

Izzivi regionalnega klimatskega modeliranja

Nedjeljka Žagar, Jože Rakovec, Gregor Skok in Luka Honzak*

Povzetek

Članek predstavlja izzive povezane z regionalnim klimatskim modeliranjem s poudarkom na procesu povezovanja regionalnega in globalnega klimatskega modela in na oceni nedoločenosti modelskih rezultatov. Predstavljene so tekoče raziskave na tem področju v Sloveniji v okviru Centra odličnosti Vesolje-SI.

Uvod

Novoustanovljeni *Centru odličnosti Vesolje, znanost in tehnologije (Vesolje-SI)* združuje slovenske raziskovalce na področjih daljinskega zaznavanja, meteorologije, astrofizike in različnih področij tehnologij mikro in nano satelitov, satelitskih komunikacij, hibridnih anten in radarskih tehnologij ter laboratorija za testiranje vesoljskih tehnologij (<http://www.space.si>). Namen meteorološkega delovnega sklopa je vključitev satelitskih meritev v meteorološke in klimatološke raziskave v Sloveniji. Raziskovalno delo je razdeljeno na tri naloge: uporaba in verifikacija vremenskih in klimatskih modelov, raziskave napovedljivosti in modelskih napak ter klimatske raziskave. V tem članku bomo predstavili izzive, povezane s klimatskim raziskovanjem v visoki ločljivosti.

Napovedljivost

Meteorološko modeliranje je predvsem napovedovanje. Minilo je 60 let, odkar je bila pripravljena prva objektivna (numerična) vremenska napoved. Prva napoved je bila narejena z uporabo barotropne enačbe vrtinčnosti, ki opisuje advekcijo geopotenciala v srednji troposferi in kot takšna pove zelo malo o vremenu pri tleh. Danes so napovedi vremena za nekaj dni naprej na skalah nekaj sto km precej uspešne. Tipičen primer uspešne napovedi so napovedi poplav septembra 2010 v Sloveniji (Oštir, 2011). V ozadju kvalitetne napovedi so: dober model za pripravo začetnih pogojev in za napovedovanje, veliko kvalitetnih opazovanj za pripravo začetnih pogojev in zmogljiv računalnik. Vseeno so napovedi vremena za več kot nekaj dni neuporabne, kar je posledica napak v začetnih pogojih, modelskih napak in hidrodinamične nestabilnosti toka v ozračju. Nestabilnost toka pomeni, da je numerični rezultat občutljiv na majhne razlike v začetnih pogojih, kakršne so npr. posledica napak opazovanj. Zato pravimo, da je napovedovanje vremena problem začetnih pogojev. Dolgoročne napovedi (daljše od deset dni), kot so mesečne, sezonske, večletne napovedi in napovedi klime so problem robnih pogojev. Za klimo je vreme šum. Do posameznega skupnega signala, ki je posledica določenih procesov, se pride s povprečevanjem mnogih simulacij (trajektorij). Modelerji klime povprečujejo rezultate več zagonov, in sicer ne zaradi tega, ker vreme ni pomembno, ampak da pridejo do robustne ocene obravnavanega signala.

