Literatura

- AMBAUM, M. HOSKINS, B. STEPHENSON, D., 2001. Artic Oscillation or North Atlantic Oscillation? *Journal of Climate – American Meteorological Societe*. Vol. 14, Issue 16, s. 3495–3507.
- [2] BLUESTAIN, H. B., 1992. Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. New York: Oxford University Press.
- [3] PAPPENBERGER, F. WETTERHALL, F. ALBERGEL, C. – ALFIERI, L. – BALSAMO, G. et al., 2013. Floods in Cental Europe in June 2013. ECMWF Newsletter, No 136 – Summer 2013, p. 9–11.
- [4] ŠERCL, P. TYL, R. PECHA, M., 2013. Průběh a extremita povodně v červnu 2013. *Meteorologické Zprávy*, roč. 66, č. 6, s. 197–202. ISSN 0026-1173.
- [5] VALERIÁNOVÁ, A. HOLTANOVÁ, E. CRHOVÁ, L., 2013. Klimatologie příčinných srážek červnové povodně v České republice v roce 2013. *Meteorologické Zprávy*, roč. **66**, č. 6, s. 190–196. ISSN 0026-1173.
- [6] Vyhodnocení katastrofální povodně v srpnu 2002. Meteorologické příčiny katastrofální povodně v srpnu 2002 a vyhodnocení extremity příčinných srážek. *Dílčí zpráva*. Odpovědný řešitel SANDEV, M. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2002. s. 7–33.
- [7] Vyhodnocení povodní v červnu a červenci 2009 na území České republiky. Meteorologické příčiny povodní. Dílčí zpráva. Odpovědný řešitel SANDEV, M. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2010.

Lektor (Reviewer): RNDr. Roman Volný

VYUŽITÍ RADAROVÝCH MĚŘENÍ PRO KVANTITATIVNÍ ODHADY A NOWCASTING SRÁŽEK V ČESKÉM HYDROMETEOROLOGICKÉM ÚSTAVU

Petr Novák, Hana Kyznarová, Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany, petr.novak@chmi.cz, kyznarova@chmi.cz

Use of radar measurements for quantitative precipitation estimates and nowcasts in the Czech Hydrometeorological Institute. This paper summarizes evolution of operational quantitative precipitation estimates (QPE) and nowcasts (QPN) in the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI). It discusses steps necessary to construct good radar precipitation estimates and positive influence of the utilization of exchanged radar volume data from neighboring countries on QPE. The accuracy of radar-only based QPE is not sufficient, which leads to a combination of radar precipitation estimates and point raingauge measurements. The paper shortly describes current status of QPE and QPN algorithms operationally used in the CHMI and their planned development in the near future. Finally, the paper gives an overview of applications that utilize the results of QPE and QPN in order to provide information and warnings to meteorologists and hydrologists in operation and also to the public.

KLÍČOVÁ SLOVA: detekce dálková – radiolokátor meteorologický – srážky atmosferické – nowcasting – povodeň – Česká republika

KEY WORDS: distant detection - meteorological radar - atmospheric precipitation - nowcasting - flood - Czech Republic

1. ÚVOD

Meteorologické radary jsou pokročilá technická zařízení sloužící zejména pro identifikaci srážkové oblačnosti a s ní spojených srážek. Neocenitelné jsou pro detekci konvekčních bouří, se kterými je spjato množství nebezpečných jevů, mimo jiné i intenzivní srážky, které mohou způsobit přívalové povodně.

Radarová pozorování jsou od svých začátků (v Česku před více jak 40 lety) využívána primárně kvalitativně ve formě plošné obrazové informace zobrazované na mapových podkladech. Vzhledem k tomu, že existuje úzký, nikoliv však jednoznačný, vztah mezi měřenou radiolokační odrazivostí a intenzitou srážek na zemském povrchu, jsou radarová data využívána též pro odhad plošného rozložení srážek. První odhady srážek založené na radarových měřeních byly operativně prováděny ještě za doby manuálních měření [26], hlavní rozvoj však začal až v devadesátých letech, kdy byla k dispozici digitální radarová data [17, 18, 6, 19]. V poslední době jsou tyto odhady rozšiřovány též o nowcasting (předpověď na několik nejbližších hodin) plošných srážkových úhrnů [13].

Cílem tohoto článku není detailně popisovat jednotlivé metody kvantitativních odhadů a nowcastingu srážek ani prezentovat výsledky statistického vyhodnocení kvality těchto metod. Ty již byly prezentovány v jiných statích, zde budeme uvádět pouze odkazy na tyto práce. V tomto článku bychom rádi shrnuli vývoj operativních odhadů a nowcastingu srážek v Českém hydrometeorologickém ústavu (ČHMÚ) za posledních dvacet let, kdy jsou k dispozici digitální radarová data, se zaměřením na v současnosti operativně provozované aplikace a výhled na nejbližší období.

2. RADAROVÉ ODHADY SRÁŽEK

Aby bylo možné smysluplně využívat radarová data kvantitativně, je třeba na prvním místě radar korektně nakalibrovat, tedy zajistit, že měřená hodnota radiolokační odrazivosti odpovídá dle radarové rovnice výkonu přijatého signálu a technickým parametrům radaru. Dále je třeba zajistit, aby radarové měření bylo stabilní v čase. Kontrola stability a kalibrace meteorologických radarů České radarové sítě CZRAD, tzn. radarů Brdy-Praha a Skalky [12], je prováděna během pravidelných servisních návštěv přibližně jednou měsíčně.

Dalším nezbytným krokem je kontrola kvality měřených radarových dat, zejména eliminace nemeteorologických cílů. Hlavní eliminace pozemních odrazů je u radarů Brdy i Skalky prováděna přímo v signálních procesorech pomocí tzv. Dopplerovských filtrů, kdy jsou z měřených dat filtrovány odrazy s vyhodnocenou radiální rychlostí blízkou nule. Dopplerovské filtry jsou schopny eliminovat většinu nemeteorologických cílů, neporadí si však s odrazy od pohybujících se pozemních cílů (například farmy větrných elektráren) a též s falešnými cíli způsobenými detekcí signálu z vysílačů pracujících na stejné frekvenci jako radar. Během posledního desetiletí počet těchto rušení enormně narostl vlivem zařízení RLAN (radioreléové spoje) pracujících v pásmu 5 GHz a využívaných pro bezdrátové internetové připojení. Vzhledem k tomu, že Český telekomunikační úřad není schopen efektivně ochránit radarová měření od těchto rušení, musel být do zpracování objemových radarových dat začleněn softwarový filtr, který filtruje značnou část, nikoliv však veškeré RLAN rušení [28].

Pro radarové odhady srážek je třeba zvolit vhodný radarový produkt, který zobrazuje radarovou odrazivost co nejblíže zemskému povrchu, ale měření přitom není ovlivněno pozemními odrazy (zbytkovými odrazy i znehodnocenými údaji v místech vymazaných odrazů). Na základě několika provedených studií byl jako nejvhodnější pro Českou republiku vybrán produkt PseudoCAPPI 2 km, který zobrazuje radiolokační odrazivost ve výšce 2 km nad hladinou moře, a ve vzdálených oblastech, kde i nejnižší radarový paprsek je nad touto hladinou, je dosazena odrazivost z nejnižší dostupné hladiny. V teplé polovině roku je tento produkt schopen zachytit poměrně dobře srážky do cca 150–180 km. Ve větších vzdálenostech se již výrazněji projevuje podceňování srážek vlivem přílišné výšky nejnižšího radarového paprsku. Eliminovat toto podceňování je možné statistickými nebo fyzikálními korekcemi využívajícími vertikální profil odrazivosti (VPR korekce) [6, 10, 27]. Produkt CAPPI 2km s VPR korekcí je v ČHMÚ rutinně generován a je používán pro alternativní výpočet radarových odhadů srážek. Provozně je však v současnosti využíván produkt PseudoCAPPI 2km. Podceňování ve větších vzdálenostech od radaru je eliminováno pomocí kombinace měření z více radarů a následně online kombinací se srážkoměrnými daty.

