

Kaj vse za potrebe napovedovanja in opazovanja vremena in klime merimo s satelitov

Jože Rakovec* in Nedjeljka Žagar*

Povzetek

Podan je pregled preko glavnih načinov merjenja meteoroloških spremenljivk na daljavo – s satelitov. Opisane so glavne lastnosti polarno-orbitalnih in geostacionarnih meteoroloških satelitov in merenj z njih. Pri tem je razloženo, zakaj so ta merjenja – poleg kvalitete že močno izpopolnjenih meteoroloških numeričnih modelov za simuliranje dogajanj v ozračju – bistvena za kvaliteto in uspešnost vsakodnevnih operativnih napovedi vremena. Na kratko je tudi opisan zgodovinski razvoj na tem področju. Opisano je, kako lahko z radiometričnimi meritvami navzdol dobimo informacije o vertikalnem poteku temperature in vlažnosti zraka nad množico točk na Zemlji od tal pa tja do približno 50 km visoko nad tlemi. Taka merjenja omogoča dejstvo, da je emisivnost plinov v ozračju pri različnih valovnih dolžinah – poleg odvisnosti od temperature teh plinov – tudi nekoliko odvisna od tlaka teh plinov in s tem od višine, kjer se le-ti nahajajo – in to za vsako valovno dolžino malo drugače. S satelitov pa merimo tudi marsikaj drugega: npr. polje vetra v višinah na podlagi meritev premikanja oblakov ali pa vetra pri tleh nad oceani na podlagi meritev hrapavosti morske površine, vsebnosti ozona in drugih primesi v ozračju in še marsikaj.

Uvod

Skoraj vsak odrasel človek pri nas ve, da meteorologija veliko uporablja podatke, dobljene s pomočjo satelitov. Vendar pa velika večina misli, da gre pri tem predvsem za slike – predvsem za slike oblačnosti. Te namreč vsak dan lahko vidijo npr. na televiziji. Toda tudi glede slik so ljudje rahlo v zmoti. Slike namreč izgledajo, kot da bi bile posnete v vidni svetlobi, kar pa nam ponoči ne bi nič pomagalo, ker je »ponoči vsaka krava črna«. Zato ker nas zanimajo razmere tudi ponoči, so od satelitskih slik najpomembnejše tiste, posnete v infrardeči (IR) »svetlobi«. Vse kar je na Zemlji, namreč seva (v skladu s Planckovim in Stefanovim zakonom), in to tem bolj, čim topleje je. IR sevanje omogoča, da senzorji na satelitih »gledajo« navzdol tako podnevi kot ponoči. Ker infrardeče svetlobe naše oči ne vidijo, meteorologi predelamo infrardeče slike tako, da so podobne slikam, ki bi jih videli podnevi ob sončni svetlobi. Le-ta se močno odbija od belih oblakov in od z ledom in snegom prekritih območij Zemlje, nekaj manj od rumenorjavih puščavskih predelov, še manj od zelenih območij, ki jih pokriva vegetacija, ali pa od temnomodrih oceanov. Tako so tudi na predelanih IR slikah mrzli vrhovi oblakov in ledeni predeli umetno pobarvani belo, pa čeprav ti – najbolj mrzli – predeli v resnici najmanj »svetijo« navzgor proti senzorjem na satelitih.

* oba: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Oddelek za fiziko, Katedra za meteorologijo, Jadranska 19, Ljubljana in Center odličnosti Vesolje-SI, Aškerčeva 12, Ljubljana



Slika 1: Sedanji sistem satelitov, namenjenih opazovanju Zemlje. [Podrobneje](#) so predstavljeni samo meteorološki sateliti in tisti, ki so neposredno uporabni za meteorologijo. Tisti sateliti, ki krožijo nad ekvatorjem od zahoda proti vzhodu s točno tako hitrostjo, kot se pod njimi vrti Zemlja (na višini malo manj kot 35 tisoč km), so tako vedno nad istim predelom – zato jim rečemo geostacionarni sateliti. Sateliti na nižjih krožnicah (okrog 800 km visoko) krožijo okrog Zemlje hitreje (eno obkroženje Zemlje v kaki uri in pol), tako da ponavadi obkrožijo Zemljo večkrat dnevno z orbitami približno preko obeh polov – zato jim rečemo polarno-orbitalni sateliti. Vir: EUMETSAT, Copyright 2011 © EUMETSAT, iz http://www.eumetsat.int/eps_webcast/eps/print.htm#s1p1 povzeto 3. 1. 2011.