* vsi: 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

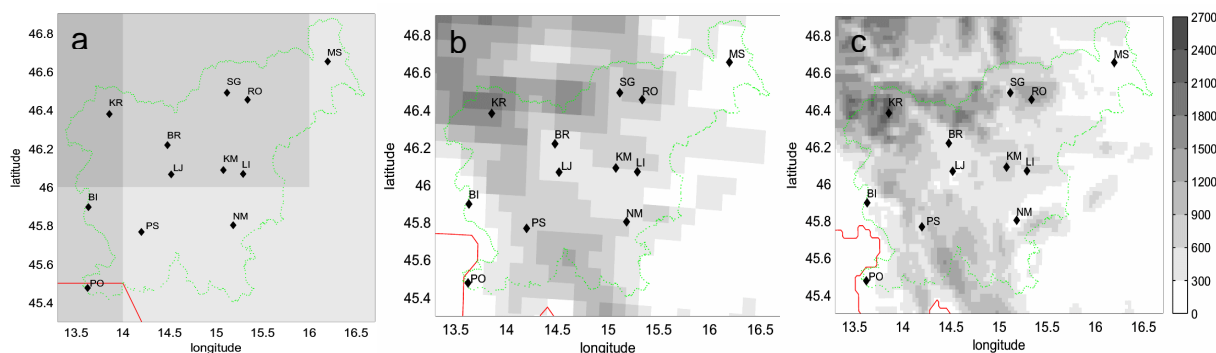
Za razliko od dosedanjih poročil Medvladnega panela za klimatske spremembe IPCC (<http://www.ipcc.ch>), ki so govorila o projekcijah klime v primeru določenih scenarijev emisij (in ne o napovedih klime), bo naslednje poročilo (poročilo znano kot AR5) vsebovalo, poleg projekcij klime za obdobje 2100 in naprej, tudi napovedi klime za prihodnja desetletja. Časovna skala nekaj deset let je potrebna za sprejemanje odločitev in ukrepov. Napovedi in projekcije bodo pripravljene z izboljšanimi modeli glede na prejšnje poročilo AR4. Znanstveniki (npr. Trenberth, 2010) pa opozarjajo, da bo nedoločenost v napovedih in projekcijah klime v AR5 veliko večja kot v dosedanjih poročilih. Logični sklep bi bil, da bi se istočasno z naraščanjem razumevanja in znanja o različnih faktorjih, ki vplivajo na klimo, nedoločenost zmanjševala, toda z vedno boljšim razumevanjem klime tudi bolj natančno razumemo dejavnike, ki jih doslej nismo upoštevali in/ali se jih sploh zavedali.

Modelska ločljivost in regionalno klimatsko modeliranje

Horizontalna ločljivost modelov, uporabljenih v poročilu IPCC AR4, je bila med 125 km in 400 km. Klima Slovenije je tako v dosedanjih modelih IPCC pod mrežni proces. Pri tej ločljivosti eksplicitna predstavitev marsikaterih za klimo pomembnih fizikalnih procesov ni možna, takšni procesi so nujno parametrizirani ali zanemarnjeni.

Večina študij vpliva klimatskih sprememb, ki so posledica človeškega vpliva na ozračje, zahteva veliko večjo ločljivost, kot jo ponujajo globalni klimatski modeli. Zato je potrebno ločljivost modelskih rezultatov izboljšati na fizikalno pravičen način. Postopek je znan kot dinamično povečevanje modelske ločljivosti (ang. downscaling) in ima namen priti s skale, ki jo uporablja globalni klimatski model (ang. global climate model, GCM), na skalo potrebno za oceno učinkov oz. za politične odločitve, s pomočjo regionalnega klimatskega modela (ang. regional climate model, RCM).

Globalni klimatski model priskrbi spodnje pogoje (vlago in toploto v tleh, temperaturo površine morja, morski led), stranske meteorološke robne pogoje (ang. lateral boundary conditions, LBC) na približno vsakih 6 ur in odziv procesov velikih skal (okoli 100 in več km) na naravno in antropogeno siljenje sistema. Regionalni klimatski model pa producira podroben odziv na skalah okoli 10 km. Fizikalni motivi za regionalno modeliranje so še posebej močni za majhna območja z nepravilno obliko, območja s kompleksno orografijo, kompleksno obalo ter heterogenimi kopenskimi površinami. Rezultati RCM se uporabljajo kot vhodni parametri za druge modele (npr. modele onesnaženja) na še večji ločljivosti in za oceno odziva klime na siljenja na visoki ločljivosti (npr. orografija). Primer vpliva izboljšane ločljivosti na predstavitev orografije Slovenije v modelih je prikazan na Sliki 1.



Slika 1. Orografija Slovenije, kot jo »vidijo« numerični modeli ozračja na ločljivosti (a) okoli 120 km, (b) okoli 10 km in (c) 2.5 km. Barvna skala (v metrih) je enaka na vseh slikah.

