

# DALJINSKE MERITVE IN ANALIZA INCA 18. SEPTEMBRA 2007

## Remote measurements and INCA analysis of 18 September 2007

Mateja Iršič Žibert\*, Janko Merše\*\*, Benedikt Strajnar\*\*\* UDK 551.509.32

### Povzetek Abstract

Dne 18. septembra 2007 so bile v Sloveniji izjemno močne padavine, ki so povzročile katastrofalne poplave.

Za spremljanje in ovrednotenje tovrstnih močnih konvektivnih sistemov je ključnega pomena obravnava čim širšega kroga razpoložljivih podatkov. Pri tem imajo pomembno vlogo daljinske meritve ozračja (satelit, radar, razelektritve), ki omogočijo pogoste in izdatne informacije v razmeroma visoki ločljivosti nad večjim območjem, in primerno gosta merilna mreža meteoroloških postaj. Ob omenjenem dogodku je predstavljen nekaj značilnih vzorcev na slikah daljinskih meritev in njihova razlaga, kakor sta t. i. hladni obroč in oblika »V«. Na kratko je predstavljen sistem INCA (Integrated Nowcasting with Comprehensive Analysis), ki omogoča objektivno fizikalno konsistentno prostorsko analizo meteoroloških spremenljivk v realnem času ter izračun nekaterih diagnostičnih spremenljivk in napovedi za nekaj ur naprej ob uporabi rezultatov numeričnih meteoroloških modelov in že prej omenjenih meritev. Predstavljenih je nekaj primerov analize INCA za obravnavani dogodek.

On 18 September 2007, extreme precipitation occurred in Slovenia, resulting in catastrophic flooding. The most important factor for properly monitoring and evaluating such severe convective systems is the use of all possible data. Remote sensing data (satellite, radar, lightning detection) have a vital role, since they provide frequent and valuable information in relatively high spatial resolution over a wide area. In addition, a network of meteorological stations with appropriate density is also very important. Some typical patterns on remote sensing data such as cold ring and cold V-shapes are presented for the case of flooding. In the second part there is a short presentation of the INCA system, which produces objective, physically consistent space analyses of meteorological parameters in real time, taking into account numerical weather prediction model data and different sources of measurements. It also provides a derivation of diagnostics and nowcasting for certain parameters. Some analyses are presented for the flooding case mentioned.

## Uvod

Nad severno Evropo je bilo dne 18. 9. 2007 območje nizkega zračnega pritiska. Hladna fronta se je prek zahodne in srednje Evrope od severozahoda bližala Alpam (Markošek, 2007). Istočasno se je prek zahodne Evrope od zahoda proti vzhodu pomikala višinska dolina s hladnim zrakom. Nad nami se je krepil jugozahodni veter. Zaradi razgibanosti reliefa so bili bistveni vzroki za obilne padavine, ki so povzročile poplave na več območjih Slovenije: stalen dotok vlažnega zraka od jugozahoda, močna nestabilnost ozračja, striženje vetra v plasti od tal do 6 km višine. V takšnih pogojih nastajajo obsežni konvektivni sistemi, tvorijo se močne nevihte, ki se lahko dlje časa obnavljajo nad istim območjem.

## Radarske meritve

Za nadzor in spremljanje padavin nad območjem Slovenije so meritve radarja na Lisci zelo pomembne. Na sliki 1 sta prikaza maksimalne odbojnosti ob dveh terminih, kjer se vidi, da so radarske odbojnosti presegle 54 dBz. Konvektivne celice so bile razporejene na zahodnem in severnem delu Slovenije, kjer so se čez dan tvorile vedno nove in nove nevihtne celice in se izcejale nad istimi območji, kar je povzročilo poplave.