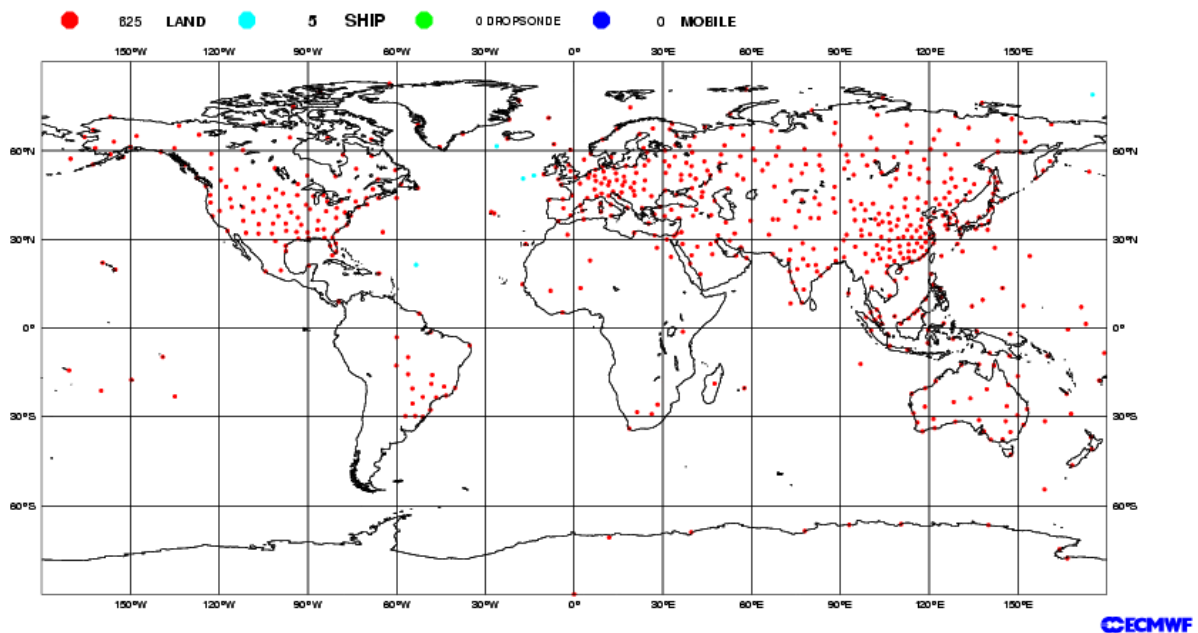
Pomembnost sondiranja skozi ozračje za napoved vremena

Vreme se spreminja predvsem v troposferi – v plasti ozračja, ki sega od tal pa tja do višine kakih 8 do 9 km nad polarnimi predeli in do višine kakih 15 do 16 km nad ekvatorialnimi predeli. V tej plasti npr. nastajajo oblaki in padavine. Toda tudi zračni tokovi v stratosferi imajo vpliv na troposfero. Zato moramo za potrebe napovedovanja vremena poznati razmere ne samo pri tleh, temveč po vsem ozračju – od tal skozi troposfero in stratosfero do višine dobrih 50 km nad tlemi. Kako dobiti podatke s teh višin, ki jih potrebujemo kot vhodne, začetne podatke za računanje vremenskih spremenljivk za teden ali največ dva tedna vnaprej?

Pred raketno in satelitsko dobo smo si pomagali samo z meteorološkimi instrumenti, ki so jih dvigali v višine zmaji, baloni ali letala. Tako zmaji kot letala in baloni s posadko so tedaj imeli precej omejeno zmožnost poletov visoko v ozračje. Poleg tega pa so se morale posadke najprej spustiti nazaj na tla ter nekako posredovati podatke tistim, ki so jih potrebovali – kar je pomenilo velike časovne zaostanke. Zato so bili ti podatki koristni predvsem za raziskave »a posteriori« in skoraj neuporabni za sprotne napovedi vremena. Pravi preboj glede meritev temperature, vlažnosti, zračnega tlaka in vetra navzgor skozi ozračje se je zgodil šele potem,

ko so Francoz Robert Bureau (1929), Rus Pavel Molčanov (1930) in Finec Vilho Väisälä (1931) ter še nekateri skonstruirali prve radiosonde (glej npr. Pitkanen, 1986), to je naprave, ki so izmerjene vrednosti sproti po radijski povezavi sporočale sprejemnim postajam na tleh. Predvsem je pomemben Väisälä, ki je leta 1936 ustanovil tudi podjetje za izdelavo radiosond ter s tem to napravo naredil široko uporabno. (Podjetje Väisälä je še danes eno od vodilnih proizvajalcev radiosond in drugih meteoroloških merilnih instrumentov.) Z radiosondami smo tako pričeli dobivati podatke približno do višine okrog 10 ali 15 km nad tlemi in predvsem na teh podatkih je slonela napoved vremena vse do dobe merjenja s satelitov. Tedanja (in še vedno tudi sedanja – kot kaže Slika 2) pomanjkljivost pa je bila (in je še), da radiosonde seveda spuščamo v zrak predvsem s kopnega, medtem ko so širni oceani, ki pokrivajo okrog 2/3 površja Zemlje, nepokriti s podatki – le tu in tam z radiosondo merijo s kakega otoka ali ladje.

