliva na koncentracije aerosolov in ostalih onesnaževal iz antropogenih virov v PBL. Točkovne meritve vsebnosti in delčnih lastnosti aerosolov pri tleh kažejo, da se ob stabilnih atmosferskih pogojih v primerih povečanja lokalnih emisij (npr. kresovanje) lahko koncentracije v kratkem času zelo povečajo. Študijo emisij iz lokalnih izvorov bomo nadgradili s sočasnim prostorskim pregledovanjem z lidarjem (He et al., 2012), kar bo omogočilo vpogled v dinamiko razširjanja aerosolov znotraj Vipavske doline.

Zahvala

Raziskave je omogočila Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije v okviru financiranja raziskovalnega programa Daljinsko zaznavanje atmosferskih lastnosti (P1-0385 (E)) in usposabljanja mladih raziskovalcev na Univerzi v Novi Gorici.

Literatura

- Abdelkader, M., Metzger, S., Mamouri, R.E., Astitha, M., Barrie, L., Levin, Z., Lelieveld, J. (2015). Dust–air pollution dynamics over the eastern Mediterranean. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 9173–9189.
- Adachi, K., Zaizen, Y., Kajino, M., Igarashi, Y. (2014). Mixing state of regionally transported soot particles and the coating effect on their size and shape at a mountain site in Japan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119, 5386–5396.
- Draxler, R.R., Rolph, G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, College Park, MD.
- Drinovec, L., Gregorič, A., Remškar, M., Vaupotič, J., Močnik, G., Karg, E., Jakobi, G., Schnelle-Kreis, J., Zimmermann, R. (2015). Influence of coating on optical properties of carbonaceous aerosols, European Aerosol Conference, Milan.
- Gao, F., Stanič, S., Bergant, K., Bolte, T., Coren, F., He, T.Y., Hrabar, A., Jerman, J., Mladenovič, A., Turšič, J., Veberič, D., Iršič Žibert, M. (2011). Monitoring presence and streaming patterns of Icelandic volcanic ash during its arrival to Slovenia. *Biogeosciences* 8, 2351–2363.
- He, T.Y., Stanič, S., Gao, F., Bergant, K., Veberič, D., Song, X.Q., Dolžan, A. (2012). Tracking of urban aerosols using combined LIDAR-based remote sensing and ground-based measurements. *Atmospheric Measurement Techniques* 5, 891–900.

- Klett, J.D. (1981). Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. *Applied Optics* 20, 211–220.
- Knippertz, P., Todd, M.C. (2012). Mineral dust aerosols over the Sahara: Meteorological controls on emission and transport and implications for modeling. *Reviews of Geophysics* 50.
- Kojima, T., Buseck, P.R., Iwasaka, Y., Matsuki, A., Trochkin, D. (2006). Sulfate-coated dust particles in the free troposphere over Japan. *Atmospheric Research* 82, 698–708.
- Kovalev, V.A., Eichinger, W.E. (2004). *Elastic Lidar: Theory, Practice and Analysis Methods*. John Wiley & Sons, New Jersey
- Lohmann, U., Feichter, J. (2005). Global indirect aerosol effects: a review. *Atmospheric Chemistry and Physics* 5, 715–737.
- McGrath-Spangler, E.L., Molod, A., Ott, L.E., Pawson, S. (2015). Impact of planetary boundary layer turbulence on model climate and tracer transport. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15, 7269–7286.
- Petzold, A., Ogren, J.A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S.M., Baltensperger, U., Holzer-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A., Zhang, X.Y. (2013). Recommendations for reporting "black carbon" measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13, 8365–8379.
- Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angew Chem Int Ed Engl* 44, 7520–40.
- Pósfai, M., Buseck, P.R. (2010). Nature and Climate Effects of Individual Tropospheric Aerosol Particles. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 38, 17–43.
- Quan, J., Gao, Y., Zhang, Q., Tie, X., Cao, J., Han, S., Meng, J., Chen, P., Zhao, D. (2013). Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations. *Particuology* 11, 34–40.
- Sandradewi, J., Prévôt, A. S. H., Szidat, S., Perron, N., Alfarra, M. R., Lanz, V. A., Weingartner, E., and Baltensperger, U. (2008). Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter. *Environmental Science & Technology* 42, 3316–3323.
- Shibata, T., Kinoshita, T. (2016). Volcanic aerosol layer formed in the tropical upper troposphere by the eruption of Mt. Merapi, Java, in November 2010 observed by the spaceborne lidar CALIOP. *Atmospheric Research* 168, 49–56.
- Wonaschütz, A., Demattio, A., Wagner, R., Burkart, J., Zíková, N., Vodička, P., Ludwig, W., Steiner, G., Schwarz, J., Hitzemberger, R. (2015). Seasonality of new particle formation in Vienna, Austria – Influence of air mass origin and aerosol chemical composition. *Atmospheric Environment* 118, 118–126.