Prikazane so lokacije nekaterih postaj na orografsko različnih območjih v različnih modelih. Slika levo ustreza ločljivosti današnjih klimatskih modelov, ki bodo uporabljeni za AR5.

Dinamično povečevanje horizontalne ločljivosti za potrebe napovedovanja vremena se uporablja že dalj časa, uporaba za klimatsko modeliranje je stara okoli 20 let (Dickinson, 1989). Danes obstajajo številni RCM in skupine, ki se ukvarjajo z regionalnim klimatskim modeliranjem; npr. v evropskem projektu ENSEMBLES je na temo klimatskega modeliranja sodelovalo 60 partnerjev, ki so uporabljali okoli 20 različnih regionalnih klimatskih modelov (<http://ensembles-eu.metoffice.com/participants.html>). Skupni viri napak GCM in RCM so posledica numeričnega reševanja enačb, omejene ločljivosti, parametrizacije pod mrežnih fizikalnih procesov in dejstva, da so nekateri vplivi v enačbah kljub vsemu opisani le približno. Dodatni viri napak v RCM, ki jih GCM nima, so velikost domene, metoda gnezdenja, razlika v ločljivosti med globalnim in regionalnim modelom, pogostost uporabe stranskih robnih pogojev in napake v njihovi uporabi.

Posebna težava z RCM je njihova verifikacija. GCM se verificirajo s pomočjo reanaliz, ki nimajo dovolj velike ločljivosti za verifikacijo regionalnih modelov. Istočasno je mreža opazovanj na večjem delu sveta preredka za direktno primerjavo RCM. Satelitska opazovanja ponujajo različne možnosti verifikacije, njihova uporaba v ta namen pa zahteva previdnost. Problem verifikacije postaja vedno bolj pomemben, ker ločljivost regionalnih modelov ves čas narašča.

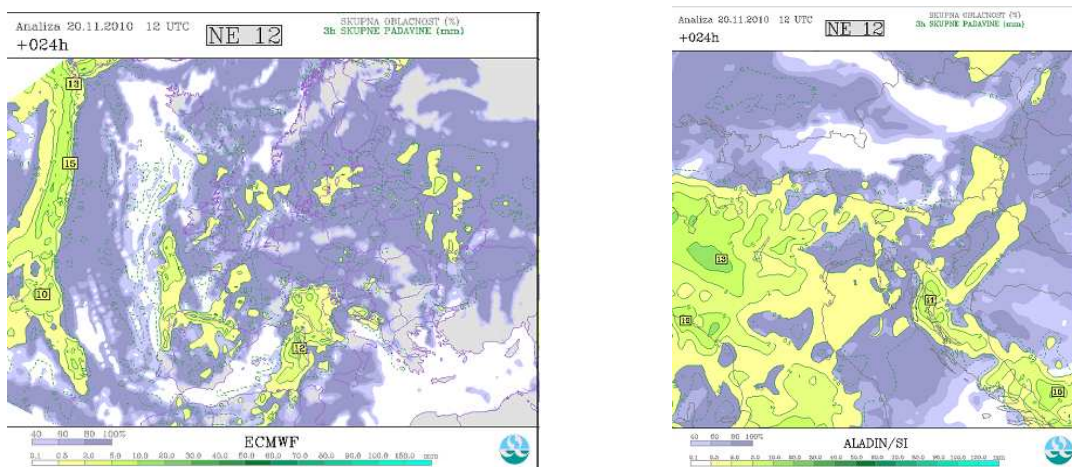
Načelo povečevalnega stekla

Postopek zvišanja ločljivosti je podoben povečevalnem steklu. Laprise in sod. (2008) so obravnavali pet osnovnih načel pri postopku zviševanja ločljivosti. Predpostavlja se veljavnost nekaterih fizikalnih principov, čeprav njihova veljavnost ni natančno potrjena:

1. RCM so sposobni generirati procese na skalah, ki jih globalni model, uporabljen za stranske pogoje, nima.
2. Proces, generirani na manjših skalah, imajo pravo amplitudo in klimatsko statistiko.
3. Proces, generirane v manjših skalah, bi globalni model reproduciral, če bi le imel zadostno ločljivost.
4. Proces, generirani v manjših skalah, so za uporabljene stranske pogoje enolično definirani.
5. Proces, velikih skal (ki so rezultat GCM) v domeni RCM znotraj domene RCM v principu ostanejo nespremenjeni.