ECMWF Data Coverage (All obs DA) - TEMP
04/JAN/2011; 00 UTC
Total number of obs = 630



Slika 2: Radiosondni podatki, uporabljeni v Evropskem centru za srednjeročno napoved vremena, za katero so izračun pognali 4. januarja 2011 ob 00 UTC: na razpolago je bilo 630 radiosondnih meritev in oceani so bili skoraj brez podatkov. (Poleg teh je bilo ob tej napovedi uporabljenih še 30440 meritev pri tleh, 9925 meritev na morskih bojah, 1716 meritev profilov vetra s tal, 42736 meritev, ki so jih opravila letala na svojih linijah, ter mnoge druge meritve s satelitov.) Vir: ECMWF, © ECMWF,

[http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w coverage!latest/](http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w%20coverage!latest/) povzeto 4. 1. 2011.

Predhodnik sodobne napovedi vremena na osnovi računanja sprememb meteoroloških spremenljivk s pomočjo fizikalnih enačb je bil Norvežan Vilhelm Bjerknes. Kakšne so te enačbe? Npr. da pospeševanje zraka (in s tem spremembe vetra) povzročajo sile, ki delujejo na zrak. Ali pa, da povečanje temperature zraka povzročajo ali dovod toplote temu zraku ali

stiskanje zraka ali pa kondenzacija vodne pare, ki se v zraku spreminja iz plinastega stanja v tekoče kapljice. Take enačbe (le da s precej bolj podrobnim opisom dogajanj v ozračju) uporabljamo še danes. Prvi, ki je res naredil tak izračun, in to z “računanjem peš” – to pomeni s svinčnikom (in z radirko) na papir – pa je bil Anglež Lewis Fry Richardson (1922, 2007). On je seveda računal »za nazaj« – kajti računal je več mesecev, da je dobil rezultate za en dan vnaprej. Žal je bila Richardsonova napoved napačna. Meteorologi dolgo nismo zanesljivo vedeli, kaj je bil glavni vzrok za neuspeh. Šele leta 2000 je Peter Lynch iz Irske meteorološke službe (glje npr. Lynch, 2006) nedvoumno pokazal, da je Richardson uporabil prave enačbe, da je postopal pravilno, da se pri računanju ni niti enkrat zmotil – toda “pokopali” so ga premalo natančni začetni podatki (predvsem tisti o vetru v višinah). Napoved vremena je namreč odvisna od začetnih pogojev (torej od aktualnega vremena), ki jih pripravimo s pomočjo opazovanj. V postopku priprave začetnih pogojev (ti. asimilacije) je potrebno upoštevati dejstvo, da opazovanja in fizikalne enačbe niso perfektni. Zelo majhne napake pri obdelavi začetnih pogojev lahko zelo hitro naraščajo in »uničijo« napoved, tako kot se je zgodilo Richardsonu.

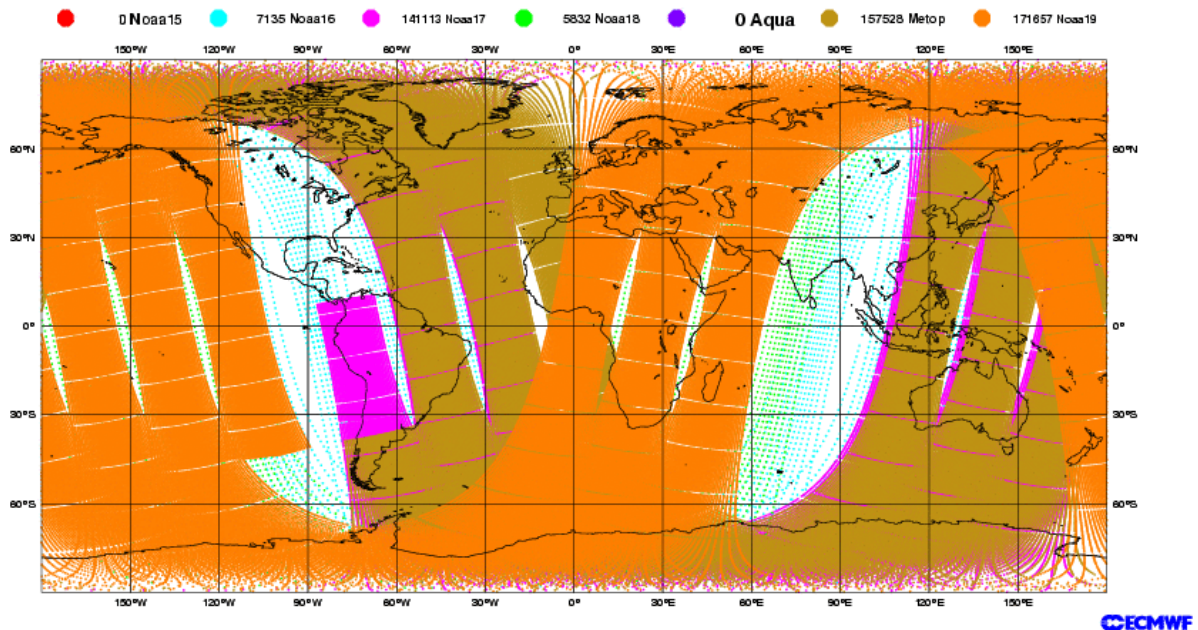
Šele po 2. svetovni vojni so potem meteorologa Jule Charney in Ragnar Fjørtoft ter matematik John von Neumann (1950) s pomočjo še nekaterih sodelavcev spet izračunali napoved vremena – tokrat s pomočjo računalnika ENIAC, ki so ga malo pred tem razvili v Penn State University. Za prvo uspešno numerično napoved vremena so bile sicer uporabljene filtrirane enačbe, ki so napovedovale gibanje vremenskih sistemov v srednji troposferi in možnost ciklonalnega razvoja, ampak niso omogočale opisa poteka vremena pri tleh.