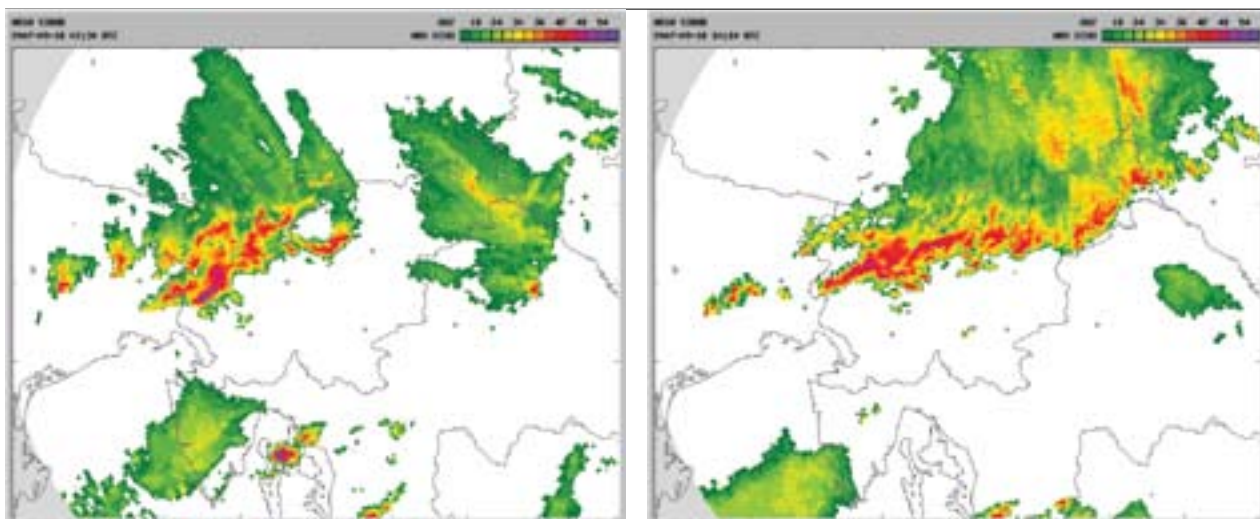
## Satelitske meritve in razelektritve

Satelitske slike satelita Meteosat-9 se osvežujejo vsakih petnajst minut. Radiometer SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) na satelitu Meteosat-9 meri sevanje v dvanajstih kanalih vidnega in infrardečega dela sevanja. V tem delu spektra neposredne meritve količine padavin niso mogoče, lahko pa iz značilnosti vrha oblačnosti sklepamo na dogajanje v samem oblaku. Posebno pozornost zahteva spremljanje

\* mag., Ministrstvo za okolje in prostor RS, ARSO, Vojkova 1b, Ljubljana, mateja.irsic@gov.si

\*\* Ministrstvo za okolje in prostor RS, ARSO, Vojkova 1b, Ljubljana, janko.merse@gov.si

\*\*\* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska 19, Ljubljana, benedikt.strajnar@rzs-hm.si



Slika 1. Radarska odbojnost dne 18. septembra 2007 ob 6.40 UTC (levo) in ob 10.40 UTC (desno). Barvna skala je v decibelih (dBz), ©ARSO.

Figure 1. Radar reflectivity on 18 September 2007 at 6:40 UTC (left) and at 10:40 UTC (right). Colour scale is in decibels (dBz), ©ARSO.

oblakov, ki prodrejo visoko v atmosfero, še posebej tisti, ki prodrejo v tropopavzo (angl. overshooting). Za določitev zelo visokih oblakov, ki prodrejo v tropopavzo, je pomemben prikaz infrardečega kanala (slike od 2–4) s poudarjenimi hladnimi vrhovi. Višina tropopavze je bila dne 18. septembra 2007 na območju Slovenije okrog 11,7 km s temperaturo -59 °C. Zato so na slikah od 2 do 4 z oranžno in rdečo prikazani hladnejši vrhovi od -60 °C, ki segajo v tropopavzo. Na slikah 2 in 3 je viden poseben vzorec v severozahodnem delu Slovenije, t. i. »hladni obroč« (angl. cold-ring), (Setvak, 2005), ki je značilen za območja intenzivnega vertikalnega dogajanja. Temperaturna skala je barvno poudarjena od -34 do -73 °C in je izbrana tako, da so poudarjeni zelo hladni, visoki oblaki. Na sliki 2 in še bolje na sliki 3 je viden »hladni obroč«, označen z rdečo puščico, kot tudi t. i. »osrednji toplejši sektor« (angl. central warm spot), označen z modro puščico.

