

MAŠEK, J., 2023. Klimatická konfigurácia modelu ALADIN na ČHMÚ. In: TOLASZ, R., POLCAROVÁ, E. (Eds.), 2023. Sborník příspěvků z První konference projektu PERUN (TA ČR, SS02030040). Praha: ČHMÚ, 45–52, ISBN 978-80-7653-063-8.
<https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.06>

Klimatická konfigurácia modelu ALADIN na ČHMÚ (Climate configuration of the model ALADIN at CHMI)

Ján Mašek, Český hydrometeorologický ústav, jan.masek@chmi.cz

Abstrakt: Pre operatívnu predpoveď počasia na ČHMÚ využívame konfiguráciu ALARO numerického systému ALADIN s horizontálnym rozlíšením 2,3 km. Jedná sa teda už o tzv. konvekciu umožňujúci model. Cieľom prezentovanej práce bolo zhodnotiť potenciál operatívnej ALARO konfigurácie používanej pre oblasť strednej Európy a s minimálnymi úpravami ju využiť pre výpočet podkladových regionálnych klimatických simulácií v projekte PERUN. Boli vykonané testy v duchu tzv. big brother experimentálneho protokolu, demonštrujúce schopnosť regionálneho modelu doplniť v oblasti záujmu na území ČR krátke škály absentujúce v okrajových podmienkach z radiaceho globálneho modelu ESM2-1, a to aj napriek jeho rádovo nižšiemu horizontálnemu rozlíšeniu. Ďalej bolo overené, že vo výpočtovej doméne sú synoptické škály dostatočne kontrolované bočnými okrajovými podmienkami. Vďaka tomu je konzistencia s globálnym scenárom zabezpečená aj bez použitia spektrálneho nudgingu. To umožňuje naplno profitovať z vysokého rozlíšenia regionálneho modelu, keď vnútorná variabilita generovaná konvektívnymi alebo orografickými cirkuláciami nie je umelo obmedzená.

Kľúčové slová: konvekciu umožňujúci regionálny klimatický model – párovanie – skok v rozlíšení – big brother experimentálny protokol

Abstract: For operational weather forecast at CHMI we use the ALARO configuration of the numerical system ALADIN with horizontal resolution 2.3 km. It is so-called convection permitting model. The goal of presented work was to evaluate potential of operational ALARO configuration used for Central Europe, and apply it with minimal changes for baseline regional climate simulations realized within the PERUN project. Tests following the so-called big brother experimental protocol were performed, demonstrating ability of the regional model to add short scales missing in the boundary conditions from driving model ESM2-1 in the region of interest over Czech territory, even though the resolution of driving model is more than order of magnitude coarser. Further it was verified that in the computational domain synoptic scales are sufficiently controlled by lateral boundary conditions. Thanks to this, consistency with driving global scenario is ensured even without use of spectral nudging. Such approach enables to fully profit from high resolution of the regional model, when internal variability generated by convective or orographic circulations is not artificially restricted.

Keywords: convection permitting regional climate model – coupling – resolution jump – big brother experimental protocol

1. Úvod

Numerické simulácie vývoja zemskej klímy si vyžadujú komplexné globálne systémy, zahŕňajúce všetky podstatné komponenty klimatického systému (atmosféra, oceán, sladkovodné plochy, kryosféra, pôdny kryt, biosféra) a interakcie medzi nimi. Tieto systémy sú

extrémne výpočtovo náročné. Horizontálne rozlíšenie použiteľné pre globálne simulácie v časovom rozpätí desaťročí až storočí je preto silne limitované, krok výpočtovej siete sa typicky pohybuje v ráde 100 km. Pri takto slabom rozlíšení musia byť mnohé dôležité procesy, ako napríklad konvekcia, plne parametrizované. Na druhej strane, regionálne modely pre predpoveď počasia v súčasnosti bežne využívajú krok výpočtovej siete pod 3 km, keď už je hlboká konvekcia čiastočne alebo úplne rozlíšená (hovoríme o tzv. konvekciu umožňujúcich modeloch). Tieto modely používajú nehydrostatické dynamické jadro a rozlišujú postačujúcu časť spektra meteorologicky významných gravitačných vln. Jedným z ich hlavných prínosov je realistickejšia simulácia konvektívnych javov, vrátane štatistického výskytu extrémnych úhrnov zrážok.