Uspeh ENIAC-a je odprl novo dobo za napovedovanje vremena – z numeričnimi modeli ozračja. Računanje je z računalnikom potekalo dovolj hitro, da so bili rezultati uporabni za napoved za »naslednji dan«. In tako je ta metoda nekako okrog 1970 prevladala nad prejšnjo metodo. Istočasno so se meteorologi spet, tokrat uspešno, vrnil k napovedovanju vremena z osnovnimi enačbami, kakršne je uporabil Richardson. Ob tem pa se je postopoma pokazalo, da sta premajhna natančnost podatkov in predvsem nad oceani njihova daleč premajhna gostota, resni oviri za zanesljive napovedi za več kot dan ali dva vnaprej. Pokazala se je potreba po dodatnih podatkih, ki bi dovolj na gosto in primerno natančno pokrivali vse ozračje okrog in krog zemeljske oble od tal do velikih višin. Rešitev so bili radiometri na satelitih.

Meritve profilov temperature in vlažnosti navzdol skozi ozračje z radiometri na satelitih

Danes so sateliti nepogrešljivi za potrebe napovedi vremena. V ECMWF so za že omenjeno napoved vremena uporabili skoraj milijon radiometričnih meritev s satelitov!

ECMWF Data Coverage (All obs DA) - HIRS
04/JAN/2011; 00 UTC
Total number of obs = 483265



Slika 3: Primer radiometričnih meritev navzdol skozi ozračje s satelitov: podatki, uporabljeni v Evropskem centru za srednjeročno napoved vremena, za katero so izračun pognali 4. januarja 2011 ob 00 UTC: na razpolago je bilo 483265 meritev v vidnem in infrardečem (IR) območju (merilnik HIRS) – gornja slika, poleg teh pa še preko 950000 radiometričnih podatkov v mikrovalovnem (MW) območju: za vertikalne profile temperature in vlažnosti zraka (merilnika AMSU-A, λ od 3,4 mm do 1,25 cm in AMSU-B, λ od 1,6 mm do 3,3 mm) s šestih satelitov, štirih NOAA 15-18, Aqua in Metop – skupaj torej več kot milijon podatkov za določanje profilov temperature in vlažnosti skozi ozračje. Bistvena je – poleg točnosti, ki je primerljiva s točnostjo radiosond – pokritost vsega ozračja krog in krog Zemlje od tal do zgornje stratosfere. Ločljivost po horizontali je 15 km za HIRS in AMSU-B in 48 km za AMSU-A, kar je za sondiranje temperature in vlažnosti dokaj zadovoljivo, saj se ti dve količini v višjih plasteh ozračja po horizontali le počasi spreminjata. (Poleg teh podatkov je bilo v isto napoved vključenih še okrog pol milijona satelitskih podatkov o hrapavosti morske površine – kar je odvisno od vetra pri tleh, nekaj manj kot 124000 podatkov o ozonu, pa podatki o zakasnitvi signalov GPS – kar je odvisno od vlažnosti v ozračju, ter malo manj kot 44000 podatkov izmerjenih v mikrovalovnem območju – podatki nad oceani in še drugi podatki s satelitov).

Vir: ECMWF, © ECMWF

http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w_coverage!latest/, povzeto 4. 1. 2011.

Kako je mogoče s satelitov meriti profile temperature in vlažnosti skozi ozračje

V ozračju so poleg dvoatomnih dušika N_2 in kisika O_2 , ki predstavljata skoraj 99 % vse mase ozračja, tudi tri- in večatomni plini: vodna para H_2O , ogljikov dioksid CO_2 , ozon O_3 in še drugi plini, katerih molekule lahko na več načinov vibrirajo s takimi energijami, ki ravno