Nobenega od načel ni mogoče povsem potrditi ali ovreči. Najbolj natančna ocena njihove točnosti se dobi s pomočjo simulacij, v katerih se predpostavi, da je model perfekten, oz. se stanje ozračja simulira na visoki ločljivosti z istim modelom, ki se potem uporabi za testiranje naštetih predpostavk. Simulacija visoke ločljivosti predstavlja simulirano »resnico« in služi za verifikacijo simulacije na omejenem območju. Če se iz te simulacije filtrirajo majhne skale in se polja uporabijo kot stranski pogoji za simulacijo RCM, primerjava rezultatov simulirane »resnice« in polj pridobljenih iz simulacije RCM,

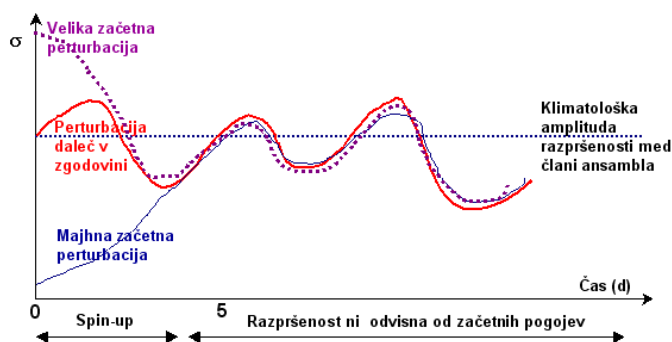
omogoča določanje napak, ki so izključno posledica metode gnezdenja in so neodvisne od modelskih napak in napak v LBC (Laprise in sod., 2008).



Slika 2. Napoved 3-urnih padavin z (levo) modelom ECMWF, ki ima horizontalno ločljivost okoli 16 km in (desno) z modelom ALADIN-SI s 4,4 km mrežo, in s stranskimi pogoji iz modela ECMWF. Napoved padavin nad Slovenijo in okolico je precej različna in ne glede na njeno kvaliteto lahko opazimo, da model z višjo ločljivostjo poda več detajlov, še posebej tistih, ki so orografsko pogojeni. Vir: ARSO.

Najlažje je preveriti prvo načelo, saj ga ves čas uporabljamo pri pripravi vremenskih napovedi visoke ločljivosti. Primer na Sliki 2 je sicer predstavljen za vremensko skalo, toda enaka predpostavka velja na vse časovne skale.

Načeli 2 in 3 na splošno veljata v zmernih geografskih širinah pod pogoji, da je domena dovolj velika, sicer močan tok v višinah lahko »odpihne« dogajanja manjših skal iz domene, še preden pride do ravnovesja. Načelo 3 na splošno ne drži za vremensko skalo, kar pa za klimatsko modeliranje (statistiko) ni težava težave. Sicer sta ti dve načeli testirani v prej opisanem idealiziranem eksperimentu, če privzamemo, da ni modelskih napak in so LBC perfektni.



Slika 3. Časovni potek razpršenosti med člani ansambla simulacij narejenih z enakimi stranskimi robnimi pogoji (prirejeno po Laprise in sod., 2008)

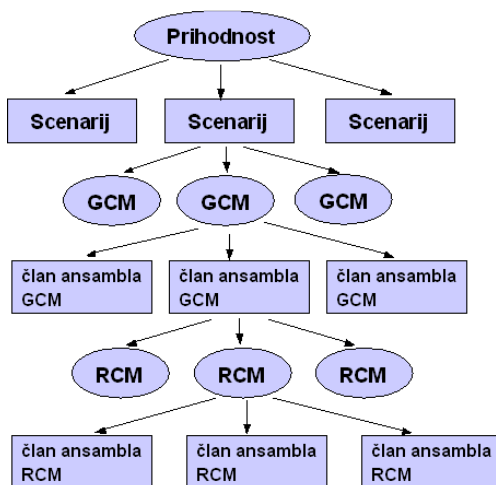
Načelo 4, ki pravi, da so generirani procesi manjših skal enolično definirani za uporabljene stranske pogoje, ne drži in je najbolj pogosto narejena napaka pri klimatskem modeliranju. Predpostavka enolične rešitve na omejenem območju bi pomenila, da ni