Glavne značilnosti hladnega obroča, kakor je viden iz IR10.8 satelitskih slik, so: temperaturna razlika med hladnejšim obročem in osrednjim toplejšim sektorjem je od nekaj °C do 15 °C, horizontalna razsežnost osrednjega toplejšega sektorja je lahko več SEVIRI pikslov, trajanje osrednjega toplejšega sektorja pa od enega posnetka do več zaporednih posnetkov (Setvak 2005).

Dne 18. septembra so bile značilne lastnosti hladnega obroča, kakor je viden na slikah 2 in 3:

- temperaturna razlika med hladnim obročem in osrednjim delom: do 9 °C,
- velikost osrednjega toplejšega sektorja: 3 - 4 SEVIRI piksle, kar znaša od 15 do 20 km,
- trajanje hladnega obroča z osrednjim toplejšim sektorjem: približno 1 uro, od 6.30 do 7.30 UTC.

Za nastanek osrednjega toplejšega sektorja je več razlag (Setvak, 2005), vzrok je lahko eden ali pa kombinacija večih:

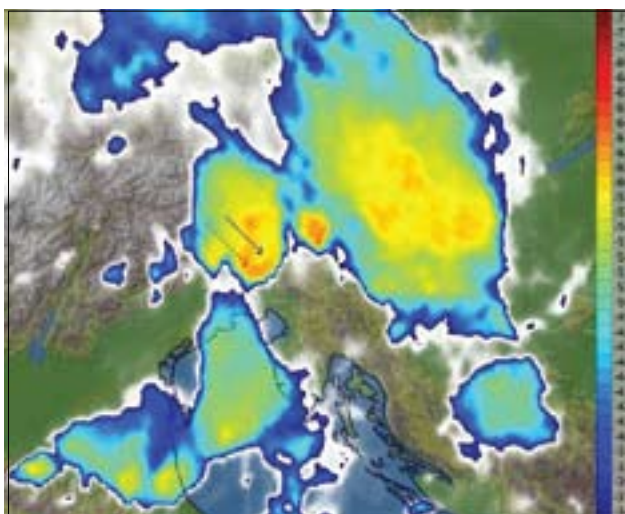
- delna prosojnost osrednjega dela v IR delu spektra, zato je prispevek sevanja tudi iz nižjih, toplejših plasti ozračja;
- posledica efekta lomljenja gravitacijskih valov (angl. gravity wave braking effect);
- mehanizem »toplih« vrhov: vrh oblaka sega v toplejšo spodnjo stratosfero in se segreje zaradi toplejše okolice.

Vzorec hladnega obroča se lahko ob intenzivnem dogajanju s striženjem vetra z višino spremeni v obliko »V« (angl. cold-V shape), kakor je prikazano na sliki 4. Vzorec na satelitski sliki IR10.8, ki ima obliko »V«, nastane zaradi efekta vrtnice na zavetrni strani območja, kjer vrhovi oblakov prodrejo v tropopavzo (Luderer, 2007). Dodatno lahko take oblike »V« nastanejo zaradi efekta lomljenja gravitacijskih valov (Wang, 2007) in/ali zaradi vpliva dodatnega prosojnega oblaka nad vrhom optično debelega oblaka (angl. plume masking) (Setvak 2007). Kadar opazimo vrh oblaka v obliki »V«, obstaja velika verjetnost za ekstremno vremensko dogajanje.

Na sliki 5 je prikazana večspektralna kombinacija vidne satelitske slike (HRV) in infrardeče satelitske slike (IR10.8), kjer so nizki oblaki prikazani rumeno, visoki debeli so prikazani belo, visoki prosojni oblaki pa modro (Iršič Žibert 2004). Dodatno je na sliki 5 prikazana tudi velika intenzivnost razelektritev v času 60 minut pred satelitskim posnetkom, iz česar se vidi velika intenzivnost razelektritev na severozahodnem delu Slovenije.