ustrezajo energijam posameznih kvantov elektromagnetnega valovanja (EMV) oz. fotonov v infrardečem in v mikrovalovnem območju. Kadar EMV spravi molekule v nihanje (glej npr. Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_vibration) ali v vrtenje, se energija EMV pretvori v vibracijsko (ali rotacijsko) energijo nihanj oz. vrtenja teh molekul, kadar se vibriranje (ali pa vrtenje) ustavi, pa molekule oddajo to energijo. V prvem primeru gre za absorpcijo, v drugem pa za emisijo elektromagnetnega valovanja. To se dogaja pri posameznih valovnih dolžinah oz. frekvencah EMV – pri tistih, katerih energija ravno ustreza posameznim načinom vibracij ali rotacij. Ti plini torej absorbirajo in emitirajo predvsem infrardeče (IR) sevanje, pa tudi mikrovalovno sevanje (MW). Infrardeče sevanje pa je ravno tisto, ki ga (v skladu s Planckovim in Stefanovim zakonom) sevajo objekti, ki imajo temperaturo med 230 in 320 K – kar je približno temperatura v ozračju in pri tleh na Zemlji – vse okrog nas torej seva predvsem v infrardečem območju, gostota skupne izsevane moči j pa je po Stefanovem zakonu ($j = \varepsilon \sigma T^4$) sorazmerna s (četrtto potenco) temperature tistega objekta, ki seva. Tu smo z ε označili emisivnost – to je stopnjo oddajanja sevanja glede na največje možno sevanje pri $\varepsilon = 1$. Plinom v ozračju, ki absorbirajo in sevajo IR sevanje, rečemo plini tople grede, saj bi brez absorpcije in emisije sevanje, ki ga navzgor oddajajo tla, šlo neovirano v vesolje in bi bilo pri tleh na Zemlji za okrog 35 °C hladneje, kot je sicer. Kisik O₂ pa npr. seva v mikrovalovnem območju (kar pa na toplo grede nima vpliva).

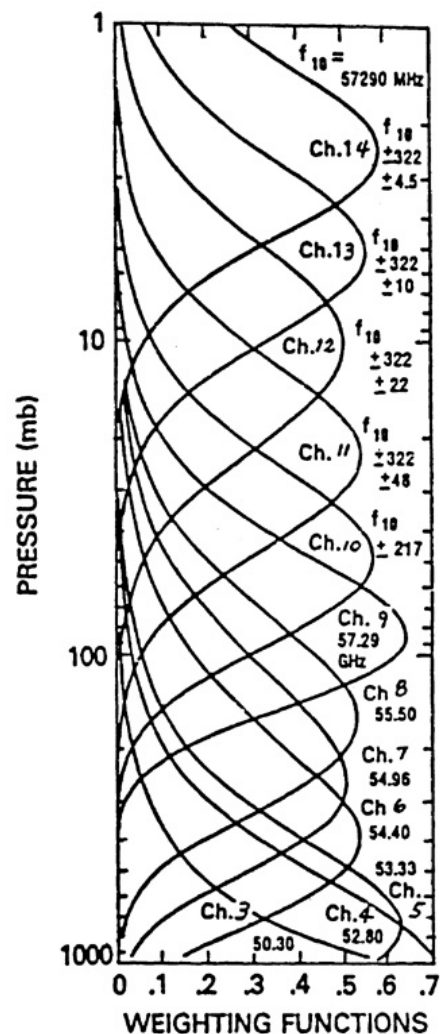
Lastnost absorpcije in emisije uporabljamo pri meritvah za potrebe meteorologije. Če senzor na satelitu – radiometer – »gleda« navzdol pri tisti valovni dolžini ali frekvenci, kjer ravno noben od plinov ozračja nič ne absorbira, torej neovirano »vidi« do tal. Od tam, kjer je topleje, prihaja s tal več energije. V infrardečem območju vse na tleh okrog nas v naravi (tudi mi sami) seva maksimalno: vse okrog nas ima emisivnost skoraj 1. Zato tak senzor dobiva največjo gostoto moči sevanja od najbolj toplih predelov na Zemlji – npr. od toplih tal v tropskih ali subtropskih predelih, najmanj pa od najbolj mrzlih predelov – to so ponavadi vrhovi visokih oblakov, ki imajo temperaturo okrog –55 °C.

Kaj pa, če bi imeli na satelitu radiometer, ki bi »gledal« navzdol ravno pri takšni valovni dolžini oz. frekvenci, pri kateri nek plin ozračja absorbira – ki je torej v resonanci s kakim od vibracijskih načinov? Tu je pomembno več stvari.

Najprej je važno, da je jakost absorpcije ali emisije sevanja nekoliko »razmazana« okrog resonančne valovne dolžine oz. frekvence. Za sondiranje profila temperatur navzdol skozi ozračje pa je še bolj pomembno to, da je širina absorpcijskega in emisijskega območja odvisna tudi od zračnega tlaka: pri nekih zračnih tlakih (in s tem na neki višini v ozračju) je absorpcija močnejša (območje absorpcije in emisije bolj široko), pri drugih pa šibkejša. In še najbolj bistveno: za različne valovne dolžine oz. frekvence so – k sreči! – te odvisnosti močnejše in šibkejše absorpcije različno odvisne od zračnega tlaka. Primer je na Sliki 4. Ta slika nam pove, da večina tistega sevanja, ki ga senzor AMSU-A zaznava npr. v svojem kanalu 3, izhaja iz ozračja prav blizu tal (ker ima krivulja za ta kanal maksimum pri tleh), večina tistega sevanja, ki ga zaznava npr. kanal 6, pa izhaja iz plasti zraka pri 400 hPa = 400 mbar, kar je na nadmorski višini okrog 7200 m. Tako vsak kanal senzorja AMSU-A »gleda« drugo plast ozračja.

