

# Satelit Aeolus Evropske vesoljske agencije in njegov potencial za napredek pri napovedovanju vremena nad Evropo

Nedjeljka Žagar in Matic Šavli

*Katedra za meteorologijo  
Fakulteta za matematiko in fiziko, Univerza v Ljubljani*

20. avgust 2018

**Konec avgusta 2018 bo Evropska vesoljska agencija izstrelila Aeolus, prvi satelit za globalno merjenje profilov vetra iz vesolja. Aeolus bo v vesolje ponesel instrument Aladin, ki na principu Dopplerskega lidarja zaznava gibanje molekul zraka (Rayleighjevo sipanje) in delcev (Miejevo sipanje) v atmosferi od tal do približno 30 km višine. Sodelavci Katedre za meteorologijo UL-FMF so vpeti v misijo Aeolus od leta 2000. Leta 2005 je Svetovna meteorološka organizacija nagradila naš članek o potencialnem vplivu meritev vetra Aeolusa z letno nagrado za mlade raziskovalce. V preteklih nekaj letih smo razvili sistem za napovedovanje vremena nad Evropo in severnim Atlantikom, s katerim smo kot prvi pokazali potencialni vpliv meritev Aeolusa na izboljšanje kvalitete napovedi v prognostičnem modelu za omejeno območje. Čeprav je Aeolus narejen za potrebe globalnih prognostičnih modelov, bodo njegove meritve v kratkem uporabljene v večini prognostičnih modelov v Evropi.**

## Osnovni podatki o Aeolusu

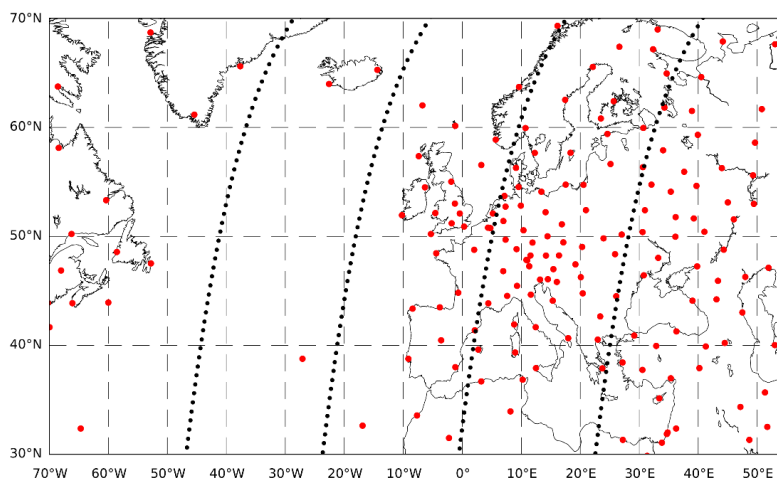
V naslednjih dneh avgusta bo Evropska vesoljska agencija izstrelila prvi satelit za merjenje profilov vetra iz vesolja. Misija poimenovana Aeolus je bila izbrana leta 1999 kot ena izmed misij v okviru programa za razvoj novih tehnologij za opazovanje Zemljinega ozračja. Najprej poimenovana Atmosferska dinamična misija-Aeolus, pozneje pa kratko Aeolus, je ta misija rezultat večletnega razvoja Dopplerjevega lidarja za merjenje zamika zaradi sipanja svetlobe na delcih in molekulah zraka v atmosferi [1].

Aeolus je polarno-orbitalni satelit in bo lansiran v orbito na približno 400 km višine. Dopplerjev lidar Aladin meri radialno komponento hitrosti gibanja delcev (ang. Line Of Sight, LOS) v smeri, ki jo določa usmerjenost lidarja. Ta predstavlja linearno kombinacijo meritev zonalne, meridionalne in vertikalne komponente vetra. Aeolusove meritve vetra tipa LOS bodo bistveno drugačne od tistih, izmerjenih s konvencionalnimi opazovalnimi sistemi kot so sondažne ali letalske meritve, ki merijo vektor horizontalnega vetra. Na večjih prostorskih skalah, še posebej v zmernih zemljepisnih širinah, je vertikalna hitrost v povprečju nekaj velikostnih redov manjša od horizontalne hitrosti kot posledica približnega ravnovesja med vertikalno komponento sile gradienta tlaka in teže. Ob predpostavki, da je vertikalna hitrost zanemarljiva, meri Aeolus horizontalno komponento vetra v smeri meritve lidarja oziroma ang. "Horizontal Line-Of-Sight" (HLOS).