Do roku 2012 byly odhady srážek počítány pouze z radarů Brdy a Skalky. Díky pokroku ve výměně radarových dat v rámci programu EUMETNET-OPERA došlo během roku 2012 ke zprovoznění bilaterálních výměn objemových radarových dat se Slovenskem, Polskem a Německem [15]. Tato nově získaná data jsou výrazně kvalitnější než dříve vyměňované produkty, a je možné je využívat i pro kvantitativní odhady srážek. Na jaře 2013 tak byl zprovozněn výpočet nových radarových odhadů srážek založený na rozšířené sloučené radarové informaci CZRAD-EXT. Do rozšířené domény vstupují české radary Brdy a Skalky, společně s polskými radary Pastewnik, Ramza a Bzucharnia, slovenským Malým Javorníkem a německými radary Drážďany, Neuhaus a Eisberg. Připraveno je i začlenění rakouských radarů až bude připravena dohoda o výměně objemových radarových dat. Díky výměně objemových radarových dat jsou ze všech radarů generovány jednotným způsobem produkty PseudoCAPPI 2 km a je aplikována rozšířená kontrola kvality dat, tzn. eliminace rušení RLAN, eliminace osamocených pixelů/šumu. Rozšířená sloučená informace poskytuje lepší operativní informaci o srážkách, a to zvláště v příhraničních horských oblastech republiky. Umožňuje alespoň částečně zmírňovat problémy spojené s neviditelností spodních hladin atmosféry ve velkých vzdálenostech od radaru a útlumem radarového signálu v silných srážkách. Využití objemových dat z okolních zemí umožňuje též efektivnější identifikaci nemeteorologických cílů (zbytkové pozemní odrazy, rušení) a lepší rekonstrukci odrazivosti v identifikovaných oblastech.

Pro přepočet radiolokační odrazivosti na intenzitu srážek se používá Marshall-Palmerův vztah ve tvaru $z = 200 R^{1.6}$, kde z značí radiolokační odrazivost a R intenzitu srážek [9,

2]. Přepočet je prováděn v rozmezí odrazivostí 7–55 dBZ, které odpovídají intenzitám srážek $0,1-99,9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Pro odrazivost menší než 7 dBZ je intenzita srážek ponechána nulová, což eliminuje falešné slabé srážky vyvolané vlivem tzv. clear air echa. Maximální intenzita srážek je nastavena na 99,9 mm·h⁻¹, aby bylo eliminováno přeceňování intenzity srážek vlivem přítomnosti krup.

Závěrečný výpočet radarových odhadů srážkových úhrnů je prováděn jako časová integrace radarového odhadu intenzity srážek pro zvolený časový interval. Nejčastěji jsou počítány odhady úhrnu srážek za 1 h, 3 h, 6 h a 24 h. Výpočty byly dříve aktualizovány každou hodinu, v poslední době se v některých případech přechází na aktualizaci každých 5 nebo 10 minut. Prostorové rozlišení radarových produktů, včetně odhadů srážek, je v současnosti již standardně 1 × 1 km.

3. KOMBINOVANÉ PLOŠNÉ ODHADY SRÁŽEK Z RADARŮ A SRÁŽKOMĚRŮ

I při využití co nejkvalitnějších radarových dat a aplikaci vhodných korekcí jsou čistě radarové odhady srážek zatíženy značnou nejistotou. Nejčastěji pozorujeme podceňování srážek ve větších vzdálenostech od radaru a v horských oblastech [17, 27]. Další zkvalitňování odhadů srážek je již potřeba řešit kombinací plošných čistě radarových odhadů srážek s operativními bodovými měřeními ze sítě srážkoměrů. Čistě radarové odhady dobře zaznamenávají prostorovou proměnlivost srážek, nejsou ale již tak přesné v absolutních hodnotách. Naproti tomu jsou data ze srážkoměrů relativně přesná, i když i zde může dojít k chybě až několika desítek procent [8, 24]. Pokud ovšem není síť srážkoměrů dostatečně hustá, nemohou srážkoměrná měření podchytit velkou prostorovou variabilitu srážkového pole, zejména v případě konvekčních srážek.

Metod pro operativní kombinaci radarových a srážkoměrných dat vznikla u nás i ve světě celá řada. Jednotlivé metody obecně zlepšují odhad srážek. Lepší výsledky dávají prostorově proměnné kombinace/korekce než jednoduchá prostorově neproměnná adjustace [3, 27]. V případě prostorově proměnlivé kombinace již rozdíly mezi jednotlivými metodami nejsou tak výrazné a větší vliv má poté kvalita a množství dostupných srážkoměrných údajů. Na rozdíl od radarových dat, která jsou díky rychlým datovým linkám dostupná se zpožděním pouze několika málo minut po ukončení měření, se srážkoměrná data přenáší mnohdy z odlehlých lokalit pomocí pomalého mobilního připojení, a jsou proto dostupná se zpožděním jednotek až několik desítek minut po termínu měření. Další zpomalení nastává při zpracování v centru a importu do databáze, odkud jsou srážkoměrná data dostupná pro následné zpracovatelské aplikace. Z tohoto důvodu po vytvoření čistě radarových odhadů srážek (v cca druhé minutě po termínu měření z českých radarů a v cca 7 minutě po termínu měření z rozšířené radarové informace) je třeba vyčkat do přibližně 20 minuty po termínu měření, než je k dispozici dostatek srážkoměrných stanic pro operativní kombinaci radarových a srážkoměrných údajů. V databázi je k dispozici značné množství srážkoměrných údajů i dříve, bohužel dostupnost stanic je značně prostorově proměnlivá, viz obr. 1.

3.1 Systém MERGE

MERGE byl první systém pro operativní kombinaci radarových měření se srážkoměry provozovaný rutinně v ČHMÚ. Byl založen na adjustaci radarových odhadů pomocí průměrného adjustačního koeficientu a následné kombinaci se srážkoměrnými údaji metodou Double Optimum Estimation (specifická verze metody kriging), kterou původně vyvinul D. J.



Obr. 1 Průměrný čas dostupnosti údajů ze srážkoměrných stanic po termínu měření v databázi CLIDATA (dostupnost hodinových úhrnů v období 28. 10.–12. 11. 2013). Kulaté symboly zobrazují stanice ČHMŮ a čtvercové symboly stanice externích organizací.

Fig. 1. Average availability of raingage measurements in CLIDATA database (availability of hourly precipitation during period 28. 10.–12. 11. 2013). Circle symbols represent the CHMI raingages and square symbols represent raingages of external organizations.

Seo [22]. Systém byl uveden do provozu postupně v letech 2000–2003, nejdříve pro 24hodinové úhrny a postupně i pro kratší až hodinové úhrny. V roce 2009 byl systém modernizován, adjustace průměrným koeficientem byla nahrazena prostorově proměnnou lokální adjustací a kombinační metoda začala využívat kriging s externím driftem (KED). V této podobě je systém pro hodinové a delší sumy srážek v hodinovém kroku využíván dodnes [21].

Posledním rozšířením systému MERGE bylo zavedení výpočtů kombinovaného odhadu pro plovoucí hodinové sumy s časovým krokem 10 minut. Z důvodu vysoké časové náročnosti metody KED byla pro tyto výpočty zvolena metoda označovaná jako conditional merging (opět specifická verze metody kriging, označovaná někdy též jako kriging with radar-based error correction), která vychází z práce [25].

MERGE operativně zpracovává odhady srážek z českých radarů, údaje z české sítě srážkoměrných stanic a ze synoptických stanic z okolních zemí. Bohužel systém neumožňuje využívat rozšířenou sloučenou radarovou informaci obsahující data i z okolních radarů. Tento nedostatek by měla odstranit plánovaná revize systému MERGE, která se bude týkat způsobu výpočtu odhadů srážek a také jejího zobecnění tak, aby bylo možné ji použít na různých doménách a s různými vstupními daty. V rámci této revize se plánuje též návrat od lokální adjustace zpět k průměrnému adjustačnímu koeficientu. Pole lokálních adjustačních koeficientů se ukázalo jako méně vhodné pro adjustaci radarových předpovědí srážek metodami COTREC a CELLTRACK při jejich využití v hydrologických modelech nebo v aplikaci JSWarnView, viz následující kapitoly.