Žal se – kot se tudi vidi iz Slike 4 – območja močnejše absorpcije za posamezne kanale raztezajo preko precej širokih območij zračnih tlakov oz. višin v ozračju in žal se medsebojno tudi prekrivajo. Tako ne moremo reči, da npr. kanal 6 »gleda« v plast pri 400 hPa in nikamor drugam, npr. kanal 5 pa samo v plast pri 700 hPa. Velja: kanal 6 sicer najbolj zaznava sevanje, ki izhaja iz plasti pri 400 mbar, toda zaznava pa tudi kar precej sevanja, ki izhaja iz višjih in nižjih plasti ozračja. Zaradi tega prekrivanja je potrebno precej dodatnega truda, da iz sedmih izmerjenih jakosti sevanja, ki pridejo v sedmih kanalih do satelita, izluščimo potek temperature z višino $T(z)$. (Pri tem uporabljamo še druge kanale – predvsem nekatere kanale senzorja HIRS v infrardečem območju, pa tudi še druge informacije.) Kljub vsem naštetim in

še nekaterim težavam pa je dandanes merjenje profila temperature skozi ozračje s satelitov enako točno, kot so merjenja z radiosondami. Bistvena prednost pa je, da z merjenji s satelitov pokrivamo praktično celo zemeljsko ozračje, medtem ko so radiosondne postaje predvsem nad oceani hudo, hudo redko posejane (kot smo pokazali na Sliki 2).



Slika 4: Tim. funkcije občutljivosti za radiometer AMSU-A: odvisnost moči absorpcije in emisije je odvisna tudi od tlaka, torej od višine, iz katere izhaja sevanje, ki ga zaznava radiometer na satelitu – in to za vsako valovno dolžino oz. frekvenco drugače! Na sliki so funkcije občutljivosti za kanale 3 do 14 radiometra AMSU-A v mikrovalovnem območju od 50,30 GHz do 57,29 GHz, to je v območju milimetrskih valovnih dolžin od $\lambda = 5,96$ mm do $\lambda = 5,24$ mm), iz NASA GSFC http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/images/AMSU_WGT.TIF, povzeto 4. 1. 2011.

Jakost sevanja iz posamezne plasti ozračja je, kot smo povedali, odvisna od četrte potence temperature tiste plasti zraka. Poleg tega pa je jakost odvisna tudi od tega, koliko je v plasti plina, ki seva. Ker sta npr. O_2 ali pa CO_2 v ozračju dobro premešana, je njuna koncentracija povsod po ozračju dokaj enaka. Torej za sevanje, ki ga oddajata O_2 ali CO_2 , ni treba upoštevati njune koncentracije in tako ostane samo odvisnost od temperature – ta omogoča

merjenje profila temperature skozi ozračje, kot smo povedali v prejšnjem poglavju¹. Zelo močan sevalec v območju IR in MW pa je tudi vodna para H₂O. Količina vodne pare se spreminja iz dneva v dan in iz kraja v kraj. Zato je močnejše ali šibkejše sevanje iz plasti odvisno ne samo od temperature (ki jo sedaj že poznamo), temveč tudi od tega, ali je v tisti plasti več ali manj vodne pare. Tako uporabimo informacije o sevanju v kanalih 10, 11, in 12 senzorja HIRS ($\lambda = 8,2 \mu\text{m}$, $7,3 \mu\text{m}$ in $6,7 \mu\text{m}$) ter kanalih 1 do 4 senzorja AMSU-A v mikrovalovnem območju ($\lambda = 12,6 \text{ mm}$, $9,55 \text{ mm}$, $5,96 \text{ mm}$ in $5,68 \text{ mm}$) za to, da iz sevalnih podatkov določimo tudi potek vlažnosti z višino.