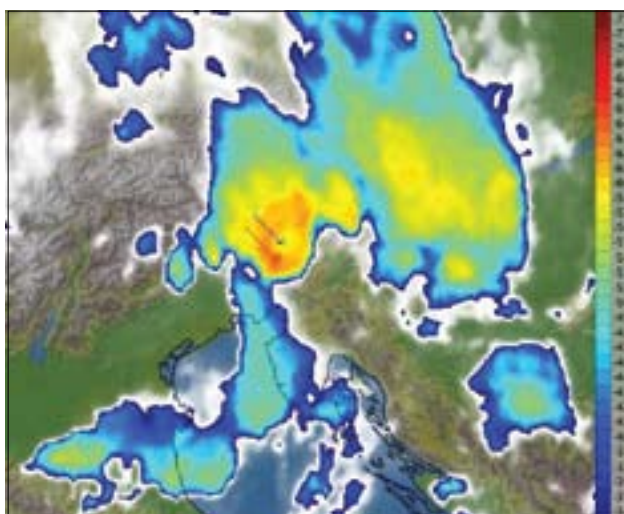
## Analiza INCA in nowcasting

Izraz nowcasting se je uveljavil za zelo kratkoročne napovedi (tudi zdajšnje napovedi) od sedanjega trenutka



Slika 2. Infrardeča satelitska slika (IR10.8) satelita Meteosat-9 dne 18. septembra 2007 ob 6.30 UTC je prikazana v barvni skali, ki poudarja območja zelo visokih in hladnih oblakov. V severozahodni Sloveniji je označeno območje z značilnim vzorcem za konvektivne oblake, ki segajo v tropopavzo. Rdeča puščica označuje hladen obroč, modra pa osrednji toplejši sektor, ©ARSO.

Figure 2. Infrared satellite image (IR10.8) on 18 September 2007 at 6:30 UTC scanned by the Meteosat-9 satellite and presented on a colour scale; areas with very high and cold clouds are enhanced. Over NW Slovenia there is a typical pattern of strong overshooting tops. The red arrow indicates a cold ring; the blue arrow indicates a central warm spot, ©ARSO.



Slika 3. Infrardeča satelitska slika (IR10.8) satelita Meteosat-9 dne 18. septembra 2008 ob 7:00 UTC je prikazana v barvni skali, ki poudarja območja zelo visokih in hladnih oblakov. V severozahodni Sloveniji je označeno območje z značilnim vzorcem za konvektivne oblake, ki segajo v tropopavzo. Rdeča puščica označuje hladen obroč, modra pa osrednji toplejši sektor, ©ARSO.

Figure 3. Infrared satellite image (IR10.8) on 18 September 2007 at 7:00 UTC scanned by the Meteosat-9 satellite and presented on a colour scale; areas with very high and cold clouds are enhanced. Over NW Slovenia there is a typical pattern of strong overshooting tops. The red arrow indicates a cold ring; the blue arrow indicates a central warm spot, ©ARSO.

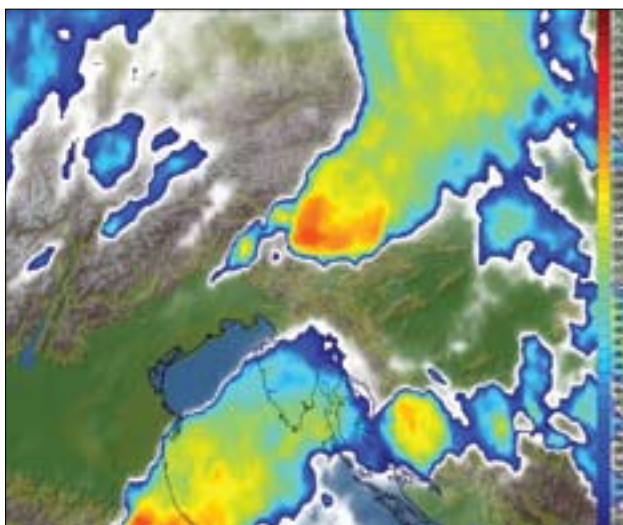
do nekaj ur vnaprej. V primerih stalno obnavljajoče ali na novo porajajoče se konvekcije, se pri nowcastingu pogosto uporabljane metode ekstrapolacije v veliki meri odpovedo. Te metode temeljijo večinoma na analizi vektorjev premikov zadnjih dveh ali več slik (npr. satelitskih slik oblačnosti ali radarskih slik padavin) in te premike uporabijo za premik vremenskih sistemov za kratek čas v prihodnost kot oceno prihodnjega vremenskega stanja. Na ta način ni mogoče upoštevati novih pojavov, ki medtem na novo nastanejo ali izginejo.