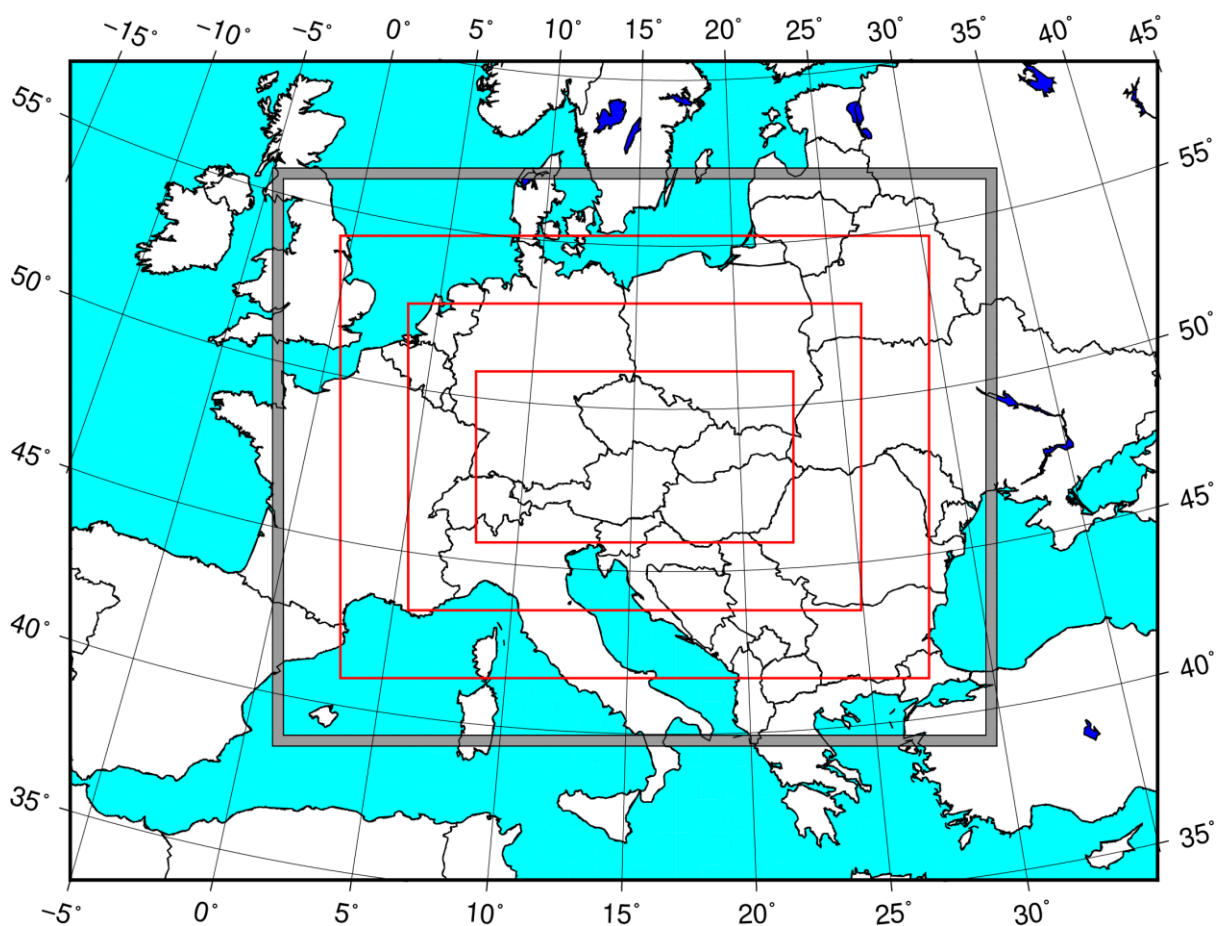
Podobne ako pri numerickej predpovedi počasia, aj pri klimatickom modelovaní je snaha zvýšiť rozlíšenie predpovede v ohraničenej oblasti záujmu použitím vloženého regionálneho klimatického modelu, párovaného s riadiacim globálnym modelom. Pri vhodnej voľbe výpočtovej domény a spôsobu párovania s riadiacim modelom je možné dosiahnuť, že vložený model zachováva dlhé škály popísané riadiacim modelom a dynamicky dotvára kratšie škály správnej amplitúdy. Náplňou prezentovanej práce je demonštrovať, nakoľko úspešne je tento cieľ dosiahnutý v simuláciách s ALARO konfiguráciou systému ALADIN (Termonia et al. 2018) s horizontálnym krokom siete $\Delta x = 2,3$ km, párovanými s reanalýzou ERA5 (Hersbach et al. 2020; $\Delta x = 31$ km), resp. s globálnym systémom CNRM ESM2-1 (Séférian et al. 2019; $\Delta x = 156$ km) na doméne pokrývajúcej strednú Európu. Druhý zmienený systém používame pri simuláciách budúcej klímy podľa vybraných CMIP6 scenárov (Eyring et al. 2016). Tu je hlavným problémom veľký skok v horizontálnom rozlíšení medzi riadiacim a vloženým modelom, dosahujúci hodnotu 67. Ako ukážeme ďalej, aj pri takto veľkom skoku v rozlíšení je možné dostať v regionálnej simulácii hodnoverné krátke škály bez použitia medziľahlého modelu, za predpokladu že výpočtová oblasť pokrýva oblasť záujmu s dostatočnou priestorovou rezervou.