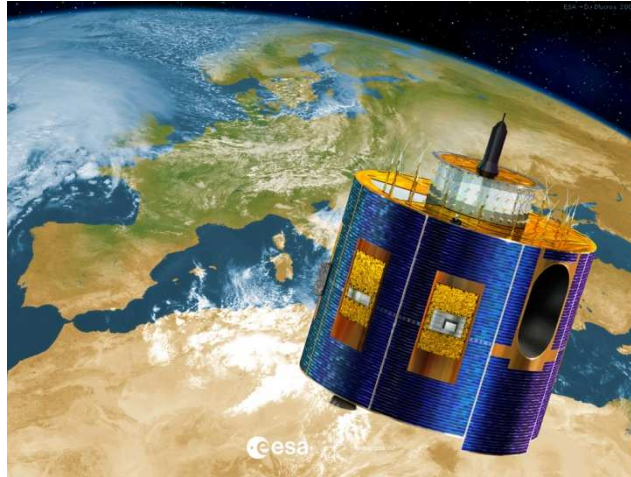
Meritve z geostacionarnih satelitov

Geostacionarni sateliti so ves čas nad istim predelom Zemlje, zato območje pod njimi lahko pregledujemo zelo pogosto – npr. na vsakih 15 minut. Taka možnost je pomembna za sprotno spremljanje razvoja vremena in za hitro opozarjanje na morebitne vremenske nevarnosti. Seveda je tudi pri geostacionarnih satelitih najpomembnejša informacija v IR delu spektra: v tem območju EMV lahko senzorji na satelitih »vidijo« navzdol tudi ponoči. Toda na sodobnih geostacionarnih satelitih je ne samo en IR senzor, ampak jih je dosti več. Z njimi predvsem merimo temperaturo oblakov, tal in morske površine, merimo hitrost premikanja oblakov in še marsikaj. Eden takih je Meteosat Second Generation, ki ga je po naročilu EUMETSAT izdelala in lansirala Evropska vesoljska agencija ESA in ga potem predala v upravljanje naročniku. Je v obliki 2,4 m visokega valja s premerom 3,2 m, ki se vrti okrog svoje osi, ki je vzporedna osi vrtenja Zemlje. Tako ob vrtenju »gleda« vse bolj in bolj v levo – vse bolj na zahod in potem, ko se zavrti skoraj za en krog, spet iz desne smeri – od vzhoda, spet vse bolj navpično navzdol.

Glavni senzor na njem je dvanajstkanalni snemalnik v vidni in IR svetlobi (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager - SEVIRI), ki ob vrtenju celega satelita lahko »gleda« tudi bolj proti severu ali pa bolj proti jugu. Tako vsakih 15 minut »pregleda« ozračje in tla pod njim – npr. temperaturo oblakov, tal in površine oceanov na skoraj polovici zemeljske oble. (Prav na severni in južni polarni predel pa ne »vidi«, ker je pač Zemlja okrogla.) Njegova ločljivost je najboljša, kadar gleda navpično navzdol, in sicer tedaj za opazovanja v vidni svetlobi znaša 1 km, kar je za satelit v visoki orbiti skoraj 35 tisoč km nad tlemi zelo dobra ločljivost. Meri tudi vsebnost ozona v zraku, omogoča pa tudi merjenje vertikalnih profilov temperature in vlažnosti skozi ozračje.

Poleg sondiranja ozračja po višini, s čimer se dopolnjuje podatke, dobljene s polarno orbitalnih satelitov, pa novi podatki na vsakih 15 minut omogočajo sledenje nevarnim vremenskim dogajanjem in omogočajo opozarjanje nanje. Za preučevanje klime in njenih sprememb pa so pomembni podatki merilnika sevalne bilance Zemlje (Geostationary Earth Radiation Budget – GERB), ki meri koliko sočne energije se odbije od Zemlje nazaj v vesolje in koliko seva naš planet v IR delu spektra.

¹ V resnici se vsebnost CO₂ v ozračju tudi nekoliko spreminja preko letnih časov in iz kraja v kraj ter na splošno povečuje iz desetletja v desetletje. Zato primerjava različnih podatkov o sevanju CO₂, kot so ga izmerili s satelitov, pomaga določati količino tega plina v ozračju.



Slika 5: Geostacionarni satelit Evropske organizacije za uporabo meteoroloških satelitov EUMETSAT druge generacije MSG ESA/D.Ducros 2002
http://esamultimedia.esa.int/images/downloads/msg-2/wallpapers/msg-2_02_WP02.jpg,
povzeto 5. 1. 2011.

Uporabnost marsikaterega načina merjenja s pomočjo meteoroloških satelitov je večkratna: npr. podatki o stanju vegetacije ali odbojnosti tal za sončno svetlobo, ali pa o zalogi vode v tleh, so pomembni za meteorologijo. Toda zelo pomembni so ti podatki tudi v kmetijstvu, ekonomskem načrtovanju in še marsikje (glej npr. Oštir in sod., 2011, ta zbornik). Za tiste, ki jih zanimajo podrobnosti, je na svetovnem spletu prosto dostopna npr. publikacija svetovne meteorološke organizacije WMO: The Space-based Global Observing System in 2010 - <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/Techdocuments.html> z mnogimi povezavami na tehnične lastnosti posameznih satelitov in senzorjev na njih. Zelo informativna je tudi domača stran Evropske agencije za uporabo meteoroloških satelitov EUMETSAT <http://www.eumetsat.int/Home/Main/AboutEUMETSAT/index.htm> in še marsikaj se najde.