lastne (notranje) variabilnosti RCM. Za identične robne pogoje pa obstaja razpršenost RCM. Zato posamezna klimatska simulacija ne pove veliko, če je ne spremlja ocena njene nedoločenosti, ki se pridobi iz ansambla simulacij. V primeru poročila IPCC oz. globalnih klimatskih modelov se povprečevanje naredi preko vseh uporabljenih modelov. Sicer pa ima vsak model lastno notranjo variabilnost in bi v idealnem primeru vsak GCM potreboval lasten ansambel simulacij za oceno lastne notranje variabilnosti. Potrebno je še omeniti, da je zaradi LBC notranja variabilnost za RCM vsekakor manjša kot naravna variabilnost.

Pri petem načelu v primeru perfektnega globalnega modela velike skale ostanejo nespremenjene, kar je tudi nujen test za uporabnost regionalnega modela. Za neperfekten model to še vedno drži in se napake LBC v RCM reproducirajo z enako amplitudo. Sicer obstajajo študije, ki trdijo nasprotno: da se velike skale iz LBC poslabšajo oz. izboljšajo v domeni RCM.

Diskusija načelnega pristopa povečevalnega stekla sloni na ideji perfektnega modela in LBC. V resničnih aplikacijah pa se ukvarjamo s problemom stranskih robnih pogojev slabe ločljivosti in z napakami. Poleg tega uporabljamo tudi RCM z napakami različnih vrst ter z napakami LBC na robovih.

V idealnem primeru klimatsko modeliranje v visoki ločljivosti poteka na način, predstavljen na Sliki 4. Takšen potek je uporabljen v ravnokar končanem projektu EU ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com>), pri katerem so se številne evropske institucije združile z namenom izboljšanja modeliranja evropske klime v prihodnjih desetletjih in zmanjševanja nedoločenosti rezultatov klimatskih napovedi.

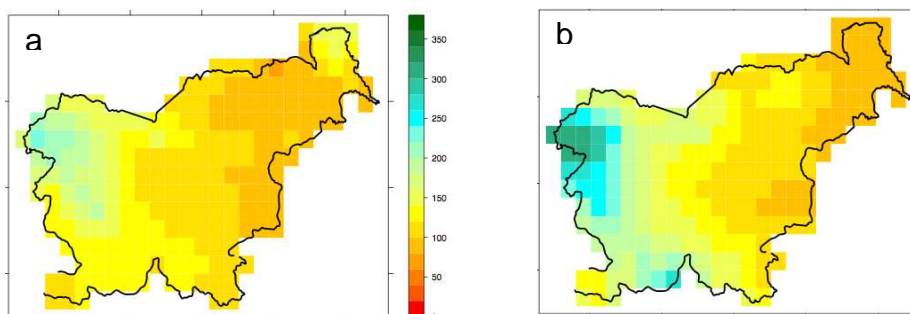


Slika 4. Potek procesa regionalnega klimatskega modeliranja zahteva ansambel simulacij, ki bo določil notranjo variabilnost modela in oceno nedoločenosti, povezano z nedoločenostjo stranskih robnih pogojev.