Aeolus je postavljen v orbito sinhrono z vrtenjem Zemlje z inklinacijo 97 stopinj, tako da sonce na območje pod satelitom vedno sije pod istim kotom (ang. sun-synchronous orbit). Lidar je obrnjen pod kotom 90 stopinj na smer potovanja in nagnjen pod kotom 35 stopinj stran od Sonca. Satelit Aeolus vsak dan dvakrat preleti isto točko na Zemlji. V 6 urah satelit približno štirikrat prečka območje Severnega Atlantika in Evrope. Razdalja med sosednjima orbitama varira glede na zemljepisno širino in je manjša v zmernih širinah, kjer znaša okoli 700 km.

## Kako deluje Aeolus: Dopplerjev lidar za merjenje vetra

Inštrument Aladin generira serijo pulzov, ki se na poti skozi ozračje sipljejo na molekulah zraka in večjih delcih v vseh smereh. Valovna dolžina lidarja v območju ultravijoličnega dela elektromagnetnega spektra, pri valovni dolžini 355 nm, omogoča, da je absorbcija na prevladujočih molekulah ozračja ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$ ), zanemarljivo majhna. Del signala, ki se siplje nazaj v prostorski kot satelitskega sprejemnika, je, zaradi zaradi gibanja molekul in delcev, fazno zamaknjen. Hitrost premikanja molekul in delcev je sorazmerna z faznim zamikom, iz česar se lahko oceni hitrost vetra na mestu, kjer se je signal prvotno sipal.



*Slika 1: Šest ur orbitalnih preletov ADM-Aeolus nad Severnim Atlantikom in Evropo. Črne točke prikazuje lokacijo opazovanj Aeolusa z razdaljo okoli 90 km. Rdeče točke prikazujejo obstoječe sončne meritve v 24 urah. Vir: [2].*

Aladin omogoča dva skoraj povsem ločena načina merjenja hitrosti vetra. V prvem se analizira Rayleighov del spektra laserske svetlobe, sipane na molekulah zraka. Njihova porazdelitev oziroma gostota zraka po višini je opisana z eksponentno funkcijo. Čeprav so meritve vetra s pomočjo Rayleighovega spektra teoretično možne skozi debel sloj atmosfere, so zaradi majhne koncentracije molekul meritve omejene na spodnjih  $\sim 25$  km. Izračun hitrosti pa mora upoštevati Brownovo gibanje molekul zraka, ki je odvisno od temperature in tlaka zraka in povzroča glavni vir napak pri merjenju faznega zamika. Drugi način meritev je sipanje laserskega signala na večjih delcih, kot so aerosoli in prašni delci, t.i. Miejevo sipanje. Njihova porazdelitev se v času in prostoru

močno spreminja, višje koncentracije delcev so ponavadi prisotne v spodnjem delu atmosfere. Zato je merjenje vetra iz Miejevega dela spektra omejeno na spodnjih ~15 km. V povprečju je v atmosferi značilno manj Miejevega kot Rayleighovega sipanja, ampak so pričakovane napake pri meritvah zaradi sipanja na delcih zraka manjše.

Zaradi velike nedoločenosti izračuna hitrosti vetra iz posameznega laserskega pulza je za uporabo meritev Aeolus potrebno akumulirati okoli 20 pulzov. Pri hitrosti gibanja satelita približno 7.6 km/s in frekvenci laserskih pulzov 50 Hz, je meritev pridobljena s povprečevanjem 20 pulzov reprezentativna za območje ~3 km. Takšen produkt je obremenjen z znatno nedoločenostjo in ga je treba dodatno povprečiti, da bi bila opazovanja Aeolusa primerna za uporabo v modelih za prognozo vremena. Privzeta dodatna akumulacija približno 30 meritev prispeva osnovni produkt Aeolusa - vertikalni profil komponente vetra LOS, ki predstavlja povprečen veter na razdalji okoli 90 km. Tako izbrana privzeta horizontalna ločljivost profilov vetra ustreza zahtevam Svetovne meteorološke organizacije, da je nezanesljivost opazovanj Aeolusa primerljiva (oziroma manjša) napakam sondažnih meritev [3]. Vertikalna hitrost vetra je pri privzeti ločljivosti tipično zanemarljiva.