3.2 Systém INCA-CZ

Systém INCA byl vyvinut rakouskou meteorologickou službou ZAMG a následně poskytnut dalším institucím. INCA-CZ, upravená verze systému INCA pro výpočet na území České republiky, byla zprovozněna v ČHMÚ v roce 2010 v rámci středoevropského projektu INCA-CE. Systém INCA-CZ provádí analýzu a předpověď různých meteorologických veličin, mimo jiné i srážek. Vstupem pro analýzu srážek jsou data z meteorologických radarů a srážkoměrných stanic. Na rozdíl od metody MERGE zde do výpočtu vstupují kromě dat z českých radarů také data z radarů z Polska, Slovenska a Německa. Podobně u staničních dat jsou využívána i dostupná data ze srážkoměrných stanic z okolních zemí kromě Německa. Pomocí kombinace radarových a srážkoměrných měření je proveden kvantitativní odhad srážek. Srážkoměrná měření se nejprve interpolují do gridové sítě pomocí jednoduché interpolace z nejbližších 8 stanic. V původním algoritmu ZAMG je používána "klimatologická" korekce radarových dat, kdy se radarová data korigují na základě poměru 3 měsíčních sum srážek ze srážkoměrů a radarů. Ta se v ČHMÚ nepoužívá. Probíhá pouze korekce radarových dat na základě váženého průměru poměrů aktuálních radarových a srážkoměrných dat z okolních 8 stanic. Výsledná

kombinace je součtem hodnot z pole interpolovaných staničních hodnot a rozdílu korigovaného radarového pole a pole interpolovaného z radarových hodnot naměřených v místech stanic. Algoritmus obsahuje také korekci srážek v závislosti na nadmořské výšce povrchu, která se ale v českých podmínkách s hodnotami převýšení řádu stovek metrů neprojevuje (nejedná se o návětrné efekty, směr a rychlost větru v algoritmu nejsou zohledněny). Algoritmus odhadů srážek je podrobně popsán v [4]. Systém INCA-CZ je v současnosti počítán operativně a v některých aplikacích je využíván jako zdroj alternativních plošných odhadů srážek.

4. RADAROVÝ NOWCASTING SRÁŽEK

4.1 Metoda COTREC

COTREC je hlavní metodou používanou v ČHMÚ pro nowcasting srážek. Jedná se o implementaci algoritmu COTREC popsaného např. v [29]. COTREC porovnává dvě časově blízká pole maximální radarové odrazivosti a v operativním provozu používá časový krok 10 minut. Aktuální pole a různě posunutá předchozí pole jsou nejprve porovnána na celé doméně, poté na šesti menších oblastech a na závěr v oblastech o rozměrech 44 km × 44 km. Z posunu pole, pro které je nalezena nejlepší podobnost polí, je určen vektor pohybu. Jako kritérium podobnosti slouží střední absolutní chyba. Po aplikaci podmínky kontinuity proudění na vektory pohybu vypočtené pro menší oblasti obdržíme výsledné pole vektorů pohybu. Pomocí získaného pohybového pole je poté metodou zpětných trajektorií prováděna extrapolace aktuálního radarového pole až na 180 minut s krokem 5 minut. Implementace algoritmu COTREC v ČHMÚ je podrobněji popsána v [11].

Obdobně jako jsou počítány odhady srážek, je možné provést přepočet extrapolovaných radarových polí na intenzitu srážek a provést integraci za požadované období. Pro kvalitativní sledování přesunu srážkových útvarů se většinou používají předpovědi na 60 až 90 minut. Porovnání předpovědí hodinových úhrnů srážek na +1 h, +2 h a +3 h metodou COTREC s předpověďmi srážek numerického modelu



Obr. 2 Ukázka vizualizace kombinovaných odhadů srážek v aplikaci JSPrecipView. Fig. 2. Example of visualization of combined precipitation estimates in JSPrecipView.



Obr. 3 Ukázka varovné webové aplikace JSWarnView. Fig. 3. Example of JSWarnView – warning web application.

ALADIN ukázala [13], že předpovědi COTREC dávají lepší výsledky na první a druhou hodinu a srovnatelné výsledky pro třetí hodinu. Pro účely hydrologického modelování tak jsou generovány předpovědi srážek až na tři hodiny.

Pro zkvalitnění předpovědí zejména v příhraničních oblastech a pro delší předpovědní časy byla připravena modifikovaná metoda COTREC-EXT. Tato metoda je počítána na větší doméně CZRAD-EXT. Pro první odhad pohybového pole je využíváno předpovědní pole větru v hladině 700 hPa z numerického modelu ALADIN, na území České republiky je pak pohybové pole upřesněno porovnáním dvou časově blízkých měření radarů CZRAD. Získané pohybové pole je poté použito pro extrapolaci rozšířené sloučené radarové informace CZRAD-EXT [14]. V současnosti je tato modifikovaná metoda používána jako variantní předpověď srážek v modelu HYDROG. Do budoucna je plánováno využití i v dalších aplikacích.

4.2 Metoda CELLTRACK

CELLTRACK je objektově orientovaná metoda identifikace jader radarové odrazivosti a extrapolační předpovědi jejich polohy. Metoda identifikuje jednotlivá jádra odrazivosti (při aplikaci v ČHMÚ oblasti odrazivosti vyšší než 44 dBZ) a sleduje je na základě porovnání dvou po sobě jdoucích radarových měření. Na základě vektorů pohybu jednotlivých jader je provedena extrapolace jejich polohy. Polohu je možné extrapolovat buď pomocí pouze posledního vektoru pohybu daného jádra odrazivosti, nebo využít i starší vektory pohybu daného jádra (v současnosti jedna hodina do minulosti daného jádra odrazivosti). Potom je extrapolace provedena na základě váženého průměru těchto vektorů, kdy váha vektorů klesá směrem do minulosti. CELLTRACK není algoritmus primárně určený pro nowcasting srážek už proto, že sleduje pouze vybrané intenzivní oblasti radarového echa. Ukázalo se nicméně, že ve výrazných konvekčních situacích je vhodným doplňkovým produktem, protože v některých případech dokáže zachytit odlišnosti pohybu jednotlivých jader odrazivosti od okolního radarového echa, které není možné již z principu detekovat metodou COTREC. CELLTRACK je podrobněji popsán v [7].

4.3 Nowcasting srážek v systému INCA-CZ

Systém INCA-CZ je v ČHMÚ používán i pro nowcasting srážek. Extrapolace kvantitativního odhadu srážek probíhá na základě vektorů pohybu vypočtených pomocí kroskorelace mezi dvěma po sobě jdoucími kvantitativními analýzami srážek. Porovnávány jsou čtverce o rozměrech 100 × 100 km. Vypočtené vektory se zároveň nesmí lišit od pole větru vypočteného numerickým modelem ALADIN o více než předem stanovenou hodnotu. Mezi druhou a šestou hodinou předpovědi dochází ke kombinaci s numerickým modelem pomocí váženého průměru, kdy váha modelové předpovědi postupně roste s délkou předpovědi. Po šesté hodině se jedná již o čistě modelovou předpověď. Podobně jako kvantitativní analýza srážek je i nowcasting srážek INCA-CZ počítán operativně a v některých aplikacích ČHMÚ dostupný jako alternativa k hlavní metodě COTREC.

5. UŽIVATELSKÉ VÝSTUPY

Aby byly výstupy z jednotlivých systémů odhadů a nowcastingu srážek skutečně operativně využitelné bylo potřeba též vytvořit patřičné nástroje na jejich vizualizaci a začlenění do následných automatických systémů.