Regionalno klimatsko modeliranje v Sloveniji

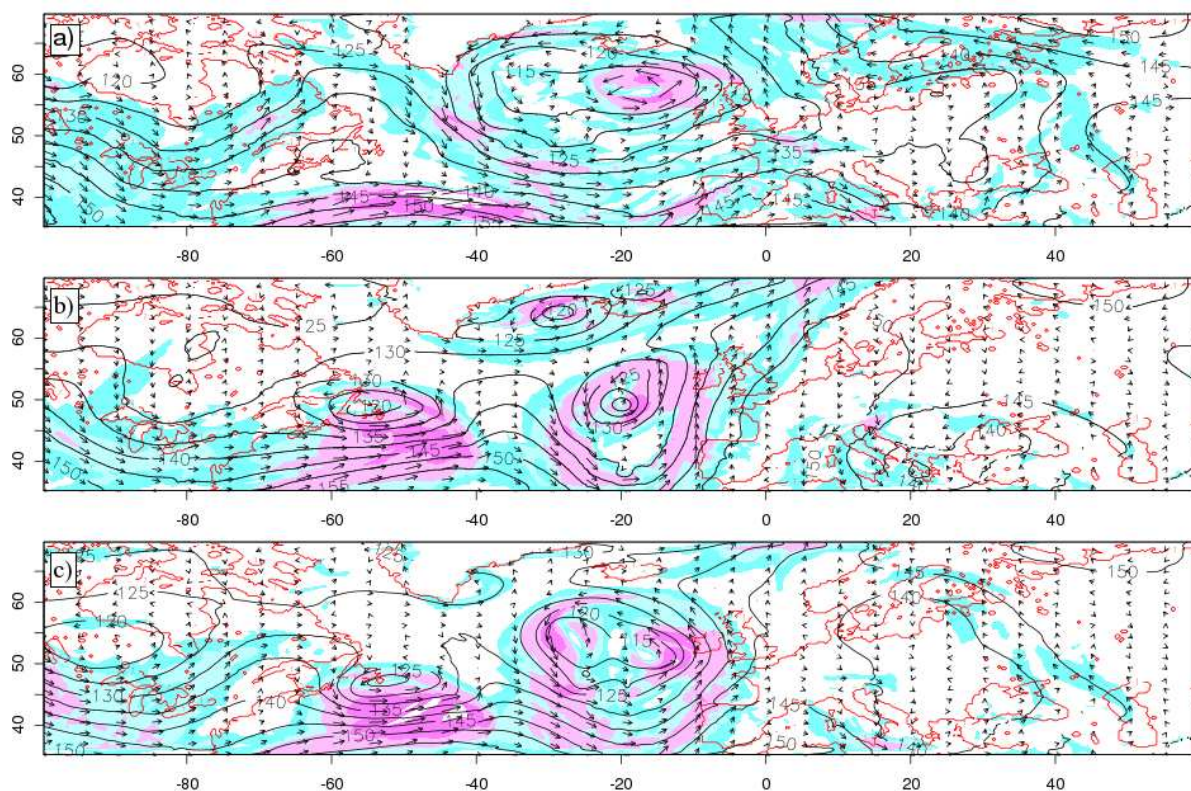
V projektu “Konkurenčnost Slovenije 2006-2013: Numerično modeliranje podnebja z visoko ločljivostjo za pripravo scenarijev podnebnih sprememb v Sloveniji za 21. stoletje“ (nosilci projekta: K. Bergant, M. Žagar, J. Rakovec) so bili verificirani rezultati regionalnega klimatskega modela RegCM3 na območju Slovenije za sedanjo klimo, obdobje 1961-1990. V drugem delu so modelski rezultati za sedanjo klimo primerjani s klimo v prihodnjih obdobjih 2021-2050 in 2071-2100. Stranski robni pogoji so pridobljeni

iz GCM ECHAM4. Slika 5 prikazuje primerjavo izmerjenih mesečnih povprečnih padavin v Sloveniji z modelskimi rezultati, povprečenimi za isto 30-letno obdobje in interpoliranimi v pravilno mrežo ločljivosti $0,25^\circ \times 0,25^\circ$.