Za potrebe nowcastinga je zato v takih primerih ključnega pomena celovitejša obravnava atmosferskega dogajanja, kjer ima osrednjo vlogo čim podrobnejša objektivna analiza stanja v atmosferi v čim višji prostorski ločljivosti. Ta je nato podlaga za nadaljnji objektivni nowcasting, hkrati pa omogoča tudi dobro diagnostiko za subjektivne pristope.

Primer hitro razvijajočega se nowcasting sistema, ki sledi omenjenim smernicam, je tudi INCA — Integrated Nowcasting with Comprehensive Analysis. INCA kot prvi približek stanja v atmosferi uporablja prostorska polja meteoroloških spremenljivk numeričnega meteorološkega modela (npr. ALADIN), nato z interpolacijskimi metodami ob upoštevanju določenih fizikalnih zakonitosti izračunava tridimenzionalno fizikalno konsistentno analizo

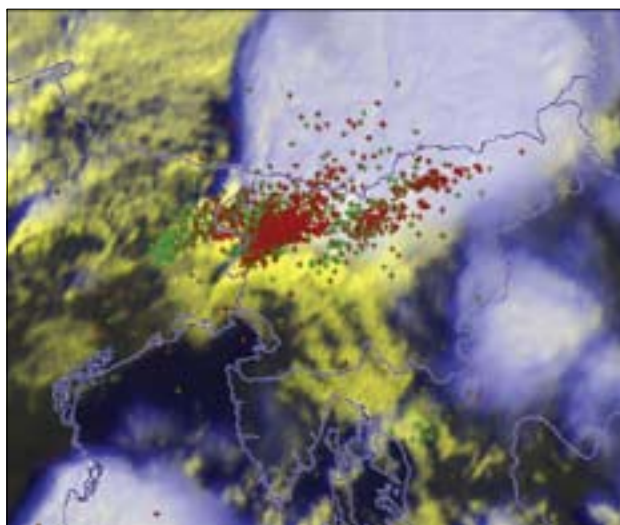
v visoki prostorski ločljivosti (1 km), v katero vključuje širok spekter različnih meritev (podatke s klasičnih in avtomatskih meteoroloških postaj, radarske in satelitske podatke, radiosondažo, AMDAR,...). Na ta način dobimo prostorska polja temperature, vlage in vetra, razporeditve padavin, oblačnosti, sevanja itd. Ta analiza je nato podlaga za izračun določenih diagnostičnih polj in tudi za nowcasting in kratkoročno napoved do 12 ur vnaprej, V prvem delu imajo večji vpliv na analizo meritve, v drugem pa modelski izračuni. Algoritme podrobneje opisujejo Haiden in sodelavci (2007).

V nadaljevanju je na kratko predstavljenih nekaj eksperimentalnih izračunov INCA za 18. september 2007, pri čemer so v analizo vključeni podatki iz sinoptičnih in avtomatskih meteoroloških postaj ter radarske meritve padavin. Na sliki 6 je prikazano polje vetra na 10 m v modelu ALADIN (ločljivost ~9km) in analiza INCA istega vetrovnega polja. Medtem ko v polju vetra iz modela ALADIN prevladuje razmeroma homogen tok južne do jugozahodne smeri, ponuja analiza INCA bistveno več podrobnosti vetrovnega polja. Posebej zanimiv je sicer šibak, a dobro viden tok zraka po dolinah Gorenjske navgor, tako po gornjesavski dolini kakor na območju Škofjeloškega hribovja. Analiza tako omogoči podrobnejši vpogled v vremensko dogajanje, kakor je npr.