5.1 JSMeteoView/ JSPrecipView

Pro vizualizaci radarových měření vznikla v ČHMÚ webová aplikace JSMeteoView [11]. která slouží jako primární nástroj pro účely předpovědních pracovišť ČHMÚ. Aplikace zobrazuje měřená radarová data a předpovědi COTREC a CELLTRACK a umožňuje kombinaci s některými dalšími zdroji dat (staniční měření, data detekce blesků, družicová pozorování, vybraná pole z modelu ALADIN). V aplikaci je možné díky připraveným mapovým vrstvám a detailní geografické navigaci provádět přesnou geografickou lokalizaci sledovaných jevů. Pro zobrazování kombinovaných odhadů srážek MERGE vznikla v roce 2003 aplikace JSPrecipView, která vychází z aplikace JSMeteoView. Jedná se opět o webovou aplikaci umožňující detailní geografickou lokalizaci jevů a kombinaci více zdro-



Obr. 4 Ukázka webové aplikace HydroView. Fig. 4. Example of HydroView web application.

jů dat. V aplikaci JSPrecipView je možné zobrazovat všechny typy předpovědi generované metodou MERGE (samostatné odhady z radarů a srážkoměrů, adjustovaný radarový odhad a kombinovaný odhad) v jednohodinovém kroku. Navíc je zde možné zobrazovat průměrné a maximální úhrny srážek na předdefinovaných povodích a zobrazovat i jejich časový vývoj, viz obr. 2.

5.2 JSWarnView

V reakci na zkušenosti získané během přívalových povodní v květnu a červnu 2009 vznikla na popud předpovědních pracovišť ČHMÚ aplikace JSWarnView [14]. Pro tuto aplikaci jsou z měřených radarových dat a výsledků extrapolace metodou COTREC počítány radarové odhady srážek pro aktuální čas t_0 a předpovědní časy t_0+30 , t_0+60 a t_0+90 minut. Pro každý z těchto časů jsou počítány odhady srážek za posledních 15, 30, 60 a 180 minut. Pro těchto 16 srážkových odhadů jsou vyhodnocovány maximální hodnoty srážek v jednotlivých okresech.

Webová aplikace JSWarnView poté porovnává dosažené maximální hodnoty s definovanými prahovými hodnotami a podle jejich překročení je příslušný okres označen odpovídající barvou (zelená/žlutá/oranžová/červená) v mapkách pro jednotlivé předpovědní časy (viz obr. 3). Po vyhodnocení dvouletého provozu byly na jaře 2013 provedeny úpravy prahových hodnot, upraven způsob výpočtu maximálních hodnot (na pole srážek je nejdříve aplikován mediánový filtr pro 3×3 pixely) a doplněno sledování bleskové aktivity a pravděpodobnosti výskytu krup.

Systém JSWarnView byl vyvinut jako nástroj pro včasné upozornění na potenciálně nebezpečnou srážkovou situaci, která by mohla vést ke vzniku přívalových povodní. Nejedná se o nástroj, který by se snažil o co nejpřesnější odhad a předpověď srážek. Důraz je kladen na co největší aktuálnost dat a přehlednost informace, akceptována je možnost zvýšených výskytů falešných poplachů. Srážkové odhady jsou aktualizovány každých 5 minut po dostupnosti nového radarového měření. S ohledem na aktuálnost dat není vyčkáváno na dostupnost odpovídajících srážkoměrných údajů, adjustace radarových odhadů se provádí pouze pomocí adjustačního koeficientu dostupného z posledního běhu metody MERGE.

5.3 Výstupy pro hydrologické modely

První hydrologický model, který začal radarové odhady srážek operativně využívat, byl model HYDROG [16], který je používán pro povodí Odry, Moravy a Dyje. Pro tento model jsou přibližně od poloviny minulého desetiletí připravovány v hodinovém kroku odhady srážek MERGE, adjustační koeficienty a předpovědi srážek COTREC pro první, druhou a třetí hodinu. Od jara roku 2013 jsou pro model HYDROG počítány též kombinované odhady a předpovědi srážek systémem INCA-CZ využívajícím rozšířenou radarovou sloučenou informaci. Data jsou připravována ve formě průměrných hodnot na předdefinovaných polygonech reprezentujících jednotlivé části povodí. Pro vizualizaci hydrologických měření a vstupních dat i výsledků modelu HYDROG slouží webová aplikace HydroView (obr. 4).

V posledních několika letech se začal v experimentálním režimu provozovat upravený model HYDROG zaměřený na předpověď přívalových povodní. Pro tento model jsou připravovány odhady srážek metodami MERGE a INCA-CZ a předpovědi srážek metodami COTREC, COTREC-EXT, CELLTRACK a INCA-CZ v kroku 5 nebo 10 minut. Model na základě jednotlivých odhadů a předpovědí srážek sestavuje variantní scénáře srážek, pro které počítá hydrologickou předpověď. Výsledná předpověď je poté pravděpodobnostní, určená na základě toho v kolika procentech variantních předpovědí bylo dosaženo patřičné limitní hodnoty [1].

Radarové odhady a předpovědi srážek jsou využívány i v dalších vyvíjených hydrologických aplikacích jako je Indikátor přívalových povodní (Flash flood guidance, FFG-CZ) [23] nebo hydrologický fuzzy model [5].

5.4 Prezentace dat pro veřejnost

Radarové odhady a předpovědi srážek jsou k dispozici i pro veřejnost prostřednictvím webových stránek ČHMÚ. Na serveru Hlásné a povodňové předpovědní služby <http:// hydro.chmi.cz/> jsou k dispozici kombinované hodinové, 3hodinové, 6hodinové a 24hodinové odhady srážek z metody MERGE. Stejná data jsou k dispozici i v nově připravované prezentaci "CHMI NowcastingWebportal" <http:// now.chmi.cz/>, která umožňuje zobrazovat i další data včetně okamžitých radarových měření a extrapolačních předpovědí COTREC. Navíc umožňuje animaci zobrazovaných polí a detailní geografickou lokalizaci díky předpřipraveným mapovým vrstvám ve vysokém rozlišení anebo využívání mapových podkladů GoogleMaps.

6. ZÁVĚR

Kombinované odhady srážek jsou v současnosti s úspěchem využívány v operativní meteorologii a hydrologii, jsou nicméně zatíženy různými nedostatky. Pro jejich další zlepšení je třeba se v budoucnosti zaměřit na zkvalitnění a zlepšení dostupnosti radarových a srážkoměrných dat a na úpravu algoritmů pro jejich kombinaci, aby bylo možné výhod kvalitních vstupních dat využít. Jedná se zejména o revizi a zobecnění algoritmů kombinace tak, aby byly schopny pracovat i s daty z okolních států, u srážkoměrných stanic se jedná zejména o dostupnost dat co nejdříve po termínu měření z co největšího počtu srážkoměrných stanic. Přestože kombinované odhady srážek z radarů a srážkoměrů nejsou bezchybné, představují v současnosti nejlepší dostupný plošný odhad a nowcasting srážek.

Literatura:

- BŘEZKOVÁ, L.–ŠÁLEK, M.–NOVÁK, P.–KYZNAROVÁ, H. – JONOV, M., 2011. New methods of flash flood forecasting in the Czech Republic. In: *International Symposium on Environmental Software Systems*, Brno, 27.–29. 6. 2011.
- [2] COLLIER, CH. G., 1996. Applications of weather radar systems. A guide to uses of radar data in meteorology and hydrology. 2nd edition, John Wiley&Sohns, 390 s.
- [3] GOUDENHOOFDT, E. DELOBBE, L., 2009. Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, s. 195–203, doi:10.5194/hess-13-195-2009.
- [4] HAIDEN, T.-KANN, A.-WITTMANN, C.-PISTOTNIK,G. BICA, B., 2011. The Integrated Nowcasting through

Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region, *Weather and Forecasting*, **26**, 166–183.