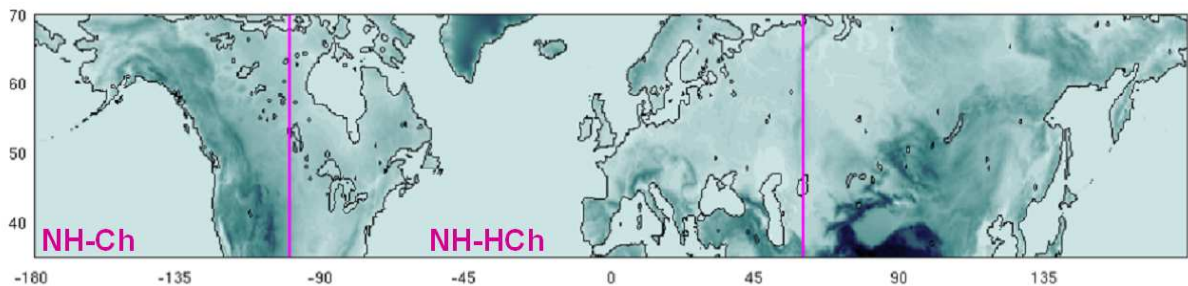
Slika 5: (a) Izmerjene mesečne povprečne padavine v Sloveniji. (b) Padavine modelirane z modelom RegCM3 za isto obdobje. (Vir: Boštjan Muri: Diplomsko delo, 2009)

Pridobljen rezultat je potrebno dodatno ovrednotiti z oceno nedoločenosti. Takšna raziskavo opravljamo v okviru Centra odličnosti Vesolje-SI. Ocene nedoločenosti regionalnih klimatskih simulacij se lotevamo na dva načina. Uporabili bomo rezultate ansambla simulacij RCM za oceno razpršenosti regionalnih modelov nad Slovenijo. V drugi študiji pa bomo ocenjevali notranjo variabilnost posameznega modela. Primer nekaterih rezultatov te raziskave je predstavljen na Sliki 6, ki ilustrira dve lastnosti regionalnih simulacij: notranjo variabilnost regionalnega modela in pomembnost lokacije stranskih robnih pogojev.



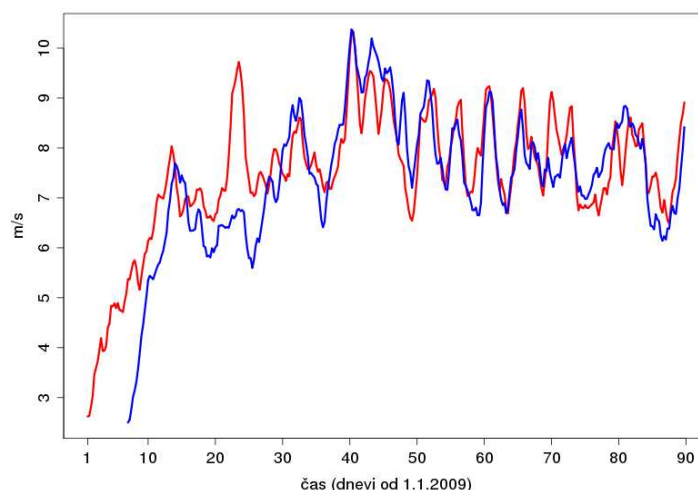
Slika 6. Napoved geopotencialne višine (izolinije) in hitrosti vetra (v barvah) na ploskvi 850 hPa 30. 1. 2009 ob 00 UTC na območju Atlantika in Evrope. V primerih (a - zgoraj) in (b – na sredini) je bila simulacija začeta 1. 1. 2009, v primeru (c - spodaj) pa 7. 1. 2009. Rezultati prikazani na slikah (a) in (c) so iz simulacij na zonalno periodični, neprekinjeni domeni krog in krog Zemlje, v primeru (b) pa je domena v zonalni smeri omejena (glej Sliko 7).