Slika 4. Infrardeča satelitska slika IR10.8 satelita Meteosat-9 dne 18. septembra 2007 ob 10.30 UTC je prikazana v barvni skali, ki poudarja območja zelo visokih in hladnih oblakov. Na severozahodu Slovenije je razvidna oblika »V« vrha oblaka, ki sega v tropopavzo, ©ARSO.

Figure 4. Infrared satellite image (IR10.8) on 18 September 2007 at 10:30 UTC scanned by the Meteosat-9 satellite and presented on a colour scale; areas with very high and cold clouds are enhanced. Over NW Slovenia there is a cold V-shape, ©ARSO.



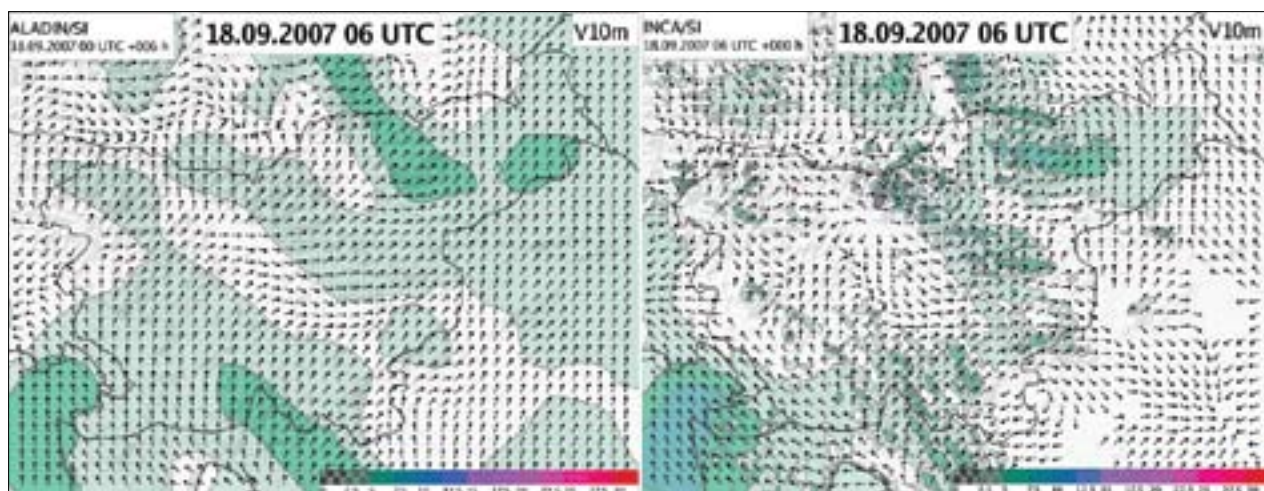
Slika 5. Večspektralna kombinacija vidnega spektra in infrardečega spektra dne 18. septembra 2007 ob 10.30 UTC s prikazom razelektritev v zadnji uri (najstarejše zeleno, najmlajše rdeče), ©ARSO.

Figure 5. Multi-spectral combination of high-resolution visible and infrared images on 18 September 2007 at 10:30 UTC with lightning detected in the last hour (oldest in green, newest in red), ©ARSO.

območje stekanja na območju Škofjeloškega hribovja, ki je razmeroma dobro vidno in ki je lahko pomemben dejavnik za proženje konvekcije.