- [5] JANÁL, P. STARÝ, M., 2012. Fuzzy model used for the prediction of a state of emergency for a river basin in the case of a flash flood – part 2, *J. Hydrol. Hydromech.*, 60, s. 162–173.
- [6] KRÁČMAR, J. JOSS, J. NOVÁK, P. HAVRÁNEK, P. ŠÁLEK, M., 1999. First steps towards quantitative usage of data from Czech weather radar network. In: *Final Seminar* of COST-75: "Advanced Weather Radar Systems", Locarno, 23.–27. 3. 1998, European Commission, Luxembourg, s. 91–101. ISBN 92-828-4907-4.
- [7] KYZNAROVÁ, H. NOVÁK, P., 2009. CELLTRACK Convective cell cracking algorithm and its use for deriving life cycle characteristics, *Atmospheric Research*, 93, 2009, s. 317–327.
- [8] MARSALEK, J., 1981. Calibration of the tipping-bucket raingage. *Journal of Hydrology*, **53**, s. 343–354.
- [9] MARSHALL, J. S. PALMER, W. M., 1948. The distribution of raindrops with size, *Journal of Meteoorology*, 5, s.165–166.
- [10] NOVÁK, P., 2000. Meteorological Interpretation of Doppler Weather Radar Measurements. Doktorská disertační práce. Praha. Univerzita Karlova. Fakulta matematicko-fyzikální, 89 s.
- [11] NOVÁK, P., 2007. The Czech Hydrometeorological Institute's Severe Storm Nowcasting System. *Atmospheric Research*, 83, s. 450–457.
- [12] NOVÁK, P. HAVRÁNEK, P. KRÁČMAR, J., 2008. Česká meteorologická radarová síť CZRAD v roce 2008. *Meteorologické Zprávy*, roč. 61, s.129–136. ISSN 0026-1173.
- [13] NOVÁK, P. BŘEZKOVÁ, L. FROLÍK, P., 2009. Quantitative Precipitation Forecast using Radar Echo Extrapolation. *Atmospheric Research*, 93, s. 328–334.
- [14] NOVÁK, P. FROLÍK, P. BŘEZKOVÁ, L. JANÁL, P., 2010. Improvements of Czech Precipitation Nowcasting System. In: 6th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2010), Sibiu, 6.–10. 9. 2010.
- [15] NOVÁK, P. FROLÍK, P. BŘEZKOVÁ, L. KYZNA-ROVÁ, H., 2012.Utilization of Exchange of Weather Radar Data in the Czech Hydrometeorological Institute. In: 7th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2012), Toulouse, 24.–29. 6. 2012.
- [16] STARÝ, M. TUREČEK, B., 2000.Operative control and prediction of floods in the River Odra basin. In.: Flood Issues in Contemporary Water Management, NATO Science Series, 2. *Enviromental Security*, **71**, Kluwer Academic Publishers, s. 229–236, ISBN 0 7923-6452-X.
- [17] ŠÁLEK, M. KRÁČMAR, J., 1997 Odhady srážek z meteorologického radiolokátoru Skalky. *Meteorologické Zprávy*, roč. 50, s. 99–109. ISSN 0026-1173.
- [18] ŠÁLEK, M. KRÁČMAR, J. NOVÁK, P. SETVÁK, M., 1997. Využití distančních metod při povodňových událostech v červenci 1997. *Meteorologické Zprávy*, roč. 50, s. 177–178. ISSN 0026-1173.
- [19] ŠÁLEK, M. NOVÁK, P. KRÁČMAR, J., 2002. Využití metod dálkové detekce během povodní v České republice v srpnu roku 2002. *Meteorologické Zprávy*, roč. 55, s. 177–179. ISSN 0026-1173.
- [20] ŠÁLEK, M. NOVÁK, P. SEO, D-J., 2004. Operational application of combined radar and raingauges precipitati-

on estimation at the CHMI. *ERAD publication series*, **2**, s. 16–20. ISBN 3-936586-29.

- [21] ŠÁLEK, M., 2011. Kombinace údajů meteorologických radiolokátorů a srážkoměrů pro odhad srážek. Doktorská disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny.
- [22] SEO, D.-J., 1998. Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and raingage data. J. Hydrol., 208, s. 37–52.
- [23] ŠERCL, P., 2011. The robust method for an estimate of runoff caused by torrential rainfall and proposal of a warning system. In: *Early Warning for Flash Floods, Workshop proceedings*, Praha: ČHMÚ, s. 76–81. ISBN 978-80-86690-91-9.
- [24] SEVRUK, B. LAPIN, M., 1993. Precipitation measurement and quality control. In: *Proceedings of the International Symposium on Precipitation and Evaporation*, Bratislava: SHMÚ, 207 s.
- [25] SINCLAIR, S. PEGRAM, G., 2005. Combining radar

and raingauge rainfall estimates using conditional mening. *Atmos. Sci. Let.*, **6**, s. 19–22.

- [26] STRACHOTA, J., 1985. Radiolokační měření srážek pro hydrologické účely. *Meteorologické Zprávy*, roč. 38, s. 137–140. ISSN 0026-1173.
- [27] ZACHAROV, P. ŠÁLEK, M. NOVÁK, P., 2004. Porovnání různých metod využívajících radarová a srážkoměrná měření pro odhad srážek. *Meteorologické Zprávy*, roč. 55, s. 157–167. ISSN 0026-1173.
- [28] ŽEJDLÍK, T. NOVÁK, P., 2010. Frequency Protection of the Czech Weather Radar Network. In: 6th European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD 2010), Sibiu, 6.–10. 9. 2010.
- [29] ZGONC, A. RAKOVEC, J., 1999. Time extrapolation of radar echo patterns. In: *Final Seminar of COST-75: "Advanced Weather Radar Systems"*. Locarno, 23.–27. 3. 1998, European Commission, Luxembourg, s. 229–238, ISBN 92-828-4907-4.

Lektor (Reviewer): doc. RNDr. Dana Řezáčová, CSc.

KVANTITATIVNÍ PŘEDPOVĚĎ SRÁŽEK MODELEM ALADIN PŘI PRVNÍ VLNĚ POVODNĚ V ČERVNU 2013

Radmila Brožková, Ján Mašek, Alena Trojáková, Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany, radmila.brozkova@chmi.cz, jan.masek@chmi.cz, alena trojakova@chmi.cz

Quantitative precipitation forecast by the ALADIN model during the first flood episode in June 2013. Quantitative precipitation forecast is one of the most difficult challenges of numerical weather prediction. However, with the increase in models resolution, more complex description of physical processes and better analysis of initial conditions, progress is achieved also in predicting this parameter. In the present short contribution we demonstrate current possibilities of the deterministic precipitation forecast on the extreme event case of June 2013, especially regarding forecast lead time, and including tests of forecast sensitivity to the change of some parameters.

KLÍČOVÁ SLOVA: předpověď srážek kvantitativní – předpověď počasí numerická – předstih předpovědi

KEY WORDS: quantitative precipitation forecast – numerical weather prediction – forecast lead time

1. ÚVOD

Pro posun předstihu předpovědi povodňových jevů je co nejlepší kvantitativní předpověď srážek klíčová. Přesto, že se za uplynulá desetiletí významně zlepšila, jedná se o parametr, který je stále obtížné předpovídat. Zatímco pro veličiny jako pole hmoty atmosféry byl získáván jeden den prediktability za přibližně deset let, u kvantitativní předpovědi srážek je situace méně příznivá, můžeme spíše mluvit o jednotkách hodin než dní. I ty ale mají v kritických situacích svou cenu. Tento příspěvek je věnován stručnému pohledu na předpověď srážek modelem ALADIN v ČHMÚ a některým testům citlivosti na vybrané parametry při první vlně povodní z konce května a začátku června 2013 [11]. Druhá sekce krátce popisuje provozní konfiguraci modelu ALADIN. Třetí sekce seznamuje čtenáře s charakterem srážkové činnosti a její modelové provozní předpovědi, zatímco čtvrtá sekce představuje výsledky testů citlivosti předpovědi extrémních srážek na vybrané parametry a některé základní verifikační statistiky.

2. POPIS PROVOZNÍ VERZE MODELU ALADIN V ČERVNU 2013

Konfigurace modelu ALADIN a jeho provozních výpočtů byla v červnu 2013 následující. Horizontální rozlišení je 4,7 km na oblasti pokrývající střední Evropu a její okolí (přibližně 2 500 km × 2 000 km), počet vertikálních hladin je 87. Dynamické jádro modelu integruje základní hydrostatické rovnice s časovým krokem 180 s. Semi-Lagrangeovské schéma advekce je též využito ve formulaci horizontální difuse modelu podle [12].