Rezultati, predstavljeni na slikah 6a in 6c, so narejeni na domeni, ki je v zonalni smeri neprekinjena in sega krog in krog Zemlje (globalni kanal, glej Sliko 7). V tem primeru so stranski pogoji predpisani le na severnem in južnem robu domene. Razlika med obema tema simulacijama je le v začetnih pogojih – druga simulacija je začeta nekaj dni po prvi. Po nekaj tednih so razlike lokalno zelo velike, kar je posledica notranje variabilnosti modela (predpostavka 4). Npr. v enem primeru je nad Atlantikom greben (Slika 6a), v drugem dolina (Slika 6c) geopotenciala. Rezultati predstavljeni na Slikah 6a in 6b pa so začeti v istem času, toda v primeru (b) je domena v zonalni smeri omejena (na polovico pasu okrog Zemlje) in s tem je treba predpisovati stranske robne pogoje tudi na zahodnem in vzhodnem robu, kar močno vpliva na dogajanje znotraj domene. V primeru Slike 6c je rezultat nad Atlantikom precej podoben rezultatu 6b, kjer vpliv robnih pogojev predvsem na zahodu močno določa razvoj v notranjosti manjše domene. To dejstvo, da sta si rezultata na Slikah 6b in 6c nad Atlantikom po enem mesecu simulacij tako zelo podobna, je v veliki meri naključno.



Slika 7. Domena numeričnih simulacij predstavljenih na Sliki 6. Velika domena (NH-Ch) je globalni kanal med 35 in 70 stopinj severne zemljepisne širine, ki je v zonalni smeri neprekinjen in sega krog in krog Zemlje. Manjša domena (NH-HCh) je polovica velike domene in zajema polovico severne Amerike, severni Atlantik in Evropo.

Prostorsko povprečen časovni potek napake dveh simulacij zonalnega vetra na 850 hPa v globalnem kanalu je prikazan na Sliki 8. Slika 8 se lahko primerja s Sliko 3. Opazimo, da po približno dveh tednih simulacije, ko še vplivajo začetni pogoji, napaka pride na vrednost, ki ustreza časovnem povprečju, okoli 8 m/s. Povprečna napaka v dveh simulacijah je od prvega meseca naprej približno enaka. Njihove lokalne značilnosti, predstavljene na Slikah 7a,c, so posledica notranje variabilnosti sistema.



Slika 8. Časovni potek napak zonalnega vetra na 850 hPa v simulacijah na globalnem kanalu. Povprečenje je narejeno preko celotne domene.

Zaključki

Sposobnost regionalnih klimatskih modelov, da razvijejo informacijo na visoki ločljivosti, ni vprašljiva. Pri postopku povečevanja ločljivosti opisa klime na omejenem območju so stranski robni pogoji iz globalnega klimatskega modela večinoma glavni vir nedoločenosti. Različne metode povezovanja globalnega in regionalnega klimatskega modela lahko povzročijo različne scenarije o prihodnjih obdobjih tudi v primeru enega globalnega modela. Z drugimi besedami povedano, postopek povečanja ločljivosti ima pristo komponento, ki je posledica notranje variabilnosti regionalnega modela.

Izboljšano prostorsko ločljivost regionalnega klimatskega modela je potrebno predstaviti v kontekstu ostalih nedoločenosti oz. potrebno je določiti relativni pomen nedoločenosti zaradi prostorske skale. Ostali viri nedoločenosti so povezani z uporabo alternativnih scenarijev emisij toplogrednih plinov in aerosolov in z modeliranjem globalnega odziva na emisije v regionalnem modelu v primerjavi z globalnim modelom.

Zahvala

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

Literatura

- Dickinson, R. E., R. M. Errico, F. Giorgi and G. T. Bates, (1989): A regional climate model for the western United States. *Climatic Change* **15**, 383-422.
- Larprise, R. in sod., (2008): Challenging some tenets of regional climate modeling. *Meteorol. Atmos. Phys.* **100**, 3-22.
- Muri, B., (2001): *Projekcije podnebnih sprememb na območju Slovenije z modelom RegCM3* : diplomska naloga, Ljubljana, UL FMF, 60 str. + 1 CD-ROM, COBISS.SI-ID277929
- Oštir, K. in sod., (2011): Uporaba satelitskega daljinskega zaznavanja za napovedovanje in opazovanje poplav, Zbornik predavanj, 16. strokovno srečanje SZGG, Ljubljana, str. 87-93.
- Trenberth, K. (2010): More knowledge, more uncertainty, *Nature Reports Climate Change* Published online: 21 January 2010 | doi:10.1038/climate.2010.06