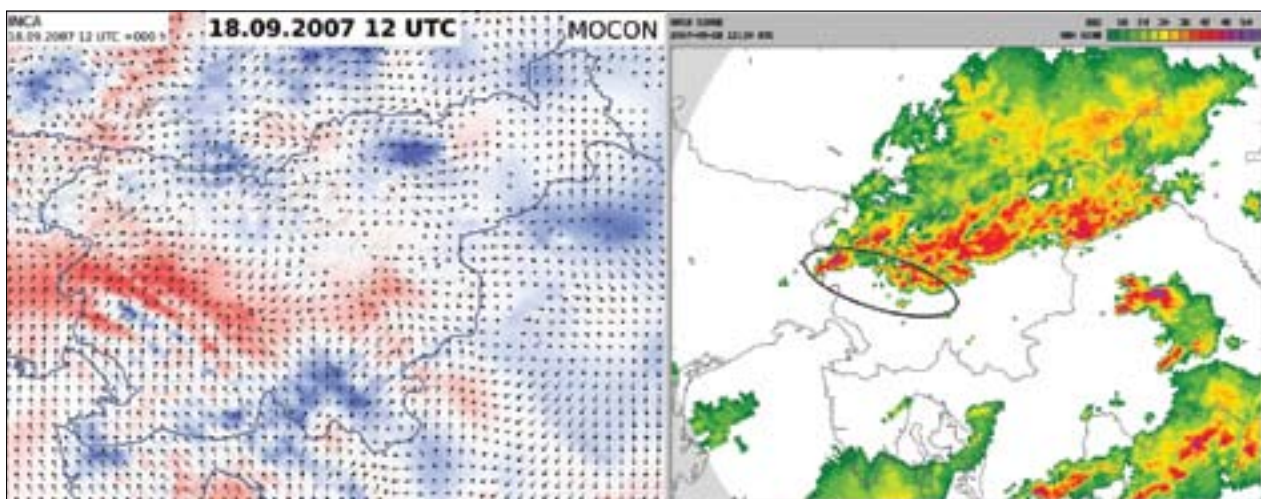
Še boljši vpogled v dogajanje omogočajo diagnostična polja, ki jih lahko izračunamo na podlagi analize. Na sliki 7 (levo) je kot primer prikazano polje konvergence vlage v prizemni mejni plasti (PBL) skupaj z vetrom na 10 m ob 12.00 UTC. Rdeče so obarvana območja konvergence

in modro območja divergence. Dobro vidno območje konvergence od južnega predgorja Julijskih Alp proti Notranjski zelo dobro sovпада z območjem proženja novih nevihtnih celic na tem območju, kar je vidno tudi na sliki maksimalnih radarskih odbojev pol ure pozneje, ob 12.30 UTC (desno). Tudi ob drugih časih je bila opažena razmeroma dobra povezanost med območji konvergence vlage in območji proženja konvekcije, določena območja pa so tudi izstopala. Prve izkušnje tako nakazujejo določen potencial za uporabo takih diagnostičnih polj tudi za objektivne nowcasting pristope (omenjena konver-



Slika 6. Polje vetra na 10 m ob 6.00 UTC v modelu ALADIN (napoved za 6 ur vnaprej) (levo) in analiza INCA (desno) – puščice prikazujejo smer, obarvane izolinije hitrost vetra, ©ARSO.

Figure 6. 10-m wind field at 6 UTC from the ALADIN NWP model (6h forecast) (left) and INCA analysis (right) – arrows show wind direction and coloured contours wind speed, ©ARSO.



Slika 7. Analiza INCA konvergence vlage ob 12.00 UTC (kvalitativno – rdeče so območja konvergence, modro območja divergence) (levo) in radarska slika maksimalnih odbojev ob 12.30 UTC – elipsa označuje območje proženja konvekcije (desno), ©ARSO.

Figure 7. INCA PBL moisture convergence analysis at 12 UTC (qualitatively – convergence zones in red and divergence zones in blue) (left) and radar maximum reflectivities at 12:30 UTC – the black ellipse indicates the area of convection triggering (right), ©ARSO.

genca vlage je seveda le eden od dejavnikov, ki vplivajo na razvoj konvekcije], vendar bo na tem področju treba še veliko razvojnega dela. Za subjektivno presojo so tudi samo diagnostična polja pomembna dopolnitev razpoložljivih informacij.

Na sliki 8 je predstavljena še dnevna akumulacija padavin za 18. 9. 2007, izračunana iz vsote 30-minutnih analiz INCA, kjer so za analizo količine padavin uporabljeni radarski izmerki in meritve mreže avtomatskih postaj. Že 30-minutne analize imajo pomembno uporabno vrednost, saj ponujajo celovit vpogled v vedenje o padavinah v realnem času, ko na ta način združimo informacijo iz različnih virov. Radarska ocena padavin je v okolici merilnih mest lahko precej bolje umerjena, zato pričakujemo tudi boljše ploskovne akumulacije za daljše časovno obdobje. Seveda pa ima pri tem pomembno vlogo tudi gostota merilne mreže, ko lahko na območjih