Parametrizace fyzikálních procesů jsou zcela konzistentní z hlediska použitých předpokladů termodynamiky a jejich napojení na dynamické jádro respektuje jak tuto konzistenci, tak zachování energie a hmoty, viz práce [4]. Zde je přehled hlavních parametrizací:

- Schéma radiačního přenosu v atmosféře je založeno na početně efektivním širokopásmovém modelu pro sluneční a tepelné spektrum. Interakce s oblačností je počítána v každém časovém kroku modelu, což je vhodné pro vysoká rozlišení. Hlavní referencí je práce [10];
- Schéma turbulence využívá prognostickou rovnici pro kinetickou energii turbulence, zahrnující její advekci a rovnováhu mezi jejím vznikem, zánikem a disipací. Pro jednoduchost výpočet koeficientů turbulentní výměny vychází ze stacionárního řešení, viz [7];
- Dynamické účinky nerozlišené orografie jsou stále zahrnuty, i když pro rozlišení 4,7 km již nemají zásadní příspěvek. Schéma je popsáno v práci [5];
- Srážkové procesy rozlišených i subgridových měřítek jsou ošetřeny schématem 3MT (Multi-scale, Modular,





Fig. 1. 72 h precipitation amounts. Observation period starts at 06:00 UTC 29 May, and ends at 06:00 UTC 1 June 2013. Forecasted precipitation amounts correspond to the given forecast lead time, obtained as a sum of 24 h amounts from three model realizations.

Microphysics and Transport), viz [6] a [3]. Toto schéma využívá jednotnou prognostickou mikrofyziku oblačné vody a srážek pro stratiformní i konvekční případy. Hluboká konvekce je též prognostická. Její nejnovější verze parametrizuje tzv. "cold pool effect", upravuje míru vtahování v závislosti na nasycení vzduchu vně oblaku, a spotřeba dostupné konvekční energie je modulována v závislosti na rozlišení;

 Interakce atmosféry s povrchem a biosférou, stejně jako parametrizace procesů zemského povrchu, jsou ošetřeny schématem ISBA, jehož základní popis lze nalézt například v [8].

Počáteční podmínky předpovědi jsou získány technikou spektrálního blendingu 4DVAR analýzy globálního modelu ARPEGE a předběžného pole ve vysokém rozlišení modelu ALADIN, která je popsána například ve [2]. Asimilace přízemních měření pak určuje počáteční podmínku pro schéma zemského povrchu ISBA. V provozní svitě modelu běží na pozadí tzv. asimilační cyklus, který provádí krok asimilace dat každých 6 hodin s maximální čekací dobou na ukončení příjmu pozorování (7 až 8 h po termínu měření). Výsledkem asimilačního cyklu je co nejlepší možný odhad stavu atmosféry. Produkční běh modelu zajišťuje předpověď a její produkty na 54 hodin dopředu. Výpočet jeho počáteční podmínky vychází z posledního předběžného odhadu asimilačního cyklu, ale čas na ukončení příjmu pozorování z důvodu požadavků na včasnou dostupnost předpovědi je kratší (například 2 h a 15 minut po termínu měření pro čas sítě 00:00 UTC).



base 31-05-2013 00 UTC, 30-54h 51° 50 49 12° 13 14 15° 16° 17 18 base 31-05-2013 12 UTC, 18-42h 51° 50 49° 12° 13 14 15° 16° 18° 17

base 01–06–2013 00 UTC, 06–30h 51° 49° 12° 13° 14° 15° 16° 17° 18°

1.0

2.0

4.0

Obr. 2 Odhad množství srážek za 24:00 od 15:00 UTC 1, 6. do 15:00 UTC 2. 6. 2013 kombinací pozorování radarů a dostupných srážkoměrů. Fig. 2. 24 h precipitation amount from 15:00 UTC 1 June to 15:00 UTC 2 June 2013 estimated by the combination of radars and available raingauge observations.

Boční okrajové podmínky jsou přebírány z globálního modelu ARPEGE s tříhodinovou frekvencí. Párování (coupling) modelu ALADIN s globálním modelem ARPEGE je synchronní s maximálním využitím čerstvých informací. Tato volba určuje časy asimilace i produkce předpovědi, které jsou klíčové pro organizaci provozu. Produkční předpověď modelu ALADIN na 54 hodin je počítána čtyřikrát denně





Obr. 3 Pozorovaný 24hodinový úhrn srážek od 06:00 UTC 1. 6. do 06:00 UTC 2. 6. 2013 a jeho předpověď modelem ALADIN pro předstihy předpovědi od +54 h do +30 h.

Fig. 3. 24 h precipitation amount observed from 06:00 UTC 1 June to 06:00 UTC 2 June 2013 and its forecast by the ALADIN model for lead times going from +54 h to +30 h.

0.1

0.3

0.6



base 01-06-2013 00 UTC, 06-54h



base 01-06-2013 12 UTC, 00-42h





Obr. 4 Předpovědi 24hodinového úhrnu srážek modelem ALADIN na období vrcholu srážkové činnosti od 15:00 UTC 1. 6. do 15:00 UTC 2. 6. 2013. Vlevo nahoře je předpověď z 00:00 UTC, vlevo dole je předpověď z 06:00 UTC, a vpravo nahoře je předpověď z 12:00 UTC; jsou to po sobě jdoucí předpovědi z. 1. 6. 2013.

Fig. 4. 24 h precipitation amount forecast by the ALADIN model, for the period of the most intensive precipitation observed between 15:00 UTC 1 June and 15:00 UTC 2 June 2013. Top left: forecast starting at 00:00 UTC, bottom left: 06:00 UTC, top right: 12:00 UTC is a the bottom; these are consecutive forecasts from 1 June 2013.

z analýz v 00:00, 06:00, 12:00 a 18:00 UTC. Kompletní sada produktů je k dispozici přibližně v časech 04:10 UTC, 10:50 UTC, 15:40 UTC a 22:50 UTC.





Obr. 5 Předpovědi 48hodinového úhrnu srážek modelem ALADIN na období od 06:00 UTC 1. 6. do 06:00 UTC 3. 6. 2013 a verifikační pozorování. Vlevo nahoře je předpověď z 00:00 UTC, vpravo nahoře je předpověď z 06:00 UTC, vlevo dole je předpověď z 12:00 UTC; jsou to po sobě jdoucí předpovědi z 1. 6. 2013. Pozorování jsou vpravo dole.

Fig. 5. 48 h precipitation amount forecast by the ALADIN model, for the period between 06:00 UTC 1 June and 06:00 UTC 3 June 2013 and verifying observations. Top left: forecast starting at 00:00 UTC, top right: 06:00 UTC, bottom left: 12:00 UTC; these are consecutive forecast from 1 June 2013. Observations are at the bottom on the right.



Obr. 6 Potenciální vorticita v hladinách 850 hPa (barevná škála) a 300 hPa (isolinie) v kombinaci s vektorem větru v 850 hPa. Vlevo nahoře je předběžné pole asimilačního cyklu modelu ALADIN pro termín 00:00 UTC dne 2. 6. 2013. Vpravo nahoře je výsledná analýza modelu ALADIN. Vlevo uprostřed je analýza globálního modelu ARPEGE, vpravo uprostřed je analýza globálního modelu ECMWF pro tentýž termín. Dole jsou předpovědi modelu ALADIN z 12:00 UTC 1. 6. 2013, vlevo na 12 h (stejný termín jako analýzy), vpravo na 24 h.

Fig. 6. Potential vorticity at levels 850 hPa (color shades) and 300 hPa (isolines) in combination with 850 hPa wind. Top left: ALADIN assimilation cycle first guess for 00:00 UTC 2 June 2013, top right: resulting ALADIN analysis, middle left: global model ARPEGE analysis, middle right: global model ECMWF analysis for the same validity time. Bottom: ALADIN forecast from 12:00 UTC 1 June 2013; left – 12 h forecast (at the same validity time like the analysis), right – 24 h forecast.



Obr. 7 Oblast a orografie modelu ALADIN pro experiment s rozlišením 2,2 km.

Fig. 7. Domain and orography of the ALADIN model for the experiments at 2.2 km resolution.