Podobno kot je definirano povprečevanje v horizontalni smeri, je združevanje posameznih meritev potrebno tudi v vertikali. To je privzeto tako, da je v celotnem profilu približno 21 meritev z vertikalno ločljivostjo, ki znaša okoli 500 m v spodnjih slojih ozračja in okoli 2 km v zgornjih slojih za Rayleighove meritve oziroma 1 km za meritve tipa Mie. Vertikalno ločljivost bo možno spreminjati med delovanjem satelita. Podobno lahko uporabniki meritev Aeolusa spreminjajo privzeto razdaljo za horizontalno akumulacijo z 90 km na manjše razdalje ob naraščanju napake meritev.

## **Pomen Aeolusa**

Svetovna meteorološka organizacija je že pred časom razglasila vertikalne profile vetra oziroma njihovo globalno dostopnost kot najbolj pomemben manjkajoči del globalnega opazovalnega sistema. Čeprav satelitske meritve vsak dan prispevajo milijone opazovanj ozračja, prevladujejo opazovanja polja mase (večinoma temperature), katerih je mnogo več kot opazovanj vetra. Pregled aktualnih meritev uporabljenih za napovedovanje v vodilnem modelu za globalne napovedi vremena, modelu ECMWF, je dostopen na spletni strani <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/quality-our-forecasts/monitoring-observing-system>.

Čeprav je satelitskih meritev veliko in omogočajo globalno pokritost, njihova kvaliteta ponavadi ni primerljiva s kvaliteto konvencionalnih opazovanj kot so sondaže in letalske meritve. Pri konvencionalnih meritvah so opazovanja vetra in temperature tudi približno enako zastopana, kar ne velja za satelitska opazovanja. Meritve vetra trenutno opravljamo s sondažami in letali ter nekaterimi opazovalnimi sistemi s tleh, kot so Doplerjev lidar in radar ter iz satelitskega spremljanja oblakov. Slednje se uporabi za oceno gibanja oblakov, t.i. vektor gibanja oblaka (ang. Cloud Motion Vectors ali Atmospheric Motion

Vectors). Sateliti merijo tudi veter na površini morja s t.i. skaterometri in pasivnimi instrumenti, ki delujejo v mikrovalovnem območju elektromagnetnega spektra. Manjkajoči satelitski prispevek globalnem opazovalnem sistemu so prav vertikalni profili vetra, ki jih bo priskrbel Aeolus.

## **Potencialni vpliv meritev Aeolusa**

Številne študije so raziskale potencial meritev Aeolusa v globalnih sistemih za napovedovanje vremena. Na splošno pričakujemo, da bo globalna pokritost z meritvami profilov vetra Aeolus pozitivno vplivala na kvaliteto prognostičnih modelov predvsem na območjih, kjer opazovanj vetra trenutno ni, kot je tropski pas in oceani. Sicer bodo nova opazovanja koristna povsod in za opis procesov, pri katerih je sklopitev med poljem mase in poljem vetra šibka.

Najbolj pozitiven vpliv v vodilnem globalnem prognostičnem modelu ECMWF se pričakuje v tropskih predelih. Študijo vpliva meritev Aeolusa na kvaliteto opisa tropske cirkulacije N. Žagar je leta 2005 Svetovna meteorološka organizacija nagradila z eno izmed dveh letnih nagrad za najboljše mlade raziskovalce na področju meteorologije [4]. Izboljšanje 6-dnevne napovedi v tropskih območjih je lahko tudi do 2 dni. Bolj zanesljivi začetni pogoji za napoved v tropskih predelih pozitivno vplivajo na večdnevno napoved nad severno poloblo in Evropo.