2. Konfigurácia ALARO-Climate

Konfigurácia ALARO-Climate vychádza z operatívnej ALARO konfigurácie používanej pre krátkodobú predpoveď počasia na ČHMÚ (Brožková et al. 2019). Je použitá zhodná výpočtová doména (obr. 1), ako aj nastavenie ladiacich parametrov modelu. Hlavnou odlišnosťou je zvýšenie počtu hladín pri výpočte toku tepla v pôde z dvoch na štyri, tak aby v simuláciách s autonómne cykleným pevninským povrchom bolo možné správne zachytiť nielen denný, ale aj ročný chod povrchovej teploty. Základné nastavenia modelovej konfigurácie ALARO-Climate sú zhrnuté v nasledovnej tabuľke:

krok horizontálnej siete Δx	2,325 km	
počet uzlových bodov	1069x853	
šírka párovacej zóny	16 bodov	
počet vertikálnych hladín	87; strop vo výške ~50 km	
časový krok Δt	90 s	
frekvencia párovania	3 h (ERA5, $\Delta x = 31$ km) 6 h (CNRM ESM2-1, $\Delta x = 156$ km)	
schéma párovania	jednosmerná, relaxačná	Davies (1976)
dynamické jadro	nehydrostatické, spektrálne	Bénard et al. (2010)
vertikálna súradnica	hybridná eta, založená na hydrostatickom tlaku	Laprise (1992)
časová schéma	dvojhladinová, iterované centrovane diferencie	Bénard et al. (2010)

advekčná schéma	semi-lagranžovská	Temperton et al. (2001)
horizontálna difúzia	SLHD	Váňa et al. (2008)
mikrofyzika a sedimentácia		Catry (2006), Geleyn et al. (2008)
hlboká konvekcia	3MT	Gerard et al. (2009)
plytká konvekcia	TOUCANS	Marquet-Geleyn (2013), Bašták Ďurán et al. (2018)
turbulencia	TOUCANS	Bašták Ďurán et al. (2014, 2018), Mašek et al. (2022)
radiácia	ACRANEB2	Mašek et al. (2016), Geleyn et al. (2017)
povrchová schéma	ISBA	Noilhan-Planton (1989), Noilhan-Mahfouf (1996)



Obr. 1 Výpočtová oblasť klimatickej konfigurácie modelu ALADIN na ČHMÚ. Šedý pás predstavuje 16 bodov širokú párovaciu zónu, kde je regionálne riešenie relaxované k riešeniu riadiaceho globálneho modelu. Červené rámiky označujú zóny vzdialené 100, 200 a 300 uzlových bodov od hranice domény.

Fig. 1 Computational domain of climate configuration of the model ALADIN at CHMI. The grey belt represents the 16-point wide coupling zone, where the regional solution is relaxed to the solution of the driving global model. The red frames denote zones 100, 200 and 300 grid-points far from the domain boundary.

3. Párovanie riadiaceho a vloženého modelu

Pri použití jednosmerného párovania riadiaceho modelu s vloženým modelom (Davies 1976) sa vychádza z niekoľkých predpokladov, formulovaných a analyzovaných v práci Laprise et al. (2008). Z nich sú za vhodných podmienok spoľahlivo potvrdené prvé dva:

1. regionálny klimatický model je schopný vygenerovať krátke škály chýbajúce v riadiacich poliach použitých ako bočné okrajové podmienky;
2. takto vygenerované krátke škály majú správne amplitúdy a klimatickú štatistiku.

Treba zdôrazniť, že krátke škály vygenerované vloženým regionálnym modelom podliehajú vnútornej variabilite, ktorá v časovom horizonte klimatických simulácií postráda deterministický charakter. Preto tieto škály nie sú robustne určené okrajovými podmienkami – stačí malá zmena na úrovni numerického šumu a ich realizácia sa zmení. Dôležité pritom ale je, že sa zachová ich klimatická štatistika.

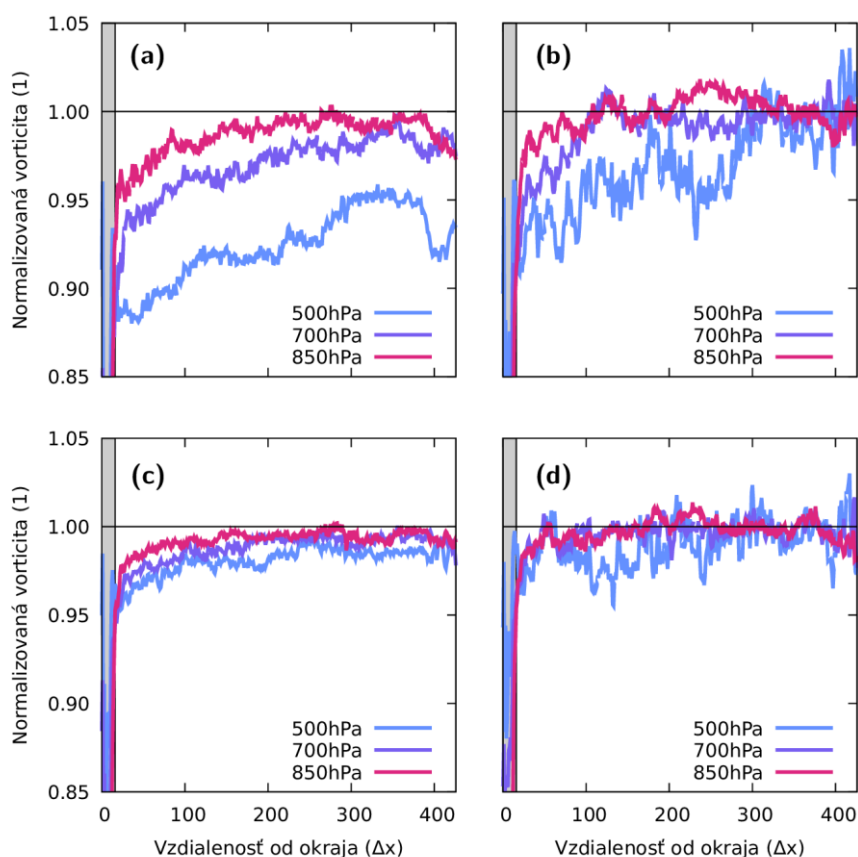
Detailný rozbor v nadväzujúcej práci Matte et al. (2017) ukazuje, že na vygenerovanie správnych krátkych škál musí prúdenie vo vloženom modeli prekonať určitú vzdialenosť od bočného okraja domény, kde prebieha tzv. priestorový spin-up. Táto vzdialenosť je tým väčšia, čím rýchlejšie je prúdenie a čím väčší je skok v rozlíšení medzi riadiacim a vloženým modelom. Krátke škály správnej amplitúdy je teda možné získať len v centrálnej časti domény. Kvantitatívny odhad jej veľkosti je možné urobiť pomocou tzv. big brother experimentálneho protokolu. Pri ňom je najskôr spočítané referenčné riešenie s vysokým rozlíšením na veľkej doméne (veľký brat). Jeho priestorovým filtrovaním sú získané okrajové podmienky s nižším rozlíšením, simulujúce riadiaci model. Tie sú použité pre integráciu modelu s vysokým rozlíšením na malej doméne (malý brat). Variabilita krátkych škál vloženého riešenia je potom porovnaná s variabilitou krátkych škál referenčného riešenia.

Nevýhodou big brother experimentálneho protokolu je nutnosť vykonať dostatočne dlhú referenčnú integráciu s vysokým rozlíšením na podstatne väčšej oblasti ako je zamýšľaná doména regionálneho modelu. V našich podmienkach sa to ukázalo ako výpočtovo neúnosné. Preto sme protokol modifikovali a premenovali ho na experiment malých sestier: Referenčné riešenie získame integráciou na cieľovej doméne, párovanej s operatívnymi analýzami. Tie vďaka lokálnej asimilácii dát kombinovanej s technikou blendingu (Bučánek et al. 2015) obsahujú krátke škály z regionálneho modelu optimálne kombinované s dlhými škálami analyzovanými globálnym modelom ARPEGE technikou 4D variačnej asimilácie. Takto získané referenčné riešenie (bohatá sestra) má realistické spektrum až po vlnovú dĺžku $3\Delta x$, na ktorej je orezaná orografia. Druhá integrácia (chudobná sestra) je urobená s identickými modelovými nastaveniami a na rovnakej doméne, ale s tým rozdielom že operatívne analýzy použité na párovanie sú priestorovo sfilterované na rozlíšenie uvažovaného riadiaceho modelu. Tým simulujeme výpočet na cieľovej oblasti riadený globálnym modelom s nižším rozlíšením. Vyhodnotenie krátkych škál vygenerovaných chudobnou sestrou robíme podobne ako v prípade big brother experimentálneho protokolu, teda ich porovnaním voči bohatej sestre. Vhodným diagnostickým prvkom je pole relatívnej vorticity, ktorého spektrum je bohaté na krátke škály (Matte et al. 2017).

Experiment malých sestier sme vykonali pre zimnú a letnú sezónu. Integračné obdobie malo vždy dva mesiace, pričom prvý mesiac slúžil na odoznenie nerovnováh v počiatočných podmienkach (tzv. časový spin-up) a druhý mesiac bol použitý na výpočet diagnostík. Zimný výpočet štartoval 1. 12. 2021, letný 1. 6. 2022. Diagnostiky sme teda počítali pre január a júl 2022, pričom sme používali hodinové modelové výstupy. Priestorové filtrovanie operatívnych analýz sme robili metódou kízavých priemerov, pričom šírka filtrovacieho okna bola rovná vlnovej dĺžke najkratšej vlny rozlíšenej riadiacim modelom. V našom prípade sme ako riadiaci

model uvažovali ERA5 reanalýzu a systém CNRM ESM2-1. Okrem referenčného výpočtu bohatej sestry sme teda urobili dva výpočty chudobných sestier.

Výsledky experimentov sú zhrnuté na obr. 2. Zobrazená je tam stredná kvadratická hodnota relatívnej vorticity normalizovaná referenčnou hodnotou, ako funkcia vzdialenosti od okraja domény. Pole vorticity sme najskôr sfilterovali pomocou kízavých priemerov s oknom 11x11 bodov. Takto sfilterované pole vorticity sme odpočítali od pôvodného poľa, čím sme izolovali vlny kratšie ako $11\Delta x$ (26 km). Výpočet strednej kvadratickej hodnoty sme robili pre rámiky s konštantnou vzdialenosťou od okraja domény, pričom ustredňovanie zahŕňalo aj časový rozmer. Takto získaná stredná hodnota charakterizuje mesačnú variabilitu krátkych škál vorticity v danej vzdialenosti od okraja domény. Jej pomer k referenčnej hodnote ukazuje, či majú krátke škály vygenerované chudobnou sestrou správnu amplitúdu. Pomer väčší ako jedna znamená nadhodnocovanie krátkych škál, pomer menší ako jedna ich podhodnocovanie. Diagnostiku sme robili na štandardných tlakových hladinách 500, 700 a 850 hPa, reprezentujúcich spodnú polovicu troposféry.



Obr. 2 Normalizovaná stredná kvadratická vorticity vln kratších ako $11\Delta x$ (26 km) na hladinách 500, 700 a 850 hPa, vynesená ako funkcia vzdialenosti od okraja domény. Hore: párovanie s rozlíšením zodpovedajúcim CNRM ESM2-1 dátam ($\Delta x = 156$ km) pre január (a) a júl (b). Dolu: párovanie s rozlíšením zodpovedajúcim ERA5 dátam ($\Delta x = 31$ km) pre január (c) a júl (d). Šedý pás označuje párovaciu zónu.

Fig. 2 Normalized root mean square vorticity of the waves shorter than $11\Delta x$ (26km) on 500, 700 and 850hPa levels, plotted as a function of distance from the domain boundary. Top: coupling with resolution corresponding to CNRM ESM2-1 data ($\Delta x = 156$ km) for January (a) and July (b). Bottom: coupling with resolution corresponding to ERA5 data ($\Delta x = 31$ km) for January (c) and July (d). The grey belt represents the coupling zone.

Na základe obr. 2 môžeme vyvodiť nasledovné závery:

1. Krátke škály absentujú v párovacej zóne, ale rýchlo sa dotvárajú smerom dovnútra domény. Najrýchlejšie sú generované na hladine 850hPa, najpomalšie na hladine 500hPa. Deficit krátkych škál je väčší v zime ako v lete. Obe tieto pozorovania súvisia s väčšou rýchlosťou vetra vo výške, resp. v zime – prúdenie prekoná väčšiu vzdialenosť kým priestorový spin-up dynamicky vygeneruje krátke škály.
2. Čím väčší je skok v rozlíšení, tým širšiu zónu zaberá priestorový spin-up. V najnepriaznivejšom prípade – párovanie so systémom CNRM ESM2-1 v zime, panel (a) – sa krátke škály na hladine 850 hPa dostanú na úroveň referencie cca 250 bodov od okraja domény, čo dostatočne pokrýva našu oblasť záujmu, ktorou je územie ČR. Na hladine 500 hPa dosiahnu v tomto prípade krátke škály maximálne 95 % referenčnej hodnoty, čo nepredstavuje problém, keďže kľúčovým výstupom z klimatických simulácií sú prízemné prvky. V lete pri párovaní so systémom CNRM ESM2-1 dosahujú krátke škály na všetkých hladinách referenčnú hodnotu najneskôr vo vzdialenosti 300 bodov od okraja domény – panel (b), čo pokrýva celú oblasť nášho záujmu.
3. Pri párovaní s ERA5 reanalýzou je situácia podstatne priaznivejšia. V zime sa krátke škály na hladine 500 hPa saturujú na 98 % referenčnej hodnoty, zatiaľ čo priestorový spin-up na hladine 850 hPa zaberá zónu širokú 150 bodov, panel (c). V lete takto široká zóna postačuje aj pre priestorový spin-up na hladine 500 hPa, panel (d). Párovanie s ERA5 reanalýzou teda podstatne rozširuje oblasť, v ktorej naplno využívame vysoké rozlíšenie konfigurácie ALARO-Climate. Reanalýzu ale nie je možné použiť na riadenie simulácií budúcej klímy.

Druhou dôležitou otázkou je, nakoľko riešenie vloženého regionálneho modelu reprodukuje dlhé škály z riadiaceho modelu. Pre veľké domény nemusí byť kontrola regionálneho modelu prostredníctvom bočných okrajových podmienok dostatočná – ďaleko od okrajov regionálny model môže vygenerovať vlastnú synoptickú cirkuláciu nekonzistentnú s riadiacim modelom. V takom prípade treba dlhé škály v regionálnom modeli kontrolovať pomocou techniky tzv. spektrálneho nudgingu (Radu et al. 2008). Pri menších doménach to nutné nie je. Aby sme overili že je to aj náš prípad, spočítali sme strednú kvadratickú odchýlku geopotenciálu na hladine 500 hPa (referencia voči analýze) pre dvojmesačnú sériu polí s krokom 6 hodín. V najnepriaznivejšom prípade bol Pearsonov korelačný koeficient referenčnej predpovede s analýzou, spočítaný cez celú doménu, rovný 0,987. To je veľmi dobrá zhoda, potvrdzujúca konzistenciu vygenerovaného veľkoškálového prúdenia s riadiacim modelom. Na doméne pokrývajúcej strednú Európu teda spektrálny nudging nie je potrebný.

4. Záver

Hlavnou motiváciou pri navrhovaní konfigurácie ALARO-Climate bolo v maximálnej miere využiť schopnosti operatívnej ALARO konfigurácie prevádzkovej na ČHMÚ v konvekciu umožňujúcim rozlíšení 2,3 km. Zvláštnu pozornosť si pritom vyžiadala párovacia stratégia, keďže skok v rozlíšení je pri párovaní s globálnym systémom CNRM ESM2-1 rádovo vyšší ako v režime krátkodobej predpovede počasia (67 versus 3). Ukázali sme, že aj pri takto vysokom skoku v rozlíšení je možné použiť párovanie bez medziľahlého modelu, čo predstavuje značné technické zjednodušenie. Pomocou experimentu malých sestier sme demonštrovali, že naša výpočtová doména je dostatočne veľká na to, aby sa cez priestorový spin-up v oblasti záujmu vygenerovali krátke škály absentujúce v riadiacom modeli. Na druhej strane je dostatočne malá na to, aby synoptická cirkulácia bola kontrolovaná okrajovými podmienkami, bez nutnosti použiť spektrálny nudging. To zaručuje vnútornú konzistenciu vloženého riešenia naprieč celým spektrom rozlíšených škál.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou TA ČR, projektu SS02030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“.

Literatura

- BAŠTÁK ĎURÁN, I., GELEYN, J.-F., VÁŇA, F., 2014. A Compact Model for the Stability Dependency of TKE Production–Destruction–Conversion Terms Valid for the Whole Range of Richardson Numbers. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3004–3026. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0203.1>
- BAŠTÁK ĎURÁN, I., SCHMIDLI, J., BROŽKOVÁ, R., 2018. A turbulence scheme with two prognostic turbulence energies. *J. Atmos. Sci.*, **75**, 3381–3402. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0026.1>
- BÉNARD, P., VIVODA, J., MAŠEK, J., SMOLÍKOVÁ, P., YESSAD, K., SMITH, C., BROŽKOVÁ, R., GELEYN, J.-F., 2010. Dynamical kernel of the ALADIN-NH spectral limited-area model: Revised formulation and sensitivity experiments. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 155–169. <https://doi.org/10.1002/qj.522>
- BROŽKOVÁ, R., BUČÁNEK, A., MAŠEK, J., SMOLÍKOVÁ, P., TROJÁKOVÁ, A., 2019. Nová provozní konfigurace modelu ALADIN ve vysokém rozlišení. *Meteorologické Zprávy*, 68, 180–185. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2019/chmu_mz_5-19.pdf
- BUČÁNEK, A., TROJÁKOVÁ, A., BROŽKOVÁ, R., 2015. Asimilační schéma BlendVar v ČHMÚ. *Meteorologické Zprávy*, **72**, 129–139, Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/reditel/SIS/casmz/assets/2015/chmu_mz_6-15.pdf
- CATRY, B., 2006. Effects of moisture and mountains in Numerical Weather Prediction. Ph.D. thesis, University of Ghent.
- DAVIES, H. C., 1976. A lateral boundary formulation for multilevel prediction models. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **102**, 405–418. <https://doi.org/10.1002/qj.49710243210>
- EYRING, V., BONY, S., MEEHL, G. A., SENIOR, C. A., STEVENS, B., STOUFFER, R. J., TAYLOR, K. E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, **9**, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- GELEYN, J.-F., CATRY, B., BOUTELOUP, Y., BROŽKOVÁ, R., 2008. A statistical approach for sedimentation inside a micro-physical precipitation scheme. *Tellus A*, **60**, 649–662. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2008.00323.x>
- GELEYN, J.-F., MAŠEK, J., BROŽKOVÁ, R., KUMA, P., DEGRAUWE, D., HELLO, G., PRISTOV, N., 2017. Single interval longwave radiation scheme based on the net exchange rate decomposition with bracketing. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 1313–1335. <https://doi.org/10.1002/qj.3006>
- GERARD, L., PIRIOU, J.-M., BROŽKOVÁ, R., GELEYN, J.-F., BANCIU, D., 2009. Cloud and precipitation parameterization in a meso-gamma-scale operational weather prediction model. *Mon. Weather Rev.*, **137**, 3960–3977. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2750.1>
- HERSBACH, H., et al., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **146**, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

- LAPRISE, R., 1992. The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Mon. Weather Rev.*, **120**, 197–207. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<0197:TEFOMW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<0197:TEFOMW>2.0.CO;2)
- LAPRISE, R., et al., 2008. Challenging some tenets of Regional Climate Modelling. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **100**, 3–22. <https://doi.org/10.1007/s00703-008-0292-9>
- MARQUET, P., GELEYN, J.-F., 2013. On a general definition of the squared Brunt–Väisälä frequency associated with the specific moist entropy potential temperature. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **139**, 85–100. <https://doi.org/10.1002/qj.1957>
- MAŠEK, J., GELEYN, J.-F., BROŽKOVÁ, R., GIOT, O., ACHOM, H. O., KUMA, P., 2016. Single interval shortwave radiation scheme with parameterized optical saturation and spectral overlaps. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 304–326. <https://doi.org/10.1002/qj.2653>
- MAŠEK, J., BAŠTÁK ĎURÁN, I., BROŽKOVÁ, R., 2022. Stable Numerical Implementation of a Turbulence Scheme with Two Prognostic Turbulence Energies. *Mon. Weather Rev.*, **150**, 1667–1688. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0172.1>
- MATTE, D., LAPRISE, R., THÉRIAULT, J. M., LUCAS-PICHER, P., 2017. Spatial spin-up of fine scales in a regional climate model simulation driven by low-resolution boundary conditions. *Clim. Dyn.*, **49**, 563–574. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3358-2>
- NOILHAN, J., PLANTON, S., 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather Rev.*, **117**, 536–549. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2)
- NOILHAN, J., MAHFOUF, J.-F., 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Glob. Plan. Change*, **13**, 145–159. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00043-7)
- RADU, R., DÉQUÉ, M., SOMOT, S., 2008. Spectral nudging in a spectral regional climate model. *Tellus*, **60A**, 898–910. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2008.00341.x>
- SÉFÉRIAN, R., et. al., 2019. Evaluation of CNRM Earth System Model, CNRM-ESM2-1: Role of Earth System Processes in Present-Day and Future Climate. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **11**, 4182–4227. <https://doi.org/10.1029/2019MS001791>
- TEMPERTON, C., HORTAL, M., SIMMONS, A., 2001. A two-time-level semi-Lagrangian global spectral model. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 111–127. <https://doi.org/10.1002/qj.49712757107>
- TERMONIA, P., et al., 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 257–281. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>
- VÁŇA, F., BÉNARD, P., GELEYN, J.-F., SIMON, A., SEITY, Y., 2008. Semi-Lagrangian advection scheme with controlled damping: An alternative to nonlinear horizontal diffusion in a numerical weather prediction model. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 523–537. <https://doi.org/10.1002/qj.220>