3. VÝSLEDKY PROVOZNÍ VERZE MODELU ALADIN

Pro vyhodnocení předpovědi srážek je důležité mít k dispozici pokud možno co nejkvalitnější pozorování. Standardně je model ALADIN verifikován proti měřením profesionálních stanic, která jsou zárukou vysoké kvality dat. Pro účely podrobnější verifikace bylo potřeba prostorově hustší sítě, a proto byla zvolena pozorování 24hodinových úhrnů srážek z ověřených meteorologických a klimatologických stanic. Pro výpočet statistik byla data předpovědí i pozorování převedena do jednotné horizontální sítě, s pravidelným krokem v zeměpisných souřadnicích $\Delta \lambda = 0,014^{\circ}$ a $\Delta \phi = 0,009^{\circ}$, odpovídající přibližně rozlišení 1 km. Dostupná hustá pozorování jsou k dispozici pouze na území ČR, takže za účelem porovnání musela být předpovědní pole srážek omezena stejnou maskou státních hranic.

Z hlediska režimu srážkové činnosti a její předpovědi můžeme studované období rozdělit zhruba na tři části. Ve dnech 29. až 31. května měl model ALADIN tendenci srážkové úhrny spíše nadhodnocovat, a to zvláště pro delší předstihy předpovědi. Nejvíce byla nadhodnocena předpověď srážek z analýzy 29. května 00:00 UTC pro severní návětří a vrcholové partie Krušných hor a Krkonoš. Se zkracujícím se předstihem předpovědi však řešení konvergovalo jak z hlediska lokalizace, tak množství úhrnů. Na obr. 1 je znázorněna suma srážek za tyto tři dny spolu se sumou tří 24hodinových úhrnů předpovězených s daným časovým předstihem pro každý ze tří dnů. Obr. 1 není klasickým předpovědním produktem, ale slouží ke znázornění chování modelu. Vidíme tak, že řešení modelu již v hlavních charakteristikách neoscilovalo od předstihu přibližně +36 h.

Nejvydatnější déšť pak nastal během víkendu 1. a 2. června, který způsobil rychlý nástup povodně. Extrémní srážky byly zaznamenány na severních návětřích a hřebenech hor (Krušné hory, Krkonoše, severní návětří Šumavy), ale za pozornost stojí hlavně organizovaný a relativně úzký pás extrémních srážek, táhnoucí se od Šumavy přes střední Čechy až do Krkonoš. V tomto pásu spadlo nejvíce srážek, přesahující úhrny 100 mm za 24 h, od 15:00 UTC 1. června do 15:00 UTC 2. června. Vzhledem k odlišné hodině ohraničení od obvyklého termínu měření v 06:00 UTC máme pro znázornění této sumy srážek k dispozici jiná data. Je to odhad úhrnů srážek pozorovaných radary v kombinaci s provozně dostupnými srážkoměry (obr. 2). Z hlediska předpovědi povodně je důležitý nástup těchto extrémních srážek (verifikační období od 06:00 UTC 1. června do 06:00 UTC 2. června), jejich maximum (od 15:00 UTC 1. června do 15:00 UTC 2. června) a celkový úhrn srážek za dva dny (od 06:00 UTC 1. června do 06:00 UTC 3. června).

- nástup extrémních srážek: model ALADIN předpovídal extrémní srážky pro oblast Krušných hor již od předstihu +54 h (obr. 3). Další vyšší srážkové úhrny byly nejprve předpovídány proti realitě více na východ, na Moravu a pak do oblasti Jeseníků. Lokalizace srážkového pásu táhnoucího se přes střední Čechy začíná být patrná až od předstihu +36 h, ale s podhodnocením maxim do 50 mm za 24 h. Od stejného předstihu pozorujeme zesílení srážek na severních návětřích a hřebenech Krkonoš a Jizerských hor (mezi 50–60 mm za 24 h) a Šumavy (70 mm za 24 h);
- vrchol extrémních srážek v pásu od Šumavy po Krkonoše byl zprvu modelem podhodnocen, ale předpovědi ze 06:00 UTC a 12:00 UTC dne 1. června toto podhodnocení začaly napravovat (obr. 4). Předpověď z 00:00 UTC byla v delších předstizích příliš optimistická, zatímco předpověď ze 06:00 UTC již navýšila úhrny na návětří Krkonoš a také v jižních a středních Čechách. Další běh modelu z 12:00 UTC úhrny dále zesílil, až k maximům kolem 80mm za 24 h v jižních a středních Čechách. V průběhu sobotního dne 1. června tak model ALADIN zřetelně indikoval zhoršení situace ve výhledu na příštích 24 hodin, kdy se předpověděné úhrny blížily extrémním hodnotám;
- celková suma srážek za dva dny z po sobě jdoucích předpovědí (z nichž poslední je předpověď z 1. června ve 12:00 UTC s úhrnem jenom za 42 hodin) ve srovnání s pozorováními je na obr. 5. Zde je také patrné to, jak model s postupujícími realizacemi dokázal podchytit strukturu organizovaného srážkového pásu, byť ještě o něco podhodnocenou, ale již ne výrazně.

Ve dnech 3. a 4. června již docházelo k postupnému ubývání srážek a posunu jejich těžiště na východ území, které model podchytil v předstizích předpovědi +42 h až i +54 h (pro den 4. června).

Jak z předchozího vyplývá, nejkritičtějším obdobím byl víkend 1. a 2. června, a to zejména modelování úzkého pásu extrémních srážek, které je obtížné pro všechny numerické předpovědní modely. Proto se jím budeme dále zabývat. Z pozorování hodinových úhrnů srážek v daném období dále vyplývá, že se organizace srážkového pásu začala utvářet 1. června přibližně ve 20:00 UTC večer a přetrvala do odpoledne 14:00 UTC dalšího dne. Existence této struktury je dále patrná například v po sobě jdoucích analýzách pole potenciální vorticity (PV) v 00:00, 06:00 a 12:00 UTC z 2. června. Na obr. 6 je ilustrace pole PV na hranicích troposféry (hladina 850 hPa jako horní hranice mezní vrstvy a hladina 300 hPa) a jeho anomálií. V analýze modelu ALADIN je patrný pás cyklonální anomálie PV v hladině 850 hPa, překrývající se s propadem tropopauzy, která navíc odpovídá poloze pásu extrémních srážek. Tato struktura již byla přítomna v předběžném poli, které ALADIN vytvořil v asimilačním cyklu, a kde maxima dosahovala hodnot kolem 3 PVU (Potential Vorticity Unit – jednotka 10⁻⁶ m² K kg⁻¹ s⁻¹). Dále jsou zná-



Obr. 8 Předpovědi 24hodinového úhrnu srážek modelem ALADIN v rozlišení 2,2 km na období nástupu extrémní srážkové činnosti od 06:00 UTC 1. 6. do 06:00 UTC 2. 6. 2013. Vlevo nahoře je předpovědní konfigurace P1, vpravo nahoře je konfigurace P2, vlevo dole je konfigurace P3, vpravo dole jsou pozorování.

Fig. 8. 24 h precipitation amount forecast by the ALADIN model at the resolution 2.2 km for the beginning of the extreme precipitation period observed between 06:00 UTC 1 June and 06:00 UTC 2 June 2013. Top left: forecast configuration P1, top right: configuration P2, bottom left: configuration P3, bottom right: observations.

zorněny analýzy globálních modelů ARPEGE a ECMWF, kde jsou však struktury anomálií PV nevýrazné. Anomálie pole PV existují i v produkčních předpovědích modelu ALADIN (na obr. 6 jsou předpovědi na 12:00 a 24:00 z 1. června 12:00 UTC). Podchycení jejich vzniku a doby trvání je spojeno s mírou úspěchu předpovědi zmíněného pásu velmi vydatných až extrémních srážek.

Jiným parametrem, který dokládá existenci stacionárního rozhraní, může být například konvergence přízemního větru, ale ta už je důsledkem existujících výstupných pohybů sekundární ageostrofické cirkulace provázející anomálie PV. Vytvoření pásu anomálie PV na spodní hranici troposféry může souviset s interakcí proudění a orografie (Krkonoše, Jizerské hory), viz například [1]. Je oprávněné se domnívat, že došlo k interakci přízemního pásu PV anomálií se strukturou synoptických měřítek ve vyšších hladinách atmosféry (propad tropopauzy).