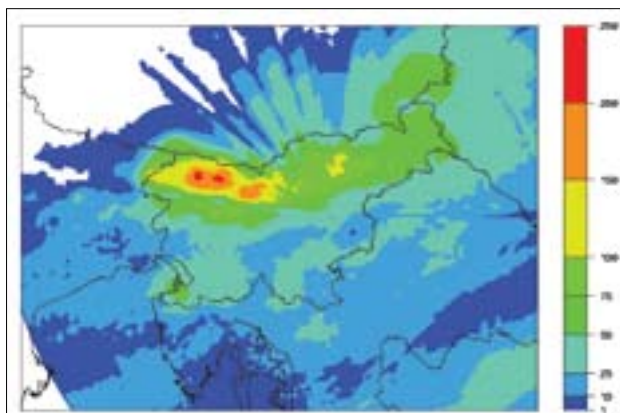
brez prizemnih meritev pričakujemo tudi znatna odstopanja od dejanskega stanja.

## Sklepne misli

Za dobro operativno meteorološko bdenje nad stanjem in dogajanjem v atmosferi in tudi za nowcasting je vse bolj pomembno upoštevanje čim širšega kroga razpoložljivih virov informacij, tako daljinskih meritev (satelit, radar, razelektrivte) kakor tudi različnih mrež prizemnih in radiosondnih, ter napovedi numeričnih meteoroloških modelov. Natančna in celovita analiza trenutnega stanja je temelj razvoja objektivnih nowcasting metod, hkrati pa izjemen vir podatkov za subjektivno presojo. Ključnega pomena je, da je taka analiza dostopna v realnem ali skoraj realnem času, kar je tudi velik tehnični izziv. Zaradi ogromnega aplikativnega potenciala takih produktov je razvoj na tem področju v zadnjih letih zelo živahen. Prav tako je za dobro prepoznavanje dogajanj v ozračju zelo pomembno znanje o posamezni vrsti meritev. Predvsem pri daljinskih meritvah je zelo pomembno prepoznavanje določenih vzorcev, po katerih lahko sklepamo na vrsto in intenzivnost opazovanih pojavov.

## Viri in literatura

1. Markošek, J., 2007. Razvoj vremena v septembru 2007. Mesečni bilten, št. 9, letnik XIV, str. od 26–31. Agencija RS za okolje, MOP, Ljubljana.
2. Iršič Žibert, M., 2004. Analiza oblačnosti s pomočjo multispektralnih satelitskih slik druge generacije satelitov METEOSAT: magistrsko delo, Univerza v Ljubljani.
3. Setvák M., Rabin R.M., 2005. MSG observations of deep convective storms. Proc. The 2005 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference,



Slika 8. Dnevna akumulacija 30-minutnih analiz INCA padavin za 18. 9. 2007, ©ARSO.

Figure 8. Daily accumulation of 30-min INCA precipitation analyses for 18.9.2007, ©ARSO.

- Dubrovnik, Croatia. EUMETSAT P.46, ISBN 92-9110-073-0, ISSN 1011-3932, 460–466.
4. Luderer G., J. Trentmann, K. Hungershofer, M. Herzog, M. Fromm, and M. O. Andreae, (2007): Small-scale mixing processes enhancing troposphere-to-stratosphere transport by pyro-cumulonimbus storms, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Issue 7, pp 5945–5957.
  5. Wang, P.K. (2007): The thermodynamic structure atop a penetrating convective thunderstorm, *Atmospheric Research*, Volume 83, Issues 2–4, February 2007, Pages 254–262.
  6. Martin Setvák, Robert M. Rabin and Pao K. Wang (2007): Contribution of the MODIS instrument to observations of deep convective storms and stratospheric moisture detection in GOES and MSG imagery, *Atmospheric Research*, Volume 83, Issues 2-4, February 2007, Pages 505–518.
  7. Haiden, T., A. Kann, K. Pistotnik, K. Stadlbacher, M. Steinheimer, F. Wimmer, C. Wittmann (2007). Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA): System overview, Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria.