

NOVÁ PROVOZNÍ KONFIGURACE MODELU ALADIN VE VYSOKÉM ROZLIŠENÍ

Radmila Brožková, Antonín Bučánek, Ján Mašek, Petra Smolíková, Alena Trojáková,
Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 17, 143 06, Praha 4-Komořany, radmila.brozkova@chmi.cz,
antonin.bucanek@chmi.cz, jan.masek@chmi.cz, petra.smolikova@chmi.cz, alena.trojakova@chmi.cz

New high-resolution operational configuration of the ALADIN model. We present an overview on how the ALADIN model version, operated by the Czech Hydrometeorological Institute, has been upgraded to the convection permitting resolution of 2.325 km together with the implementation of the non-hydrostatic, fully elastic dynamical core. We shortly describe all the necessary steps of the upgrade starting with the domain definition adaptations including relevant topographic characteristics and going through the new settings of the forecasting model including the dynamical core and physics' parametrizations. We also mention changes in the data assimilation algorithms. Finally, we discuss results of the new model version in comparison with the previous operational model version at the resolution of 4.711 km, and we show some new model outputs linked to the high resolution like the simulated radar reflectivity. Main directions of future research and model developments are given at the end.

KLÍČOVÁ SLOVA: předpověď počasí numerická – model ALADIN – rozlišení měřítek konvekce – dynamické jádro nehydrostatické – parametrizace – asimilace dat – statistická skóre modelu

KEYWORDS: numerical weather prediction – ALADIN model – convection permitting scales – non-hydrostatic dynamical core – parametrizations – data assimilation – statistical model scores

1. ÚVOD

Od března 2019 přešla hlavní provozní aplikace modelu ALADIN¹⁾ v ČHMÚ na novou verzi, jejímiž dvěma hlavními charakteristikami je zvýšení horizontálního rozlišení ze 4,711 km na 2,325 km a použití nehydrostatického dynamického jádra. Model nyní explicitně popisuje jemnější cirkulační útvary, přičemž využívá komplexnější soustavu rovnic popisujících dynamiku a termodynamiku atmosféry. S tím jsou spojené vyšší výpočetní nároky, které si můžeme v reálném provozu dovolit pouze díky novému superpočítači instalovanému v květnu 2018.

V tomto článku stručně popisujeme přehled parametrů nové provozní verze modelu ALADIN v ČHMÚ, včetně kroků vedoucích k její implementaci. ČHMÚ vyvíjí numerický předpovědní systém ALADIN (Termonia et al. 2018) v rámci mezinárodních konsorcií ALADIN a RC LACE (Wang et al. 2018). ALADIN původně vznikl jako regionální verze globálního modelu ARPEGE Météo-France. V současné době obsahuje tzv. kanonické modelové konfigurace (Termonia et al. 2018), které se od sebe liší fyzikálními parametrizacemi. V ČHMÚ jsme i pro další provoz vybrali kanonickou modelovou konfiguraci ALARO, na jejímž vývoji se dlouhodobě podílíme a která je koncipována pro využití v širokém pásmu horizontálních rozlišení od desítek kilometrů po stovky metrů.

Článek je rozdělen do sekcí, které odpovídají chronologickému postupu přípravy nové verze provozního modelu. V následující druhé sekci popisujeme charakteristiky nové výpočetní oblasti, která musela být definována nejdříve. Třetí sekce představuje zavedení nehydrostatického dynamického jádra a nastavení schématu horizontální difuze ve vysokém rozlišení. Soubor fyzikálních parametrizací, který tvoří kanonickou modelovou konfiguraci ALARO, je uveden ve čtvrté sekci. Zde jsou rozebrány nové úpravy a nastavení u těch schémat, kde to bylo v souvislosti se zvýšením horizontálního rozlišení potřeba. V páté sekci se věnujeme algoritmům asimilačního cyklu, kde se úpravy parametrů týkaly především atmosférické části. Příklady výsledků pro vybraná zimní a letní testovací období ve srovnání s referenční provozní verzí modelu jsou v šesté sekci, včetně ukávek nových výstupů z modelu. Závěrečné shrnutí a hlavní směry dalšího vývoje provozní verze modelu jsou obsahem poslední sedmé sekce.

2. VÝPOČETNÍ OBLAST A TOPOGRAFICKÁ DATA

Zvýšení horizontálního rozlišení si vyžádalo novou definici výpočetní oblasti, tj. její zeměpisné polohy a počtu bodů. Základní požadavky bylo zachovat rozlohu oblasti a zároveň zvýšit horizontální rozlišení na dvojnásobek vůči stávající konfiguraci. Dalším faktorem je skutečnost, že ALADIN je spektrální model a pro projekci mezi prostorem uzlových bodů a prostorem spektrálních koeficientů využívá algoritmu rych-

¹⁾ Akronym *Aire Limitée Adaptation Dynamique développement International*

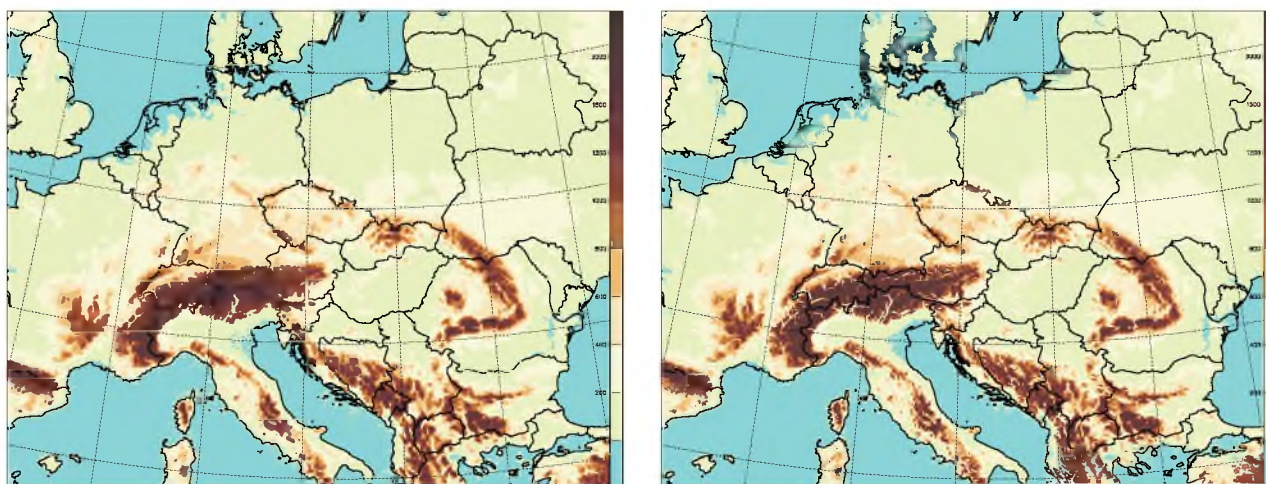
lé Fourierovy transformace (z angl. Fast Fourier Transform, zkratka FFT, viz Temperton (1992)). Implementace tohoto algoritmu vyžaduje, aby byl počet uzlových bodů ve tvaru $2^p 3^q 5^r$, kde p , q a r jsou nezáporná celá čísla. Z výše uvedených požadavků vyplynulo horizontální rozlišení modelu 2,325 km, přičemž kroky sítě jsou stejné v obou směrech: $\Delta x = \Delta y$. Izotropní rozlišení se vztahuje k rovině mapy, kdy v našem případě využíváme konformní Lambertovu projekci tečnou ve středu oblasti. Tato volba se vyznačuje malým délkojevným zkreslením v mírných šířkách, viz např. Bařka (2004). Vlastní výpočetní oblast je popsána 1 069 body podél osy x a 853 body podél osy y , z nichž pás o šířce $16\Delta x$ tvoří u vnějších okrajů zónu párování s globálním modelem. V předchozí verzi byl tento pás široký $8\Delta x$. V novém rozlišení jsme se rozhodli zachovat fyzický rozměr zóny párování zdvojnásobením počtu kroků sítě. V obou směrech je navíc přidána matematická zóna šířky $11\Delta x$ sloužící k dosažení bi-periodicity polí, která je obecně vyžadována pro aplikaci bi-Fourierovy transformace. Výsledná síť má tudíž $1\,080 \times 864$ bodů a vyhovuje podmínce pro využití našeho algoritmu FFT. Počet vertikálních hladin zůstává 87 s nejnižší hladinou přibližně 10 m nad terénem a nejvyšší hladinou přibližně kopírující izobarickou hladinu 50 Pa (cca 50 km).

Pro každý bod sítě byly následně určeny topografické a další fyziografické charakteristiky. Výška orografie byla určena jako střední hodnota z údajů databáze GMTED2010 (Global Multi-Resolution Terrain Elevation Data, U. S. Geological Survey, <https://www.usgs.gov/>) s rozlišením 7,5". Orografie modelu je následně ve spektrálním rozvoji oříznuta tak, aby měla nejkratší vlnovou délku $3\Delta x$. Tím se předchází numerickým problémům stacionárního silového účinku orografie o vlnové délce $2\Delta x$. Výsledné pole orografie na nové výpočetní oblasti je znázorněno na obr. 1 spolu s orografií předchozí oblasti v rozlišení 4,711 km pro srovnání. Pole orografie a jeho derivace vstupují do výpočtů dynamiky modelu. Stále ale existují menší orografické překážky, které nejsou rozlišené, a jejichž dynamický účinek je potřeba parametrizovat. Proto se určují další topografické charakteristiky, kterými jsou variance, anisotropie a orientace nerozlišené orografie a také orografická drsnost. Protože výpočet těchto polí vyžaduje určení tenzorových veličin, které ještě nebyly připraveny se vstupy z GMTED2010, jsou tato pole prozatím určena ze starší topografické databáze GTOPO30 s rozlišením 30".

3. DYNAMICKÉ JÁDRO

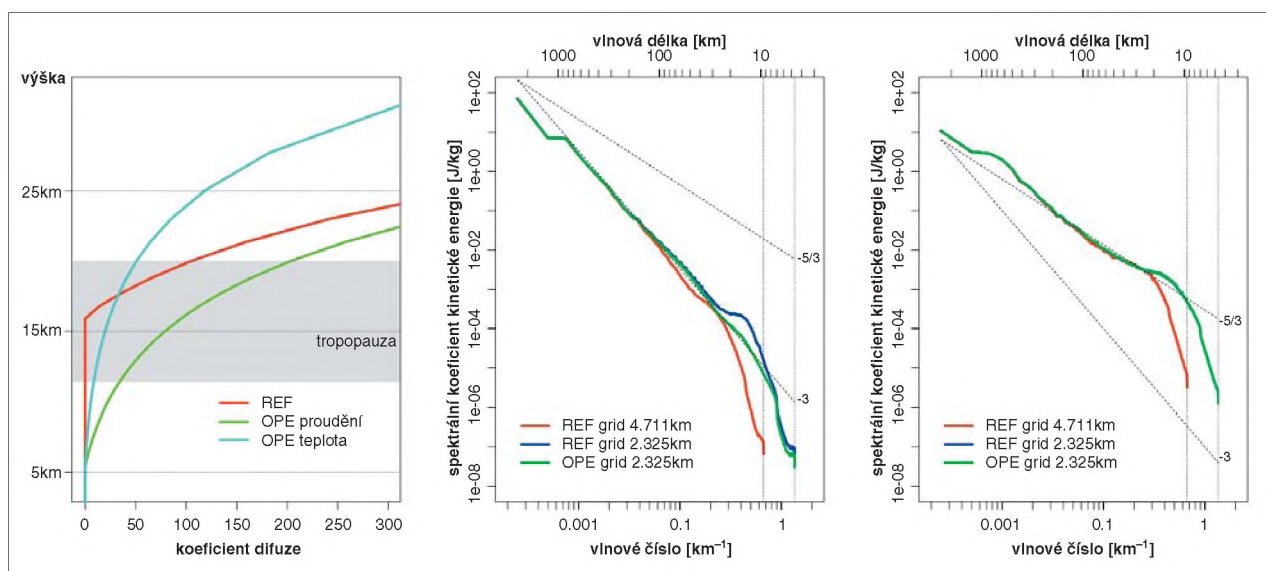
Při přechodu z horizontálního rozlišení 4,711 km na rozlišení 2,325 km jsme překonali pomyslnou hranici pro smysluplnou aplikaci předpokladu, že se atmosféra nachází v hydrostatické rovnováze. Horizontální měřítko nejmenších rozlišených jevů je nyní srovnatelné s jejich vertikálním měřítkem daným charakteristickou hloubkou atmosféry. Protože typicky konvekce je nehydrostatický jev, jsou tato měřítka v anglické literatuře často označována jako tzv. *convection permitting scales*. Opuštění hypotézy hydrostatické rovnováhy je v modelu realizováno změnou systému základních rovnic z HPE (Hydrostatic Primitive Equations) na NHE (NonHydrostatic Euler equations), které nově popisují atmosféru jako plně stlačitelnou. Taková změna není jednoduchá, protože nalézt stabilní a dostatečně přesné řešení systému rovnic NHE je podstatně složitější než pro jednodušší HPE systém, zvláště při požadavku srovnatelné délky časového kroku. První práce na nehydrostatické verzi modelu započaly roku 1993. Byla to premiéra realizace systému rovnic s vertikální souřadnicí založenou na tzv. hydrostatickém tlaku, využívající semi-implicitní, tří hladinové časové schéma s tehdy ještě Eulerovskou advekcí, viz Bubnová et al. (1995). Prototyp NHE byl během následných let zdokonalován. Z hlediska lepší kontroly numerické stability došlo k vhodnější volbě dvou nových modelových proměnných, které reprezentují vertikální složku rychlosti proudění a odchylku reálného tlaku od jeho hydrostatické aproximace. Spolu s tím byla zavedena možnost iterace časového schématu. Použitá metoda nese název *iterativní centrovaná implicitní metoda* (ICD), viz Bénard (2003). Jejím využitím dosáhneme relativně dlouhých časových kroků, které by bez ní byly nemyšlitelné. Obvykle stačí použít jednu iteraci k významnému zvýšení stability. Početní nároky kvůli iteraci sice stoupnou, ale výhoda dlouhého časového kroku převažuje. Se zahrnutím dvou nových prognostických rovnic potřebujeme pro plně elastický nehydrostatický model asi 1,5násobek výpočetního času nutného pro model s hydrostatickou aproximací při zachování horizontálního i vertikálního rozlišení a délky časového kroku. Komplexní popis současné formulace nehydrostatické verze modelu ALADIN čtenář najde v Bénard et al. (2010).

Pro advekci je používáno semi-Lagrangeovské schéma, kde se trajektorie počítají iterativně pomocí metody druhého řádu přesnosti SETTLS (Stable Extrapolation Two-Time-



Obr. 1 Orografie výpočetní oblasti modelu ALADIN v rozlišení 4,711 km (vlevo) a 2,325 km (vpravo).

Fig. 1. Orography of the ALADIN model computational domain at the resolution of 4,711 km (left) and 2,325 km (right).



Obr. 2 Vertikální profil difuzního koeficientu pro spektrální difuzi (panel vlevo), spektrum kinetické energie v závislosti na vlnovém čísle pro horní část atmosféry (panel uprostřed – průměr pro výškové hladiny 5 až 50 km; panel vpravo – průměr pro výškové hladiny 0 až 5 km, modrá a zelená křivka se zde překrývají). REF = nastavení difuze použité v operativní aplikaci s horizontálním rozlišením 4,711 km, OPE = nové nastavení difuze použité v operativní aplikaci s horizontálním rozlišením 2,325 km. Přerušované čáry ukazují v atmosféře pozorované lineární závislosti podle Nastroma a Gage (1985).
 Fig. 2. Vertical profile of spectral diffusion coefficient (left); kinetic energy spectrum as a function of wave number for upper atmosphere (middle – average for height levels from 5 to 50 km; right – average for height levels from 0 to 5 km, blue and green curves are overlapping here). REF = diffusion setting used in the operational application with the horizontal resolution of 4.711 km, OPE = new diffusion setting used in the operational application with the horizontal resolution of 2.325 km. Dashed lines mark linear dependencies observed in the atmosphere following Nastrom and Gage (1985).

Level Scheme, Hortal 2002). Při zvýšení rozlišení bylo nutné zvýšit počet iterací ve schématu advekce z původně dvou na čtyři, zejména kvůli strmější orografii. Naštěstí tento výpočet není náročný na strojový čas. Trajektorie pro schéma advekce, numerická difuze, ale také fyzikální parametrizace se během časového kroku počítají pouze jednou, poté se ukládají, a v následné iteraci časového schématu jsou pouze načteny. Naopak semi-implicitní schéma, interpolace nutné pro schéma advekce a transformace polí mezi prostorem uzlových bodů a spektrálními koeficienty je nutné provést ve všech iteracích metody ICI. Kromě popsaných změn došlo také ke změně vertikální diskretizace. Pro nehydrostatický model upouštíme od metody konečných prvků (Untch, Hortal 2004) a uplatňujeme jednodušší metodu konečných diferencí. Varianta metody konečných prvků pro rovnice NHE byla sice již odvozena, viz Vivoda et al. (2018), ale ještě není plně připravena pro provozní využití.

V neposlední řadě bylo nutné přeladit horizontální difuzi. Ta v modelu slouží k odstranění šumu krátkých vlnových délek, který vzniká jako důsledek nedokonalosti numerického řešení meteorologických rovnic. Navíc konečná reprezentace meteorologických veličin neumožňuje přesný popis nejkratších vln, jejichž další interakce přenáší energii směrem k delším vlnám a znehodnocuje řešení. Horizontální difuze umožňuje potlačit tyto krátké vlny selektivně v závislosti na horizontálním rozlišení modelu. Pro model ALADIN bylo k tomuto účelu vyvinuto originální schéma SLHD (Semi-Lagrangian Horizontal Diffusion, Vaňa et al. 2008), které je kombinací lineární spektrální difuze účinkující přímo na spektrální koeficienty polí a nelineární lokální difuze využívající interpolační charakteristiky semi-Lagrangeovské advekce. Spektrální difuze se aplikuje explicitně na všechny dynamické modelové proměnné ve vysoké atmosféře, zatímco nelineární difuze se aplikuje v celé hloubce atmosféry jak

na dynamické proměnné, tak na pole měrné vlhkosti a na další vybraná pole definovaná pouze v prostoru uzlových bodů, jako jsou pole oblačné vody a ledu, turbulentní kinetické energie, atd. Na obr. 2 je spektrum kinetické energie v závislosti na vlnovém čísle, které ukazuje, jak nedostatek disipace ve vysoké troposféře způsobuje akumulaci energie ve vyšších vlnových číslech (modrá křivka na prostředním panelu). To se projeví jako šum v polích modelových proměnných. K jeho odstranění jsme museli aplikovat spektrální difuzi v širší vrstvě atmosféry začínající u stropu modelu a končící v horní troposféře. Navíc bylo nutné ladit spektrální difuzi odděleně pro teplotu a pro proměnné charakterizující proudění vzduchu (vorticita a divergence). Jako výsledek všech výše zmíněných úprav se nám podařilo získat nastavení, které umožňuje použít časový krok 90 s spolu s jednou iterací časového schématu ICI. Podrobnosti jsou uvedeny v technickém dokumentu ČHMÚ (Smolíková 2019).

4. PARAMETRIZACE FYZIKÁLNÍCH PROCESŮ

Zvýšení horizontálního rozlišení modelu posunuje spektrum explicitně popsaných měřítek cirkulace směrem k jemnějším strukturám. To je podpořeno detailnější informací o charakteristikách povrchu, zejména orografie. Z tohoto důvodu je obecně potřeba revidovat použití nebo adaptaci parametrů u těch schémat, kde je proces již explicitně popsán, anebo kde se mění vstupy v podobě například ještě nerozlišené orografie a dalších fyziografických dat. Dále je nutné vzít v úvahu ta schémata, v nichž není adekvátně zohledněn tzv. multi-měřítkový aspekt, tedy adaptace na změnu horizontálního rozlišení. V úvodu jsme zmínili využití kanonické modelové konfigurace ALARO. Jejím silným koncepčním prvkem je definice systému řídicích rovnic pro tzv. fyziku modelu (tj. turbulenci, záření, oblačnost, srážkové procesy, atd.), podobně jako jsou definovány řídicí rovnice dynamického jádra. Tento systém,

ve kterém je přijat konkrétní soubor hypotéz, je respektován všemi schémata, která dané procesy parametrizují nebo explicitně modelují, a tak zajišťuje jejich konzistenci. Je pro něj formulován konzervativní interface s dynamickým jádrem modelu (Cathy et al. 2007). Hlavní atmosférická schémata se opírají o nedávné teoretické poznatky, které jsou kombinovány s výše zmíněným principem konsistence a s efektivním numerickým řešením. Schéma turbulence a mělké konvekce TOUCANS využívá dvou prognostických turbulentních energií a nové formulace výpočtu Brunt-Väisälövy frekvence (Bašták Ďurán et al. 2014; 2018). Přesnější parametrizace radičního přenosu ACRANE2 umožňuje počítat interakci s oblačností v každém časovém kroku modelu bez neúměrných požadavků na výpočetní čas (Mašek et al. 2016; Geleyn et al. 2017). Samotná parametrizace oblačnosti vstupující do schématu záření vychází z práce Xu a Randall (1996). Schéma hluboké konvekce 3MT (Gerard et al. 2009) je kcipováno jako multi-měřítkové, a lze ho použít i tehdy, kdy je hluboká konvekce pouze částečně rozlišena, což platí i pro horizontální rozlišení 2,325 km. Dodejme, že hranice, od které není třeba parametrizaci hluboké konvekce používat, není přesně dána, a že v konkrétních případech podléhá pragmatickému rozhodnutí pro rozlišení v rozmezí přibližně od 2,5 km do 1 km. Schéma účinků nerozlišené orografie je popsáno v Cathy et al. (2008). Procesy zemského povrchu a jeho interakce s atmosférou řeší schéma ISBA (Noilhan a Planton 1989; Noilhan a Mahfouf 1996). V dalším krátce shrneme změny v parametrizacích modelu, které si přechod na horizontální rozlišení 2,325 km vyžádá.

4.1 Parametrizace účinků nerozlišené orografie

Schéma účinků nerozlišené orografie zahrnuje: (i) vznik tzv. gravitačních vln a depozici jejich hybnosti s výškou; (ii) účinky obtékání, které závisí na tvaru překážky; (iii) laterální účinek objemu nerozlišené orografie, který je simulován proporcionálním zvýšením Coriolisova efektu. Tyto parametrizace pracují se sub-měřítkovými topografickými veličinami – variancí, anizotropií a orientací nerozlišené orografie ve výpočetní buňce. Se zvyšujícím se rozlišením modelu se automaticky snižuje sub-měřítková variance orografie a schéma účinku méně, až při dostatečně vysokém rozlišení není potřeba. Z nerozlišených topografických polí pak zbyde pouze tzv. orografická drsnost generující turbulenci. Přesná hranice rozlišení, od kterého již není třeba schéma používat, není teoreticky určena. Diskuse v Cathy et al. (2008) zmiňuje, že

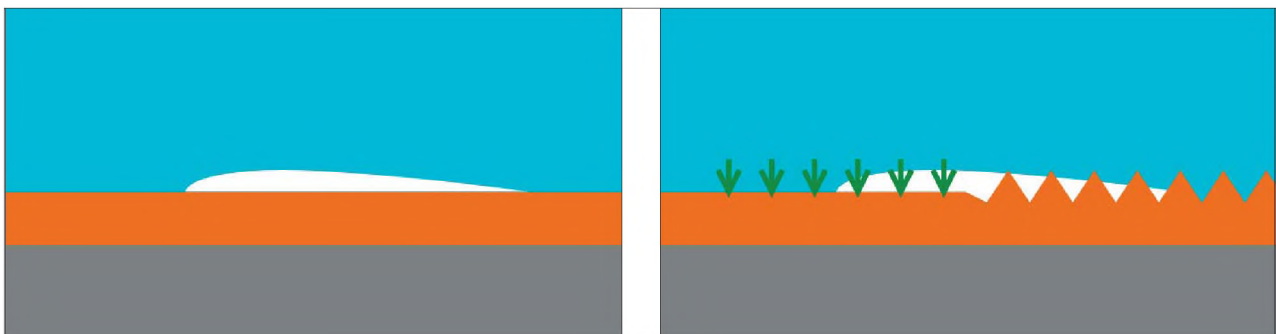
bychom se mohli bez této parametrizace obejít při horizontálních rozlišeních vyšších než přibližně 4 až 3 km. Z tohoto důvodu jsme v novém rozlišení 2,325 km započali testy modelu bez ní. Obdržené výsledky však ukázaly, že efekt parametrizace na bilanci hybnosti nebyl zcela kompenzován explicitní dynamikou modelu. Navíc se zvýšil příspěvek turbulence, který by měl odrážet vliv spíše lokálních překážek a ve srovnání s orografickým příspěvkem by měl být mnohem nižší. Rovněž skóre parametrů v mezní vrstvě a při zemi potvrdila nedostatečnou kompenzaci. Bez parametrizace jsme se tedy nemohli úplně obejít, nicméně dva klíčové parametry schématu musely být přeladěny v závislosti na statistických skóre modelu. Tím je koeficient určující lineární část schématu, který je nově nastaven na $\kappa = 0,005$ místo 0,02 a koeficient navýšení Coriolisova efektu s hodnotou $L_t = 0,5$ místo 1. Nutno poznamenat, že uvedené přeladění vede k nižší aktivitě schématu. Vzhledem k tomu, že pod-měřítkové topografické vstupy byly získány ještě ze starší databáze GTOPO30, je třeba považovat toto nové nastavení za empirický kompromis.

4.2 Nová specifikace drsnosti povrchu

Turbulentní toky v přizemní vrstvě atmosféry jsou parametrizovány pomocí koeficientu odporu C_D a tepelného koeficientu C_H , přičemž tepelný koeficient se používá i pro vlhkost. Koeficienty závisí na stabilitě atmosféry a na drsnosti povrchu. Při neutrálním zvrstvení se jejich výpočet redukuje na tvar:

$$C_D = \frac{k^2}{\ln^2\left(1 + \frac{Z}{z_{0D}}\right)}, C_H = C_3 \frac{k^2}{\ln\left(1 + \frac{Z}{z_{0D}}\right) \ln\left(1 + \frac{Z}{z_{0H}}\right)} \quad (1)$$

kde $k = 0,4$ je von Kármánova konstanta, $C_3 = 1,183$ je inverzní turbulentní Prandtlovo číslo v neutralitě, Z je výška spodní modelové hladiny, z_{0D} je dynamická a z_{0H} je tepelná drsnost povrchu. V modelu s horizontálním krokem 2,325 km musí drsnost povrchu kromě mikrometeorologické složky popisující nerovnosti jako je textura půdy, vegetace nebo městská zástavba, stále obsahovat i příspěvek nerozlišené orografie. *Mikrometeorologická* hodnota z_{0D} je proto v rovnici (1) nahrazena vyšší tak zvanou *efektivní* hodnotou. Původní parametrizace zvyšovala i tepelnou drsnost z_{0H} . To nebylo v souladu s prací Hewer a Wood (1998), podle které nerozlišená orografie s malým sklonem neovlivňuje turbulentní výměnu tepla a vlhkosti. Tepelná drsnost by proto měla být v rovnici (1) snížena tak, aby kompenzovala zvýšenou dynamickou



Obr. 3 Vliv drsnosti povrchu na rozložení sněhu. Při daném množství sněhu ve výpočetní buňce modelu je jeho plošná rozloha nad hladkým povrchem větší (levý panel) než nad drsným povrchem (pravý panel). Efekt je nejvýraznější, když výška sněhové pokrývky je srovnatelná s typickým rozměrem prvků drsnosti, jako jsou půdní nerovnosti a nízká vegetace.

Fig. 3. Effect of surface roughness on snow coverage. For a given amount of snow inside the model grid cell the occupied area is greater over smooth surface (left) than over rough surface (right). The effect is the highest when snow cover depth is close to a typical size of roughness elements, such as soil bumps and low vegetation.

drsnost a koeficient C_H by zůstal stejně velký. Kvůli mírně lepším skóre jsme nakonec použili kompromisní přístup, kdy je koeficient C_H vyčíslený pomocí efektivní hodnoty z_{0D} a mikrometeorologické hodnoty z_{0H} . Nerozlišená orografie tak zesiluje turbulentní výměnu tepla a vlhkosti, ale méně než v původní formulaci.

Druhá změna upravuje průměrování drsnosti mezi částí výpočetní buňky se sněhem a bez něj tak, aby sněhová pokrývka neměla vliv na její orografickou složku. V souvislosti s tím jsme také revidovali parametrizaci efektu nerovnosti na procentuální pokrytí výpočetní buňky sněhem (obr. 3), která nově vychází z mikrometeorologické hodnoty drsnosti. Výsledné procento sněhové pokrývky jsme konzistentně použili při určení středních hodnot albeda a emisivity v buňce pro parametrizaci záření.

4.3 Parametrizace oblačnosti pro schéma záření

Schéma záření vyžaduje určení celkové oblačnosti a oblačné vody jako výsledek všech uvažovaných procesů. Oblačná pokrývka N je počítána v každé vrstvě modelu a vyjadřuje horizontální část buňky, kterou oblačnost zaujímá. Mezi oblačností N a oblačnou vodou q_c je použit zjednodušený vztah podle Xu a Randall (1996). K celkové oblačnosti přispívají obecně procesy kondenzace: i) explicitně řešené na úrovni buňky; ii) parametrizované mělkou konvekcí; iii) parametrizované hlubokou konvekcí. Explicitně popsaná kondenzace, též ze zvyklosti označovaná jako stratiformní $-N_{str}$, vychází ze Xu a Randall (1996) s dalšími úpravami, jako je usnadnění vzniku oblaku při inverzním teplotním profilu, viz Brožková et al. (2006). Oblačnost N_{sc} spojená s tzv. mělkou konvekcí, tj. konvekcí bez vypadávání srážek, je parametrizována velmi jednoduchým algoritmem založeným na posílení oblačnosti pod hranicí teplotní inverze. Počítá se jako vážený integrál možného přebytku vodní páry vůči nasycení z dané hladiny směrem dolů, dokud není dosažen laditelný parametr rozdílu suché statické energie (Gerard 2001). Oblačnost hluboké konvekce N_{cv} je parametrizována ve schématu 3MT (Gerard et al. 2009). Pro získání celkové oblačnosti N je na úrovni buňky aplikován náhodný překryv jednotlivých příspěvků:

$$(1 - N) = (1 - N_{str})(1 - N_{sc})(1 - N_{cv}) \quad (2)$$

Pro výpočet vertikální geometrie oblačné scény ve schématu záření se aplikuje předpoklad tzv. exponenciálně-náhodných překryvů (Hogan, Illingworth 2000). Oblačné vrstvy oddělené jednou nebo více bezoblačnými vrstvami se překrývají náhodně. Na rozdíl od dříve používaného předpokladu tzv. maximálně-náhodných překryvů, kdy se přilehlé oblačné vrstvy překrývaly maximálně, prostorová korelace přilehlých oblačných vrstev teď klesá exponenciálně s vertikální vzdáleností jejich středů. To vede k náhodným překryvům velmi vzdálených oblačných vrstev i v rámci jednoho oblaku, což lépe souhlasí s pozorováními. V nové verzi překryvů jsme navíc zavedli sezónní a zeměpisnou závislost korelační funkce podle Oreopoulos et al. (2012).

Je zřejmé, že výsledná oblačnost závisí na řadě parametrů přispívajících schémat, z toho jsou však klíčové pouze některé. Jedním z nich je tzv. kritická relativní vlhkost, která je menší nebo rovna 100 %. Při jejím dosažení dojde ve výpočetní buňce ke kondenzaci. Kritická relativní vlhkost tak pomáhá simulovat rozložení vlhkosti v buňce. Míra její odchylky od 100 % má výškový profil a je přirozeně závislá na horizontálním rozlišení modelu, kdy s rostoucím rozlišením klesá. Nastavení

kritické relativní vlhkosti částečně vychází z pozorování (Smith 1990), ale dále je dolaďeno empiricky, viz například výraz pro výškový profil v Brožková et al. (2006). Na předchozím rozlišení 4,711 km nebyla uvažována její závislost na velikosti početní buňky, ale při přechodu na vyšší rozlišení 2,325 km se to ukázalo nutným. Profil kritické relativní vlhkosti HU_c nově modulujeme pomocí parametru α následovně:

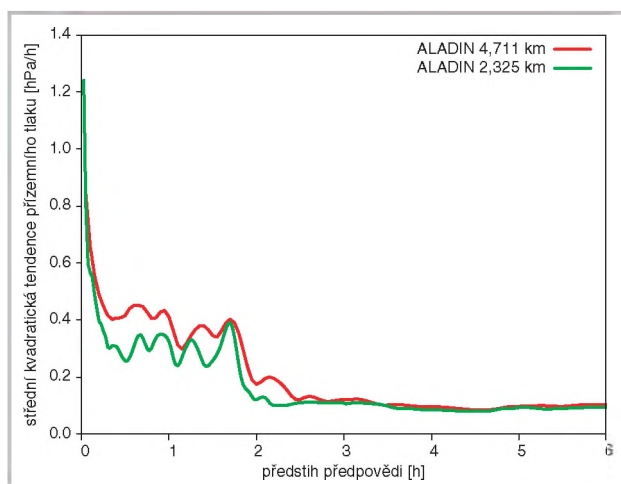
$$HU'_c = \frac{HU_c + \alpha}{1 + \alpha} \quad (3)$$

Při rozlišení 2,325 km je nastavení $\alpha = 0,33$. Výsledkem je úbytek oblačnosti zejména středního patra. Sub-inverzní oblačnost jsme naopak posílili zvýšením parametru rozdílu suché statické energie na dvojnásobek. Dále jsme ustoupili od algoritmu, který výslednou oblačnost vzdaloval od hraničních hodnot 0 % a 100 % použitím tangens-hyperbolicke funkce. Při vyšším rozlišení, kdy se oblačnost přirozeně více přibližuje k hraničním hodnotám (binární chování), již toto není nutné. Výsledkem zmíněných úprav byla podstatná redukce podhodnocování oblačnosti zejména v zimní sezóně.

5. ASIMILAČNÍ CYKLUS

Počáteční podmínky proměnných zemského povrchu a atmosféry jsou i na vyšším horizontálním rozlišení tvořeny 6hodinovým asimilačním cyklem. Analýza parametrů zemského povrchu nevyžadovala speciální ošetření. Nadále je založena na metodě optimální interpolace, která analyzuje pole teploty a relativní vlhkosti ve dvou metrech nad zemí. Inkrementy této analýzy jsou pak promítány lineární funkcí na korekce teplot a vodního obsahu půdních vrstev. Koeficienty této funkce závisí na meteorologických podmínkách a fyziografických parametrech zemského povrchu, více detailů je v Giard a Bazile (2000). K analýze atmosférických polí se od roku 2015 používá metoda BlendVar (Bučánek et al. 2015). Jedná se o rozšíření pseudoasimilační metody Digital Filter (DF) Blending (Brožková et al. 2006) o přímou asimilaci pozorování pomocí třídízenční variační techniky 3D-Var. Hlavní motivací tohoto přístupu je zachování velkoměřítkové informace z analýzy globálního modelu a zároveň využití meteorologických pozorování pro vytvoření počátečních podmínek vhodných pro vysoké horizontální rozlišení modelu ALADIN. Při změně rozlišení jsme upravili nastavení metody DF Blending podle empirické formule, viz Derková a Belluš (2007). Nyní jsou vlny kratší než 25 km odstraněny z analýzy globálního modelu ARPEGE a z předběžného odhadu modelu ALADIN před aplikací vysokofrekvenčních digitálních filtrů, které dále redukují krátkovlnný šum. Rozdíl těchto filtrovaných komponent je poté přidán k původnímu předběžnému odhadu modelu ALADIN. Výsledek DF Blendingu vstupuje do metody 3D-Var, která asimiluje následující meteorologická pozorování: aerologické sondáže, přízemní pozorování, letecká měření AMDAR a Mode-S, pozorování větru a jasových teplot z geostacionární družice Meteosat 11.

Pro metodu 3D-Var jsme potřebovali připravit novou kovarianční matici chyb předběžného odhadu v novém rozlišení modelu. Ta je velmi důležitá, protože filtruje a propaguje pozorovanou informaci z místa pozorování do jeho okolí (Berre, Desroziers 2010). Přispívá k určení váhy, s jakou bude předběžný odhad opraven vstupujícími pozorováními. Čím větší jsou elementy kovarianční matice chyb, tím větší korekce jsou provedeny v předběžném odhadu. Kovariance určují, jak moc a do jaké horizontální a vertikální vzdálenosti se korekce šíří, včetně dopadu na jiné analyzované prvky, neboť



Obr. 4 Střední kvadratická tendence přízemního tlaku vzduchu (hPa/h) při výpočtu 6hodinového prvního odhadu analýzy v asimilačním cyklu; příklad z 1. 3. 2019 ve 12:00 UTC. Červená a zelená křivka zobrazují vývoj během předpovědi v modelu s rozlišením 4,711 km, respektive 2,325 km.

Fig. 4. Root mean square of surface air pressure tendency (hPa/h) in computing the 6-hour initial estimate in the assimilation cycle, example for 1 March 2019 at 12:00 UTC. Red and green lines show the evolution during the forecast in the model with the resolution of 4.711 km and 2.325 km respectively.

kovariance též podchycují rovnováhy v atmosféře, jako geostrofickou mezi poli hmoty a větru, atd. Kovarianční matici jsme vytvořili dynamickou adaptací asimilačního ansámblu řídicího modelu ARPEGE podle metody popsané v práci Bučánek (2018, s.25), kde čtenář najde další detaily k dané problematice. Na základě série experimentů byl asimilační systém přeladěn, tj. chyba pozorování jasových teplot byla zvýšena faktorem 1,15 a kovarianční matice byla přeškálována koeficientem 0,25. Dvě nové prognostické proměnné nehydrostatického dynamického jádra (vertikální složka rychlosti a odchylka tlaku od hydrostaticky rovnovážného stavu) nejsou součástí tzv. kontrolního vektoru 3D-Var. Stav těchto proměnných je v analýze převzat z předběžného odhadu, což je optimální způsob jak předejít větším nerovnováhám v počátečních podmínkách a tzv. spin-up efektu při následné integraci. Spin-up efekt jsme v asimilačním cyklu vyhodnotili pomocí tendencí přízemního tlaku a ověřili jsme, že je v nové nehydrostatické verzi modelu nižší, viz obr. 4.

6. TESTY A VÝSLEDKY

Jak vyplývá z předchozího, jednotlivé komponenty modelu ve vysokém rozlišení jsme postupně testovali a validovali vzhledem k původnímu rozlišení 4,711 km. Jako validační období jsme vybrali pro zimní sezónu leden až začátek února 2017, a dále leden až únor 2019, kdy v tomto druhém zimním období byl již spuštěn paralelní test. Pro letní sezónu jsme vybrali květen až začátek června 2018 a také konec června až začátek července 2009 vzhledem k výjimečné aktivitě hluboké konvekce. Model jsme testovali nejdříve v tzv. dynamické adaptaci, tj. počáteční podmínka byla interpolována z analýz globálního modelu ARPEGE. Dále jsme přešli na experimenty s asimilačním cyklem zahrnujícím analýzu zemského povrchu a DF Blending atmosférických proměnných. Konečně poslední přípravnou etapou byly testy úplné konfigurace modelu včetně asimilačního cyklu BlendVar. Před zavedením každé nové verze modelu do provozu se provádí výše zmíněný paralelní test. Při něm se úlohy spouštějí

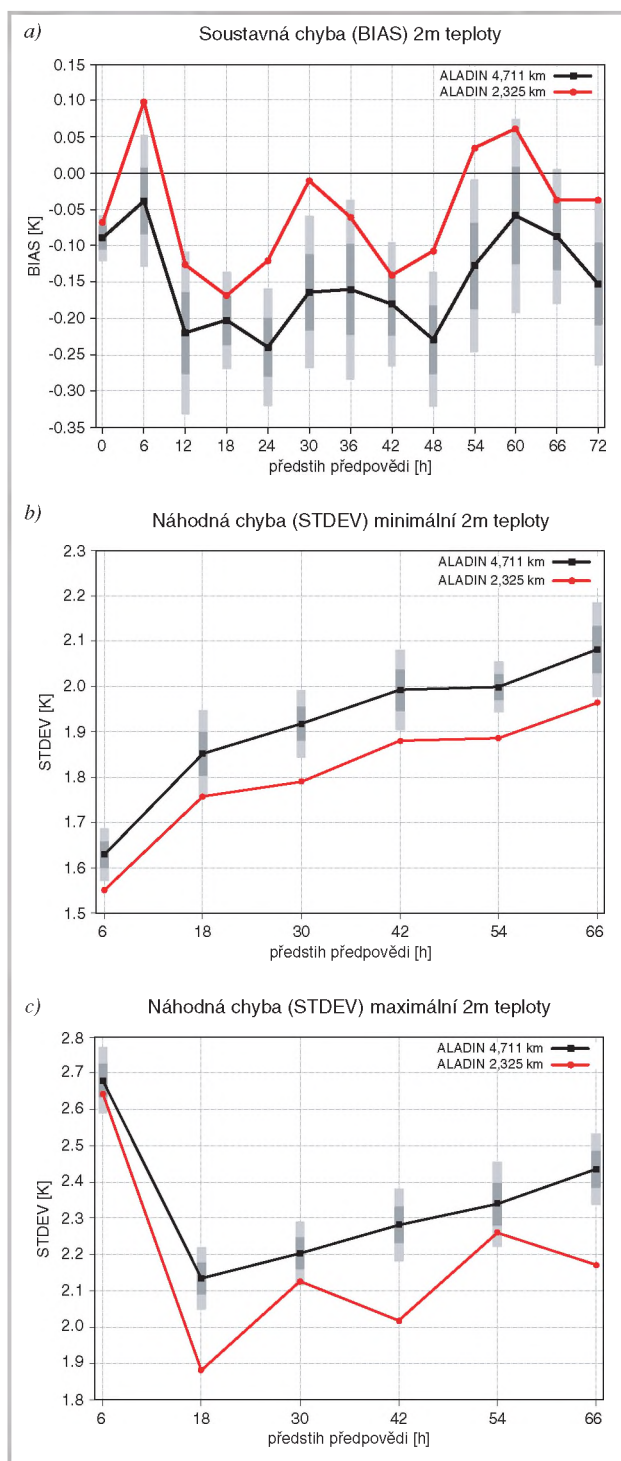
po ukončení výpočtu provozní verze a testují se i hlavní části následného zpracování. Výstupy z paralelního testu je tak možné porovnávat s provozní verzí například v podobě map. Velmi důležitá jsou statistická skóre počítaná proti pozorováním, která musí potvrdit kvalitu nové verze před jejím zařazením do provozu. Paralelní test nové verze modelu s vysokým rozlišením byl spuštěn 10. 1. 2019. V průběhu testu došlo ještě k výše popsané úpravě nastavení schématu oblačnosti, kdy finální konfigurace běžela paralelně od 8. 2. 2019 a do provozu byla uvedena 5. 3. 2019.

Při zvýšení horizontálního rozlišení se obecně očekává zlepšení skóre modelu pro přízemní parametry, jako je teplota a vlhkost ve 2 m, a vítr v 10 m, zejména díky detailnějšímu popisu topografie a dalších parametrů zemského povrchu. Výsledky testů tato očekávání potvrdily, a to jak v případě soustavných chyb, tak náhodných chyb, viz příklady znázorněné na obr. 5 a obr. 6. Samozřejmě, že míra zlepšení skóre je závislá na sezóně, a že má i denní chod. Ze získaných výsledků je patrné, že ve skóre teploty ve 2 m snižujeme chybu až o 0,1 °C, u maximálních teplot až o 0,4 °C, u minimálních teplot až o 0,3 °C. Chyba rychlosti větru je snížena typicky o 0,1 m.s⁻¹. S ohledem na typické velikosti chyb tyto statistické údaje dokládají výrazné zlepšení výsledků modelu. Jiná ukázka zpřesnění předpovědi teploty ve 2 m je na obr. 7, kde čtenář může vizuálně porovnat toto pole pro realizace modelu v původním a nynějším rozlišení. Pro ilustraci byla vybrána situace s přechodem studené fronty.

Co se týče dalších parametrů, jako jsou oblačnost a srážky, tak bodové určené skóre zahrnující náhodnou chybu nemají dobrou vypovídací hodnotu vzhledem k problému dvojího testu. Dvojitý test se totiž projevuje silněji s rostoucím rozlišením modelů pro parametry, kde se blízko sebe mohou nacházet výrazně odlišné hodnoty. Pokud model předpoví strukturu pole například srážek, která bude tvarem a intenzitou dobře souhlasit s měřením, ale bude špatně prostorově lokalizována, tak bodové skóre tuto předpověď ohodnotí hůře než absenci jakékoliv struktury. Taková předpověď bude totiž penalizována dvakrát, jednou v místě, kde struktura dle měření chybí a podruhé tam, kde je předpovězena, ale není pozorována. Více k této problematice čtenář najde například v práci Zacharov a Řezáčová (2010). Přesto tradiční bodová verifikace 6hodinových úhrnů srážek v zimním období ukázala v porovnání s referencí na 4,711 km téměř neutralitu. V letním období jsou srážky v nové verzi modelu slabě nadhodnoceny pro úhrny v odpoledních hodinách, tj. od 12:00 UTC do 18:00 UTC, a to do 0,1 mm. U oblačnosti se v zimním období projevila korekce záporné soustavné chyby, a to až o 0,4 oktetu pokrytí.

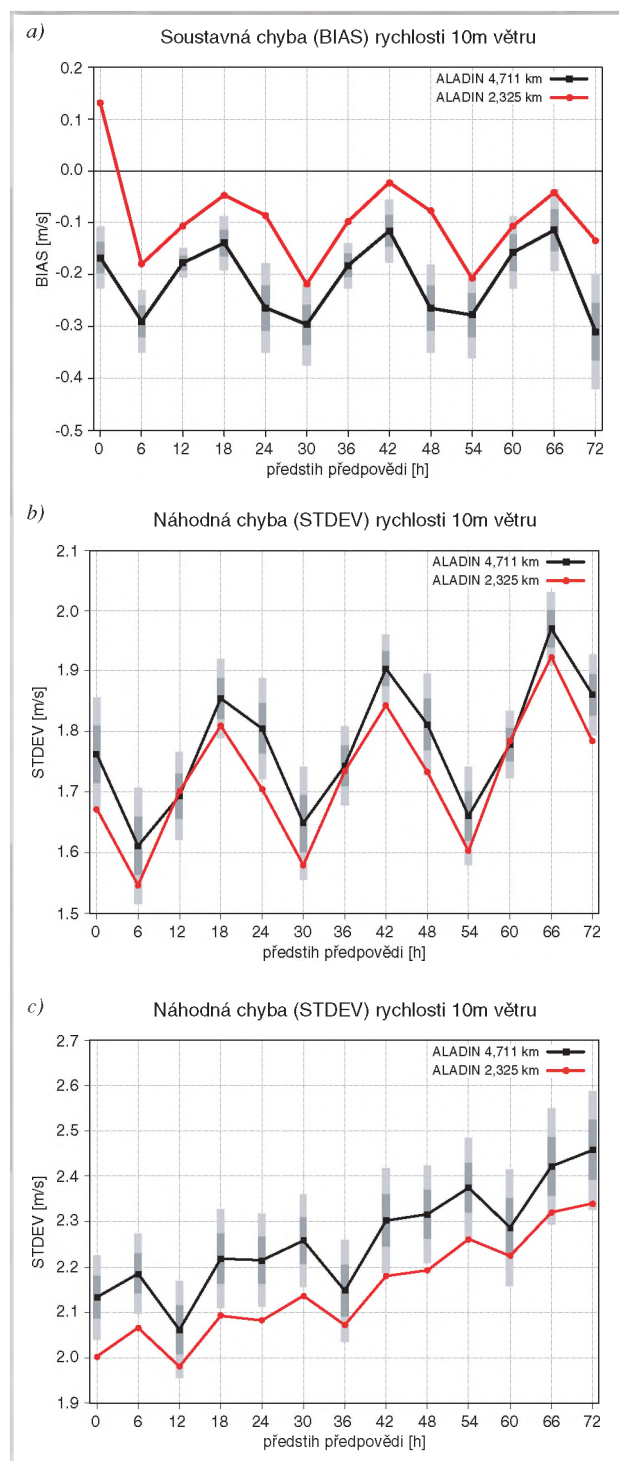
Pro zimní i letní testované sezóny jsou v nové verzi modelu ALADIN zlepšena skóre výškových parametrů v porovnání s radio-sondážními měřeními. V létě je zlepšení patrné zejména pro teplotu a vlhkost, zatímco v zimě, kdy je výraznější baroklinita atmosféry, jsou lepší skóre zaznamenána hlavně v poli geopotenciálu a větru (obr. 8).

Kvalitativní změnou v nové verzi byl přechod na nehydrostatické dynamické jádro. To spolu s vysokým rozlišením umožňuje simulovat vlny vznikající vzlakem při stabilním zvrstvení. Vzlakové vlny bývají vidět díky oblačnosti vznikající ve výstupném proudu, zatímco v sestupném proudu je jasná obloha. Příklad této vlnové oblačnosti předpovězené modelem ve srovnání se satelitním pozorováním je uveden v technickém dokumentu ČHMÚ (Smolíková 2019). Spolu s tím se přirozeně zlepšuje schopnost modelu podchytit konvektivní jevy, jež jsou svou podstatou nehydrostatické. Proto jsme



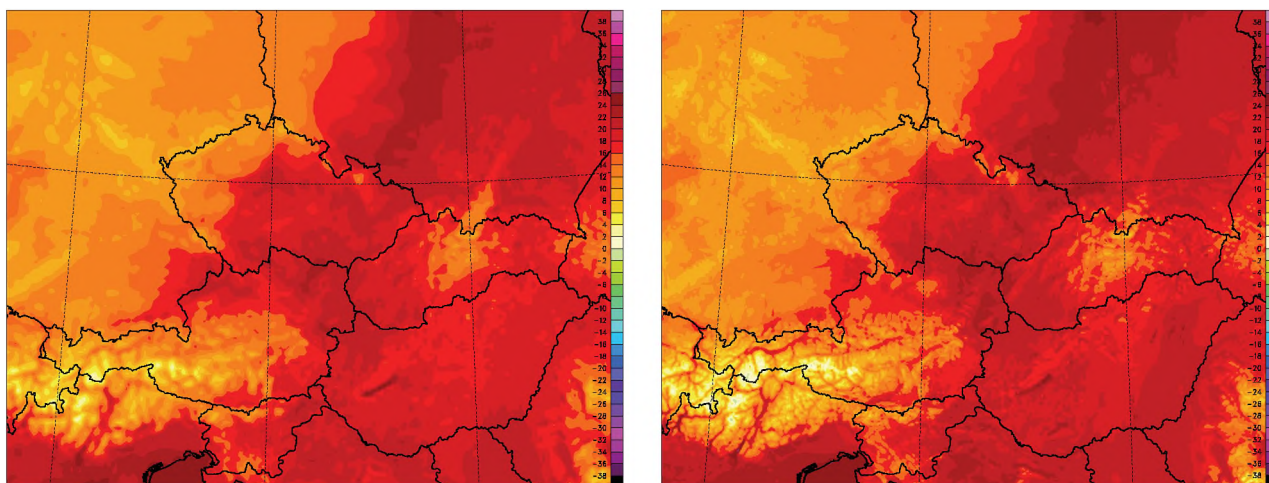
Obr. 5 (a) soustavná chyba teploty ve 2 m [°C] v zimním verifikačním období od 10/01/2019 do 21/02/2019; (b) a (c) náhodná chyba minimální, respektive maximální teploty ve 2 m [°C] v letním verifikačním období od 14/05/2018 do 31/05/2018. Černou křivkou je znázorněno skóre reference v rozlišení 4,711 km a červenou křivkou skóre nové verze v rozlišení 2,325 km. U reference jsou zobrazeny intervaly spolehlivosti $\pm \sigma$ (cca 68 %) tmavými obdélníky a $\pm 2 \sigma$ (cca 95 %) světle šedými obdélníky.

Fig. 5. (a) 2 m temperature bias [°C] for the winter verification period from 10 January 2019 to 21 February 2019; (b) and (c) standard deviation error of minimum and maximum 2 m temperature [°C] respectively for the summer verification period from 14 May 2018 to 31 May 2018. Black line shows the score of the 4.711 km resolution reference and red line shows the score of the new 2.325 km resolution version. The dark bars at the reference resolutions show the intervals of $\pm \sigma$ (approx. 68%) confidence and light grey bars of $\pm 2 \sigma$ (approx. 95%) confidence intervals.



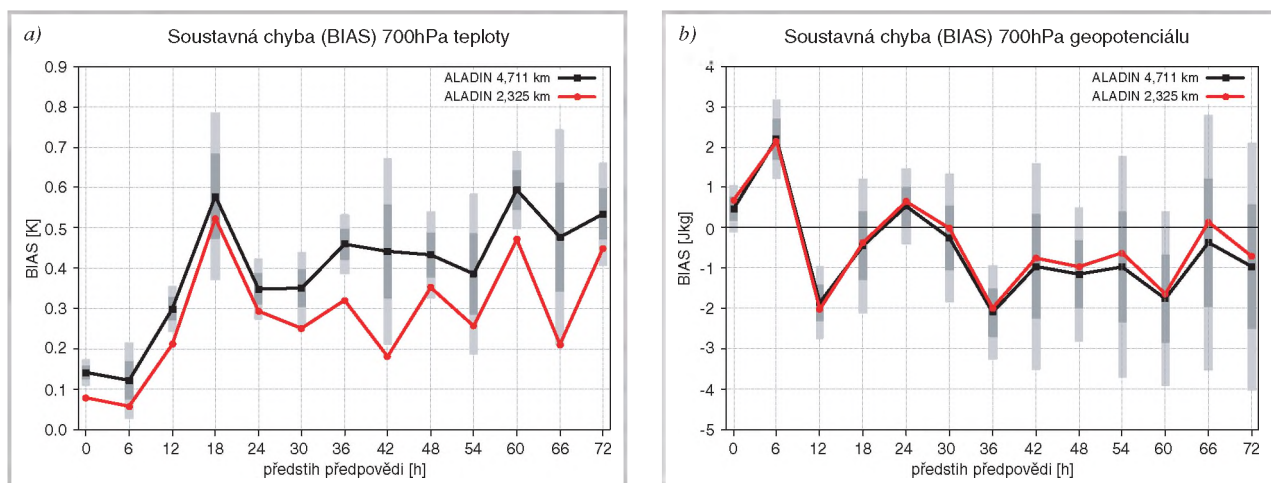
Obr. 6 (a) soustavná chyba rychlosti větru v 10 m [$m \cdot s^{-1}$] v letním verifikačním období od 14/05/2018 do 31/05/2018; (b) a (c) náhodná chyba rychlosti větru v 10 m [$m \cdot s^{-1}$] v letním, respektive zimním (10/01/2019–21/02/2019) verifikačním období. Černou křivkou je znázorněno skóre reference v rozlišení 4,711 km a červená křivka je skóre nové verze v rozlišení 2,325 km. Intervaly spolehlivosti jsou stejné jako na obr. 5.

Fig. 6. (a) 10 m wind speed bias [$m \cdot s^{-1}$] for the summer verification period from 14 May 2018 to 31 May 2018; (b) and (c) 10 m wind speed standard deviation error [$m \cdot s^{-1}$] for the summer and for the winter (10 January 2019–21 February 2019) verification period respectively. Black line shows the score of the 4.711 km resolution reference and red line shows the score of the new 2.325 km resolution version. The confidence intervals are the same as in Fig. 5.



Obr. 7 Předpověď pole teploty ve 2 m [°C] na + 9 h pro běh modelu ze 21/09/2018 ve 12:00 UTC v rozlišení 4,711 km (vlevo) a 2,325 km (vpravo). Pro lepší čitelnost map je zobrazen výřez bližšího okolí České republiky.

Fig. 7. Forecast of 2 m temperature [°C] at + 9 h for the model run from 21 September 2018 at 12:00 UTC in the resolution 4.711 km (left) and 2.325 km (right). For better legibility of the maps, a zoom of the Czech Republic surroundings is shown.



Obr. 8 (a) soustavná chyba teploty [°C] v hladině 700 hPa v letním verifikačním období od 14/05/2018 do 31/05/2018; (b) soustavná chyba absolutní topografie (m) hladiny 700 hPa v zimním verifikačním období od 10/01/2019 do 21/02/2019. Černou křivkou je znázorněno skóre reference v rozlišení 4,711 km a červenou křivkou skóre nové verze v rozlišení 2,325 km. Intervaly spolehlivosti jsou stejné jako na obr. 5.

Fig. 8. (a) temperature bias [°C] at 700 hPa for the summer verification period from 14 May 2018 to 31 May 2018; (b) geopotential bias (m) at 700 hPa for the winter verification period from 10 January 2019 to 21 February 2019. Black line shows the score of the 4.711 km resolution reference and red line shows the score of the new 2.325 km resolution version. The confidence intervals are the same as in Fig. 5.

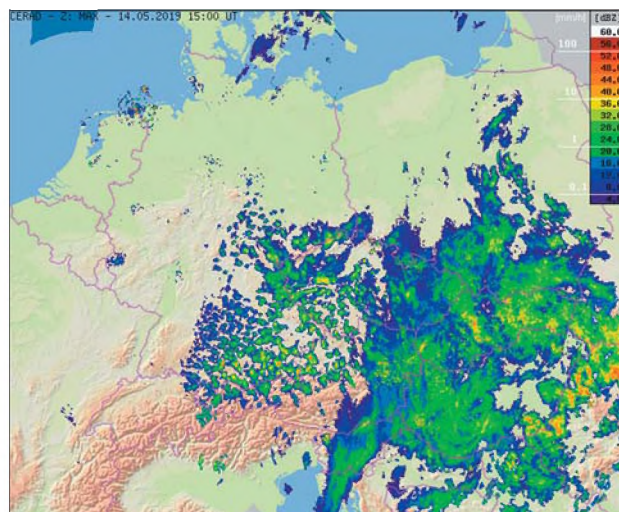
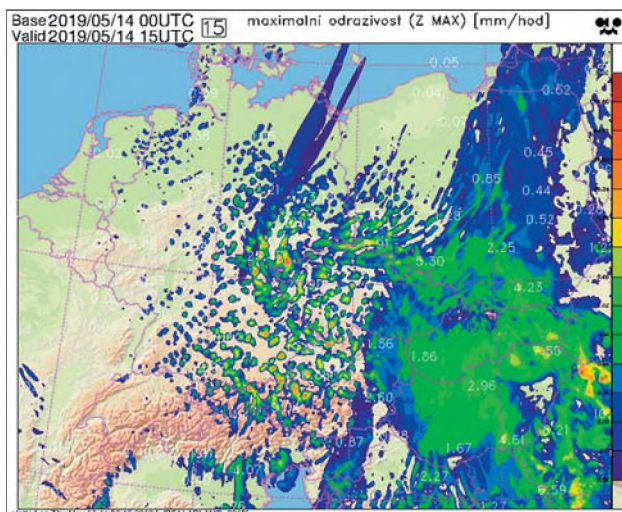
v nové verzi modelu přistoupili k doplnění výstupů o předpovídané simulace okamžitých maximálních radarových odrazivosti (obr. 9). Při té příležitosti jsme výstupy rozšířili i o předpovídané simulace jasových teplot z přístroje SEVIRI družice Meteosat 11, a to pro infračervený kanál s vlnovou délkou 10,8 μm (obr. 10) a kanál vodní páry s vlnovou délkou 6,2 μm .

7. SHRNUTÍ A PERSPEKTIVY

Přechod modelu ALADIN na vyšší horizontální rozlišení 2,325 km představoval poměrně zásadní změnu, jak technickou, tak kvalitativní z pohledu výsledků. V našem příspěvku jsme stručně představili jednotlivé etapy přípravy nové výpočetní oblasti, dále práci na hlavních konfiguracích numerického předpovědního systému ALADIN, kam patří nejenom předpovědní model, ale také algoritmy asimilace pozorování. Zdůraznili jsme to podstatné, čemu je potřeba při přechodu na vyšší rozlišení věnovat pozornost, jako je posun ve spektru nově rozlišených měřitek atmosférické cirkulace a s tím spo-

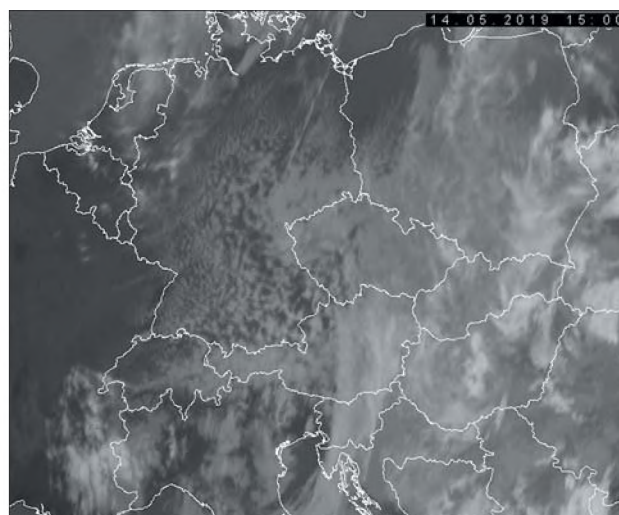
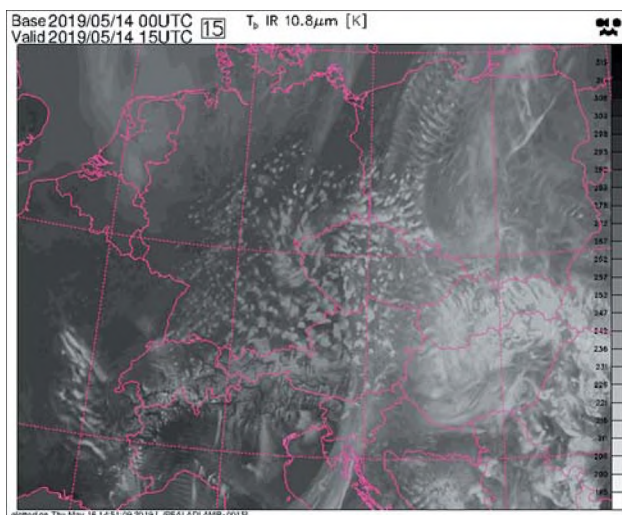
jený dopad na řídicí rovnice modelu zahrnující nehydrostatické jevy a na některé parametrizace, zejména na schémata horizontální difuze a účinků ještě nerozlišené orografie. Dále jsme museli přenastavit schéma oblačnosti vstupující do parametrizace záření, protože dosud nebylo adekvátně revidováno a neobsahovalo přizpůsobení na změnu rozlišení při výpočtu kondenzace na úrovni buňky. Při validaci modelu jsme naopak potvrdili, že přechod na vyšší rozlišení neznamenal žádné významné přeladění parametrizací srážkových procesů včetně hluboké konvekce. To se dalo očekávat i podle výsledků našeho modelu při srovnání v mezinárodním experimentu (Field et al. 2017). Parametrizace těchto procesů jsou v modelu vyvíjeny podle tzv. multi-měřítkového konceptu, kdy je snahou uchopit problém nikoliv v závislosti na velkoprostorovém nebo lokálním měřítku, ale podle typu procesu, jako je mikrofyzika a transport.

Podle očekávání jsme zlepšili statistická skóre modelu zejména pro přízemní parametry teploty a větru, a to nejen



Obr. 9 Předpověď radarových odrazivostí na +15 h pro běh modelu ze 14/05/2019 v 00:00 UTC (levý panel); pozorované odrazivosti pro ten samý termín získané z produktu OPERA doplněného o radary v Salcburku a ve Vídni (pravý panel).

Fig. 9. Radar reflectivity forecast at +15 h for the model run from 14 May 2019 at 00:00 UTC (left); observed reflectivity for the same validation time obtained from the OPERA product completed by radars at Salzburg and Vienna (right).



Obr. 10 Předpověď jasové teploty přístroje SEVIRI/MSG pro kanál 10,8 μm na +15 h pro běh modelu ze 14/05/2019 v 00:00 UTC (levý panel); pozorovaná jasová teplota pro ten samý termín (pravý panel).

Fig. 10. Forecast of the SEVIRI/MSG instrument brightness temperature for 10.8 μm channel at +15 h for the model run from 14 May 2019 at 0:00 UTC (left); observed brightness temperature for the same validation time (right).

díky vyššímu rozlišení, ale i s ohledem na kvalitnější topografickou databázi a další úpravy, zatímco tradiční bodová skóre 6hodinových srážkových úhrnů byla pro vybraná verifikační období neutrální. Pro lepší posouzení kvality modelu s ohledem na predikci srážek ve vysokém rozlišení plánujeme využít vhodnější prostorové metody verifikace. Na nové verzi modelu ALADIN budeme stavět při dalším vývoji. Ukázali jsme, jak důležité je nastavení dynamického jádra modelu z hlediska stability, přesnosti a efektivitu výpočtu. Patří sem i účinná kontrola akumulace šumu v krátkých vlnách horizontální difúzi nebo zvýšení přesnosti výpočtu advekce ve strmém horském terénu. Stabilita, přesnost a efektivita dynamiky modelu bude i nadále patřit k našim výzkumným prioritám, abychom zvládli přípravu na další zvyšování rozlišení. Již jsme zmínili důležitý přínos nových topografických dat, jejichž využití chceme rozšířit na určení tzv. orografické drsnosti povrchu, která interaguje s turbulencí. S tím souvisí práce na novém výpočtu směšovací délky,

kteřá je uzávěrem schématu. Dalším výstupem schématu turbulence by měla být oblačnost mělké konvekce, která by nahradila dosavadní jednoduchý přístup v oblačném schématu pro záření. Na straně srážkových procesů plánujeme v mikrofyzičce přechod od pseudo-prognostického ošetření krupek na plně prognostickou verzi a zařazení fyzikálně realističtější parametrizace nerozlišených sestupných konvekčních proudů. Co se týče dalších parametrizací, tak spíše ve střednědobém horizontu plánujeme zavedení nového schématu povrchu SURFEX (Masson et al. 2013), které využije kvalitnějších databází půdních a vegetačních charakteristik, poskytne komplexnější model zemského povrchu včetně možnosti využití parametrizace energetické bilance městské zástavby. V oblasti asimilace dat plánujeme zkrátit dosavadní krok asimilačního cyklu ze šesti hodin na tři. To umožní prakticky zdvojnásobit počet asimilovaných pozorování, a navíc nově využít jasové teploty z polárních družic vzhledem k typickým časům jejich přeletů nad střední Evropou.

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. *Journal of the Atmospheric Sciences*, roč. **71**, č. 8, s. 3004–3026. ISSN 0022-4928. Dostupné z: doi:10.1175/JAS-D-13-0203.1.
- BAŠTÁK ĎURÁN, I., GELEYN, J.-F., VÁŇA, F., SCHMIDLI, J., BROŽKOVÁ, R., 2018. A Turbulence Scheme with Two Prognostic Turbulence Energies. *Journal of the Atmospheric Sciences*, roč. **75**, č. 10, s. 3381–3402. ISSN 0022-4928. Dostupné z: doi:10.1175/JAS-D-18-0026.1.
- BAŤKA, M., 2004. Algoritmus pro nalezení optimální Lambertovy mapy pro předpovědní model na omezené oblasti. *Meteorologické zprávy*, roč. **57**, č. 6, s. 179–183. Dostupné z WWW: <http://casmz.chmi.cz/assets/2004/Meteo-2004-06.pdf>.
- BÉNARD, P., 2003. Stability of Semi-Implicit and Iterative Centered-Implicit Time Discretizations for Various Equation Systems Used in NWP. *Monthly Weather Review*, roč. **131**, č. 10, s. 2479–2491. ISSN 0027-0644. Dostupné z: doi:10.1175/1520-0493(2003)131<2479:sosaic>2.0.co;2.
- BÉNARD, P., VIVODA, J., MAŠEK, J., SMOLÍKOVÁ, P., YESSAD, K. et al., 2010. Dynamical kernel of the Aladin-NH spectral limited-area model: Revised formulation and sensitivity experiments. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, roč. **136**, č. 646, s. 155–169. ISSN 00359009. Dostupné z: doi:10.1002/qj.522.
- BERRE, L., DESROZIERS, G., 2010. Filtering of Background Error Variances and Correlations by Local Spatial Averaging: A Review. *Monthly Weather Review*, roč. **138**, č. 10, s. 3693–3720. ISSN 0027-0644. Dostupné z: doi:10.1175/2010MWR3111.1.
- BROŽKOVÁ, R., DERKOVÁ, M., BELLUŠ, M., FARDA, F., 2006. Atmospheric forcing by ALADIN/MFSTEP and MFSTEP oriented tunings. *Ocean Science Discussions*, roč. **3**, č. 3, s. 319–342. ISSN 1812-0822. Dostupné z: doi:10.5194/osd-3-319-2006.
- BUBNOVÁ, R., HELLO, G., BÉNARD, P., GELEYN, J.-F., 1995. Integration of the Fully Elastic Equations Cast in the Hydrostatic Pressure Terrain-Following Coordinate in the Framework of the ARPEGE/Aladin NWP System. *Monthly Weather Review*, roč. **123**, č. 2, s. 515–535. ISSN 0027-0644. Dostupné z: doi:10.1175/1520-0493(1995)123<0515:IOT-FEE>2.0.CO;2.
- BUČÁNEK, A., 2018. Diagnostika kovariancí chyb předběžného pole ve spojeném systému globální a regionální asimilace dat. Doctoral thesis. Univerzita Karlova. Dostupné z WWW: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/71369/>.
- BUČÁNEK, A., BROŽKOVÁ, R., TROJÁKOVÁ, A., 2015. Asimilační schéma BlendVar v ČHMÚ. *Meteorologické zprávy*, roč. **68**, č. 6, s. 180–185. ISSN 0026-1173.
- CATRY, B., GELEYN, J.-F., BOUYSSSEL, F., CEDILNIK, J., BROŽKOVÁ, R. et al., 2008. A new sub-grid scale lift formulation in a mountain drag parameterisation scheme. *Meteorologische Zeitschrift, Schweizerbart Science Publishers*, roč. **17**, č. 2, s. 193–208. ISSN 0941-2948. Dostupné z: doi:10.1127/0941-2948/2008/0272.
- CATRY, B., GELEYN, J.-F., TUDOR, M., BÉNARD, P., TROJÁKOVÁ, A., 2007. Flux-conservative thermodynamic equations in a mass-weighted framework. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, roč. **59**, č. 1, s. 71–79. ISSN 1600-0870. Dostupné z: doi:10.1111/j.1600-0870.2006.00212.x.
- DERKOVÁ, M., BELLUŠ, M., 2007. Various applications of the blending by digital filter technique in the ALADIN numerical weather prediction system. *Meteorologický časopis*, roč. **10**, č. 1, s. 27–36. Dostupné z WWW: http://www.rclace.eu/File/Predictability/2007/2007-01_MC_Bellus-Derkova.pdf.
- FIELD, P. R., BROŽKOVÁ, R., CHEN, M., DUDHIA, J., LAC, C. et al., 2017. Exploring the convective grey zone with regional simulations of a cold air outbreak. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, roč. **143**, č. 707, s. 2537–2555. ISSN 00359009. Dostupné z: doi:10.1002/qj.3105.
- GELEYN, J. F., MAŠEK, J., BROŽKOVÁ, R., KUMA, P., DEGRAUWE, D. et al., 2017. Single interval longwave radiation scheme based on the net exchanged rate decomposition with bracketing. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, roč. **143**, č. 704, s. 1313–1335. ISSN 1477870X. Dostupné z: doi:10.1002/qj.3006.
- GERARD, L., 2001. Physical parameterisations for a high resolution operational numerical weather prediction model. Doctoral thesis. Université Libre de Bruxelles, Faculté des Sciences Appliquées.
- 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. *Monthly Weather Review*, roč. **137**, č. 11, s. 3960–3977. ISSN 0027-0644. Dostupné z: doi:10.1175/2009MWR2750.1.
- GIARD, D., BAZILE, E., 2000. Implementation of a New Assimilation Scheme for Soil and Surface Variables in a Global NWP Model. *Monthly Weather Review*, roč. **128**, č. 4, s. 997–1015. ISSN 0027-0644. Dostupné z: doi:10.1175/1520-0493(2000)128<0997:IOANAS>2.0.CO;2.
- HEWER, F. E., WOOD, N., 1998. The effective roughness length for scalar transfer in neutral conditions over hilly terrain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, roč. **124**, č. 547, s. 659–685. ISSN 00359009. Dostupné z: doi:10.1256/smsqj.54701.
- HOGAN, R. J., ILLINGWORTH, A. J., 2000. Deriving cloud overlap statistics from radar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, roč. **126**, č. 569, s. 2903–2909. ISSN 00359009. Dostupné z: doi:10.1002/qj.49712656914.
- MAŠEK, J., GELEYN, J. F., BROŽKOVÁ, R., GIOT, O., ACHOM, H. O. et al., 2016. Single interval shortwave radiation scheme with parameterized optical saturation and spectral overlaps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, roč. **142**, č. 694, s. 304–326. ISSN 1477870X. Dostupné z: doi:10.1002/qj.2653.
- MASSON, V., LE MOIGNE, P., MARTIN, E., FAROUX, S., ALIAS, A. et al., 2013. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, roč. **6**, č. 4, s. 929–960. ISSN 1991959X. Dostupné z: doi:10.5194/gmd-6-929-2013.
- NASTROM, G. D., GAGE, K. S., 1985. A Climatology of Atmospheric Wavenumber Spectra of Wind and Temperature Observed by Commercial Aircraft. *Journal of the Atmospheric Sciences*, roč. **42**, č. 9, s. 950–960. ISSN 0022-4928. Dostupné z: doi:10.1175/1520-0469(1985)042<0950:ACOAWS>2.0.CO;2.
- NOILHAN, J., MAHFOUF, J. F., 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change*, roč. **13**, č. 1–4, s. 145–159. ISSN 09218181. Dostupné z: doi:10.1016/0921-8181(95)00043-7.
- NOILHAN, J., PLANTON, S., 1989. A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Monthly Weather Review*, roč. **117**, č. 3, s. 536–549. ISSN 0027-0644. Dostupné z: doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOL>2.0.CO;2.

- OREOPOULOS, L., LEE, D., SUD, Y. C., SUAREZ, M. J., 2012. Radiative impacts of cloud heterogeneity and overlap in an atmospheric General Circulation Model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, roč. **12**, č. 19, s. 9097–9111. ISSN 1680-7316. Dostupné z: doi:10.5194/acp-12-9097-2012.
- SMITH, R. N. B., 1990. A scheme for predicting layer clouds and their water content in a general circulation model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, roč. **116**, č. 492, s. 435–460. ISSN 00359009. Dostupné z: doi:10.1002/qj.49711649210.
- SMOLÍKOVÁ, P., 2019. Dynamical parameters for the new operational application of the ALADIN system at CHMI aiming to use nonhydrostatic equations at a 2.325 km horizontal resolution. *CHMI technical document*. č. TD000102, s. 1–20.
- TEMPERTON, C., 1992. A Generalized Prime Factor FFT Algorithm for any $N = 2^p 3^q 5^r$. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*. Society for Industrial and Applied Mathematics, roč. **13**, č. 3, s. 676–686. ISSN 0196-5204. Dostupné z: doi:10.1137/0913039.
- TERMONIA, P., FISCHER, C., BAZILE, E., BOUYSSSEL, F., BROŽKOVÁ, R. et al., 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geoscientific Model Development*, roč. **11**, č. 1, s. 257–281. ISSN 1991-9603. Dostupné z: doi:10.5194/gmd-11-257-2018.
- UNTCH, A., HORTAL, M., 2004. A finite-element scheme for the vertical discretization of the semi-Lagrangian version of the ECMWF forecast model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, roč. **130**, č. 599 PART B, s. 1505–1530. ISSN 0035-9009. Dostupné z: doi:10.1256/qj.03.173.
- VIVODA, J., SMOLÍKOVÁ, P., SIMARRO, J., 2018. Finite Elements Used in the Vertical Discretization of the Fully Compressible Core of the ALADIN System. *Monthly Weather Review*, ISSN 0027-0644. Dostupné z: doi:10.1175/mwr-d-18-0043.1.
- WANG, Y., BELLUŠ, M., EHRLICH, A., MILE, M., PRISTOV, N. et al., 2018. 27 Years of Regional Cooperation for Limited Area Modelling in Central Europe. *Bulletin of the American Meteorological Society*. ISSN 0003-0007. Dostupné z: doi:10.1175/bams-d-16-0321.1.
- XU, K.-M., RANDALL, D. A., 1996. A Semiempirical Cloudiness Parameterization for Use in Climate Models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, roč. **53**, č. 21, s. 3084–3102. ISSN 0022-4928. Dostupné z: doi:10.1175/1520-0469(1996)053<3084:ASCPFU>2.0.CO;2.
- ZACHAROV, P., ŘEZÁČOVÁ, D., 2010. Verifikace kvantitativní předpovědi srážek. *Meteorologické zprávy*, roč. **63**, č. 5, s. 133–146. Dostupné z WWW: <http://casnz.chmi.cz/assets/2010/Meteo-2010-05.pdf>.

Lektoři (Reviewers): Mgr. Martin Belluš, Mgr. Peter Huszár, Ph.D.

INFORMACE – RECENZE

MEZINÁRODNÍ WORKSHOP V ČHMÚ NA TÉMA ASIMILACE METEOROLOGICKÝCH POZOROVÁNÍ DO PŘEDPOVĚDNÍHO SYSTÉMU ALADIN

Ve dnech 18. až 20. září 2019 byl uspořádán v Českém hydrometeorologickém ústavu v Praze workshop s mezinárodní účastí s názvem „Joint LACE Data Assimilation Working Days and ALADIN Data Assimilation basic kit Working Days“.

Cílem tohoto workshopu bylo prezentování nejnovějších dosažených výsledků, výměna poznatků a školení v oblasti asimilace dat do numerického předpovědního modelu ALADIN. Z názvu vyplývá, že se jednalo o společnou akci středoevropského konsorcia RC LACE a konsorcia ALADIN. Cílem Data Assimilation basic kit (DAsKIT) ve všech zemích konsorcia ALADIN je fungující systém asimilace dat. Program byl zahájen společnou sekcí, kdy účastníci prezentovali pokrok a stav operativních systémů asimilace dat ve svých zemích, poté následovaly oddělené tematické sekce obou skupin.

Pozornost byla věnována asimilaci různých typů pozorování, jako jsou letecká pozorování MODE-S, AMDAR, geodetická pozorování E-GVAP, pozorování z přístrojů windprofiler. Samostatná sekce byla věnována asimilaci radarových odrazi-

vostí poskytovaných programem OPERA. V rámci konsorcia LACE probíhá výměna národních přízemních pozorování, a tak byly představeny první výsledky kontroly kvality těchto dat. Kromě práce s pozorováními se prezentace věnovaly také algoritmické části asimilace dat, zejména cyklení analýz s kratším intervalem než obvyklých šest hodin.

Workshopu se zúčastnili odborníci z celkem 14 zemí: Alžírsko, Belgie, Bulharsko, Česká republika, Chorvatsko, Irsko, Maroko, Norsko, Polsko, Portugalsko, Rakousko, Slovensko, Slovinsko, Tunisko.

Antonín Bučánek, Radmila Brožková



Účastníci workshopu „Joint LACE Data Assimilation Working Days and ALADIN Data Assimilation basic kit Working Days“ se sešli v ČHMÚ, Praze-Komořanech ve dnech 18. až 20. září 2019. Foto: J. Doležal.