Zaključne pripombe

Po zaslugi satelitskih meritev so napovedi vremena danes enako kvalitetne nad morjem in kopnim, na južni in severni polobli. Še pred nekaj leti je bila kvaliteta napovedi na južni polobli slabša zaradi pomanjkanja podatkov za pripravo začetnih pogojev. Tudi nad območjem Slovenije so satelitske meritve ozračja pomembne, ker konvencionalnih meritev skozi ozračje nad nami ni veliko. Npr. edine meritve vetra nad tlemi v Sloveniji se opravljajo ob 3 zjutraj v Ljubljani. Kot omenjeno, satelitske meritve danes predstavljajo okoli 95 % vseh podatkov, uporabljenih za numerično napovedovanje. Napovedi so pa vseeno včasih že čez nekaj dni, vsekakor pa čez en teden ali dva neuporabne, kar je posledica napak v začetnih pogojih, modelskih napak in hidrodinamične nestabilnosti toka v ozračju. Izboljšave napovedi so možne na vseh treh področjih.

Znotraj meteorološkega delovnega sklopa v Centru odličnosti Vesolje-SI se ukvarjamo z uporabo satelitskih meritev v meteorologiji in klimatologiji. Posebna naloga je povezana z razumevanjem lastnosti prognostičnih napak. Ta informacija je vgrajena v proces priprave začetnih pogojev, v ti. asimilacijo podatkov. V procesu asimilacije se opazovanja in modelska informacija kombinirajo tako, da se upoštevajo lastnosti njihovih napak. Upoštevanje oz. predstavljanje napake napovedi je izredno pomemben del postopka asimilacije. Ker prave

resnice ne poznamo, lahko napake napovedi kvečjemu modeliramo. Zato bo boljše razumevanje napak napovedi pomagalo k izboljšanju napovedi skozi izboljšane začetne pogoje.

Vpliv začetnih pogojev je še posebej pomemben v primeru izrednih vremenskih pojavov v mezoskali, kot so močne padavine ter nevihtni procesi z viharnim vetrom in točo. Omenjeni vremenski pojavi se v razgibanem reliefu Slovenije na stičišču vplivov Alp in Sredozemlja pojavljajo še posebej pogosto. Vremena nad Slovenijo ni mogoče napovedovati brez razumevanja procesov nad Evropo in Atlantikom ter za daljše napovedi brez razumevanja globalnih procesov, njihove dinamike in napak njihovih napovedi. Zato se raziskovalno usmerjamo na različne prostorske skale, pri čemer uporabljamo globalne in regionalne modele. Regionalni modeli, kot je ALADIN-SI, ki dajejo prostorske podrobne rezultate, so odvisni od začetnih in robnih pogojev (glej članek Žagar in sod., 2011, v tem zborniku), ki jih pridobijo iz globalnega modela. Satelitske meritve v regionalnih modelih tako vplivajo na rezultate napovedi z modeli na več načinov: z modelskimi lastnimi začetnimi pogoji ali pa z v model iz globalnega modela vpeljanimi začetnimi pogoji ter preko stranskih robnih pogojev, pridobljenih iz globalnih modelov.

Zahvala

Priprava članka je bila narejena v okviru Centra odličnosti Vesolje-SI, ki je financiran s sredstvi Evropskih strukturnih skladov.

Literatura

Jule G. Charney, Ragnar Fjörtoft and John von Neumann, (1950): Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation, *Tellus*, **2**, 237-254.

ECMWF:

http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w_coverage!latest!/ © ECMWF, povzeto 4. 1. 2011.

ECMWF:

http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/monitoring/coverage/dcover!Temp!00!pop!od!mixed!w_coverage!latest!/ © ECMWF, povzeto 4. 1. 2011.

ESA: http://esamultimedia.esa.int/images/downloads/msg-2/wallpapers/msg-2_02_WP02.jpg, ESA/D.Ducros 2002, povzeto 5. 1. 2011.

EUMETSAT: http://www.eumetsat.int/eps_webcast/eps/print.htm#s1p1, Copyright 2011 © EUMETSAT, povzeto 3. 1. 2011.

EUMETSAT: <http://www.eumetsat.int/Home/Main/AboutEUMETSAT/index.htm>.

Peter Lynch, (2006): *The emergence of numerical weather prediction : Richardson's dream*. Cambridge [etc.] : Cambridge University Press, XII + 279 str., ISBN978-0-521-85729-1,

NASA, Goddard Space Flight Center: http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/images/AMSU_WGT.TIF, povzeto 4. 1. 2011.

Krištof Oštir in sod., (2011): Uporaba satelitskega daljinskega zaznavanja za napovedovanje in opazovanje poplav. Zbornik predavanj, 16. strokovno srečanje SZGG, Ljubljana, str. 87-93.

Hannu Pitkanen, (1986): *Fifty years of environmental measurement : Vaisala 1936-1986*, Helsinki : Vaisala Oy, 110 str., ISBN951-99765-5-8, COBISS.SI-ID31401.

Lewis Fry Richardson, (1922), 2. izdaja 2007: *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge, Cambridge University Press, (Cambridge Mathematical Library), 250 str. ISBN 0521680441, (ISBN13 9780521680448).

Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_vibration.

WMO: <http://www.wmo.int/pages/prog/sat/Techdocuments.html>.