Uporabnost opazovanj v modelih višje ločljivosti za omejeno območje (mezoskalni modeli, ang. mesoscale ali limited-area model) je vprašljiva predvsem zaradi relativno majhnega števila opazovanj. Osnovni namen mezoskalnih modelov je bolj natančno opisati vremenske pojave na manjših prostorskih in krajših časovnih skalah, ki jih globalni modeli zaradi slabše ločljivosti ne morejo predstaviti. Opazovanja Aeolusa pa niso predvidena za opazovanje tovrstnih pojavov. Ne glede na to je zaradi pomanjkanja opazovanj profilov vetra pomembno uporabiti čimveč dostopnih opazovanj in bi meritve Aeolusa lahko izboljšale tudi napoved v mezoskalnih modelih, če bi opazovanja bila dostopna ob pravem času. Vertikalni profili vetra opisujejo striženje vetra, ki je v zmernih zemljepisnih širinah ključno pri razvoju ciklonov in mezoskalnih nevihtnih sistemov.

V povezavi s tem je na Katedri za meteorologijo na UL-FMF med letoma 2012 in 2016 potekal projekt z naslovom "Mezoskalni profili vetra in asimilacija podatkov za numerično napovedovanje vremena" (ang. "Mesoscale wind profiles and data assimilation for numerical weather prediction"), ki ga je financirala Evropska vesoljska agencija v okviru programa za pridruževanje Slovenije Evropski vesoljski agenciji. Osnovni cilj projekta je vredotenje novih opazovanj vetra na območju Severnega Atlantika in Evrope v mezoskalnih modelih.

V okviru projekta je postavljen napredni sistem za asimilacijo opazovanj Aeolusa v mezoskalni model. Novi sistem uporablja najbolj napredne metode priprave začetnih pogojev in je sklopljen z modelom ECMWF. Pridobljeni rezultati nakazujejo, kako lahko opazovanja HLOS prispevajo k izboljšanju napovedi vremena nad Evropo tudi v mezoskalnih modelih [5]. To velja še posebej v

primeru, ko satelit prispeva opazovanja profilov vetra nad frontami v Severnem Atlantiku, ki se hitro premikajo nad zahodno Evropo in lahko povzročijo ekstremne vremenske pogoje. Pri koncu projekta je bila v Ljubljani na UL-FMF organizirana delavnica, ki je povzela izzive pri izboljšanju napovedi vremena na visoki ločljivosti [6].

Če bo misija Aeolus uspešna, bo morda njena naslednica vključevala dva ali več satelitov na podobnem principu. S pomočjo dveh satelitov se želi izboljšati pokritost zemeljske površine z meritvami in tudi pridobiti boljšo informacijo o celotnem vektorju vetra. Ena izmed tovrstnih študij je bila opravljena za Evropsko organizacijo za meteorološke satelite (EUMETSAT) na Katedri za meteorologijo UL-FMF že v letih 2005-2006 [7].

## Literatura

- [1] Stoffelen, A. in sod., 2005: The atmospheric dynamics mission for global wind field measurement. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86, 73–87. Dostopno na <https://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/BAMS-86-1-73>.
- [2] Šavli, M. in N. Žagar, 2018: ADM-Aeolus: zgodovinski korak v merjenju vetra iz vesolja in priložnost za izboljšanje napovedi vremena. V: Kuhar, M. in sod.: *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2017: Zbornik del*, 23. srečanje Slovenskega združenja za geodezijo in geofiziko, 25-44. Dostopno na <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati.htm>
- [3] WMO, 2014: Global observations system. Dostopno na <http://www.wmo.int/pages/prog/www/OSY/GOS.html>
- [4] Žagar, N., 2004: Assimilation of Equatorial Waves by Line-of-Sight Wind Observations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61, 1877–1893. Dostopno na [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2004\)061<1877:AOEWBL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<1877:AOEWBL>2.0.CO;2)
- [5] Šavli, M., N. Žagar in J.L. Anderson, 2018: Assimilation of the horizontal line-of-sight winds with a mesoscale EnKF data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, v tisku.
- [6] Žagar, N. in sod., 2017: Summary of Ljubljana workshop on Mesoscale data assimilation and the role of winds in limited-area models for NWP in Europe. *ALADIN-HIRLAM Newsletter*, 8, 119-123. Dostopno na <http://www.umar-cnrm.fr/aladin/meshtml/NL8-final.pdf>.
- [7] Žagar, N. in sod., 2008: Impact assessment of simulated Doppler wind lidars with a multivariate variational assimilation in the Tropics. *Monthly Weather Review*, 136, 2443–2460. Dostopno na <https://doi.org/10.1175/2007MWR2335.1>