4. DODATEČNÉ TESTY PŘEDPOVĚDI EXTRÉMNÍCH SRÁŽEK

Z hlediska podchycení výše zmíněného pásu extrémních srážek je zajímavé zjistit citlivost jeho předpovědi na některý ze základních parametrů modelu. Z obr. 6 například vyplývá, že dynamická struktura počátečního pole (anomálie PV) může mít velký vliv na kvalitu předpovědi. Dalšími vhodnými kandidáty na testy je efekt změny horizontálního rozlišení modelu a přítomnost parametrizace hluboké konvekce. Za tímto účelem byla připravena konfigurace modelu ALADIN na oblasti pokrývající celý alpský oblouk (obr. 7) s rozlišením 2,2 km (709 × 589 bodů). Vertikální rozlišení zůstalo stejné jako u provozního modelu, zato dynamické jádro vzhledem k tomu, že rozlišení 2,2 km již umožňuje popis vln působených vztlakovými silami, přešlo na nehydrostatickou variantu. V tomto vysokém rozlišení byly provedeny celkem tři experimenty z analýz dne 1. června 2013 v 00:00 UTC a také v 06:00 UTC:

- P1: předpověď, kdy je počáteční podmínka modelu získána interpolací analýzy globálního modelu ARPEGE (v konfiguraci 2,2 km nemáme k dispozici vypracovaný vlastní asimilační cyklus, jako je tomu v případě modelu na 4,7 km);
- P2: předpověď, kdy je počáteční podmínka modelu získána interpolací analýzy provozního modelu ALADIN s rozlišením 4,7 km;
- P3: předpověď s počáteční podmínkou získanou interpolací provozního modelu ALADIN jako v předchozím případě, ale bez parametrizace hluboké konvekce.

Výsledky předpovědí z analýzy v 06:00 UTC 1. června 2013 jsou zobrazeny pro období nástupu extrémních srážek



Obr. 9 Frekvenční odchylka vyhodnocená pro předpovědi 24hodinových srážkových úhrnů modelem ALADIN z 06:00 UTC 1. 6. 2013 ve čtyřech konfiguracích. Červeně: provozní konfigurace, žlutě: konfigurace P1, zeleně: konfigurace P2, modře: konfigurace P3.

Fig. 9. Frequency bias computed for 24 h precipitation amounts forecast by the ALADIN model in four different configurations, starting from 06:00 UTC 1 June 2013. Red: operational configuration, yellow: configuration P1, green: configuration P2, blue: configuration P3.



Obr. 10 Fraction skill score vyhodnocené pro prahovou hodnotu 60mm za 24 h srážkových úhrnů a předpovědi modelu ALADIN z 06:00 UTC 1. 6. 2013 ve čtyřech konfiguracích. Červeně: provozní konfigurace, žlutě: konfigurace P1, zeleně: konfigurace P2, modře: konfigurace P3.

Fig. 10. Fraction skill score computed for the threshold 60 mm/24 h of precipitation amounts and ALADIN model forecast in four different configurations, starting from 06:00 UTC 1 June 2013. Red: operational configuration, yellow: configuration P1, green: configuration P2, blue: configuration P3.



Obr. 11 Frekvenční odchylka vyhodnocená pro předpovědi 24hodinových srážkových úhrnů různými modely z 00:00 UTC 1. 6. 2013 (předstih předpovědi +6 h až +30 h). Červeně: provozní konfigurace modelu ALADIN, zeleně: konfigurace P2 modelu ALADIN na 2,2 km, tmavě modře: model DWD/LM, fialově: model ECMWF.

Fig. 11. Frequency bias computed for 24 h precipitation amounts forecast by various models starting from 00:00 UTC 1 June 2013 (forecast lead time +6 h to +30 h). Red: ALADIN model operational configuration, green: ALADIN model configuration P2 at 2.2 km, dark blue: DWD/LM model, violet: ECMWF model.

(prvních 24 h předpovědi, obr. 8), pro které můžeme spočítat některé verifikační statistiky proti pozorováním.

Srovnání předpovědi P1 a P2 jasně ukazuje na roli počáteční podmínky předpovědi. Zatímco P1 umísťuje pás významných srážek příliš na západ (pozn. podobný posun se dal pozorovat také v předpovědích jiných modelů - jako ECMWF a DWD), umístění extrémních srážek v P2 je velmi blízko realitě. Úhrny uprostřed pásu v jižní části dosahují maxim 75 mm za 24 h, v Krkonoších téměř 100 mm za 24 h. Naproti tomu v předpovědi P3 bez parametrizace hluboké konvekce není struktura srážkového pásu zřetelně vybudována a maxima srážek se nacházejí více na západ proti realitě. Můžeme usuzovat, že v rozlišení 2,2 km je stále potřebné parametrizovat nerozlišené výstupné a sestupné pohyby, abychom popsali realističtěji dynamiku konvekčních systémů. Tento test základní citlivosti ukazuje na to, že úspěch nebo neúspěch předpovědi není většinou dílem jedné záležitosti, ale závisí na úspěšné kombinaci více faktorů – zde vidíme důležitost vyššího rozlišení, mezo-měřítkové informace v počáteční podmínce a realistických parametrizacích fyzikálních procesů.

Předpověď P2, která nám poskytla zatím nejlepší výsledky, můžeme porovnat s provozní předpovědí modelu ALADIN nejen vizuálně, ale také pomocí některých statistik aplikovaných na pravidelné jednokilometrové síti. Použijeme zde dvě charakteristiky. První z nich je tzv. frekvenční odchylka, která ukazuje, jak častý byl výskyt předpovězených srážkových úhrnů překračujících zvolená prahová množství proti pozorovaným úhrnům. Zvolili jsme stejnou škálu prahových



Obr. 12 Fraction skill score vyhodnocené pro prahovou hodnotu 60mm za 24hodinových srážkových úhrnů a předpovědi různých modelů z 00:00 UTC 1. 6. 2013 (předstih předpovědi +6 h až +30 h). Červeně: provozní konfigurace modelu ALADIN, zeleně: konfigurace P2 modelu ALADIN na 2,2 km, tmavě modře: model DWD/LM, fialově: model ECMWF.

Fig. 12. Fraction skill score computed for the threshold 60 mm/24 h of precipitation amounts and forecast by various models starting from 00:00 UTC 1 June 2013 (forecast lead time +6 h to +30 h). Red: ALADIN model operational configuration, green: ALADIN model configuration P2 at 2.2 km, dark blue: DWD/LM model, violet: ECMWF model.

hodnot, jakou používáme při znázornění srážkových úhrnů na mapách. Na obr. 9 je znázorněna frekvenční odchylka pro čtyři realizace modelu ALADIN z analýzy v 06:00 UTC 1. června 2013. Je to provozní konfigurace modelu s rozlišením 4,7 km a předpovědi P1, P2 a P3 v rozlišení 2,2 km. Čím blíže je frekvenční odchylka hodnotě jedna, tím je předpověď lepší, ale zároveň je potřeba mít na paměti, že tento ukazatel nevypovídá nic o lokalizaci. Graf ukazuje, že všechny realizace velmi mírně nadhodnocují výskyt úhrnů do 20 mm za 24 h, ale pro vyšší úhrny je jejich výskyt podhodnocen. Výrazné zlepšení představuje již zmíněná úspěšná předpověď P2.

Druhou charakteristikou je tzv. fraction skill score (FSS) podle [9]. Toto skóre ukazuje úspěšnost předpovědi v závislosti na velikosti plochy, pro kterou se záchyt srážek uvažuje. Dá se opět vyčíslit pro různé prahové hodnoty úhrnů. Na obr. 10 vidíme skóre FSS pro úhrn od 60 mm za 24 h opět pro čtyři realizace modelu ALADIN; jedná se tedy o již velmi obtížnou kategorii předpovědi srážek. Zde je zřejmé, že pouze předpověď P2 na rozlišení 2,2 km má užitnou hodnotu pro prostorová měřítka blízká typické velikosti současných definovaných výstupů pro povodí (čtverce o straně 50 až 70 km).

Konečně je zajímavé tyto statistiky porovnat s jinými modely, v našem případě máme materiály z globálního modelu ECMWF a z regionálního modelu DWD (s rozlišením 7 km). Tyto modely nejsou k dispozici z analýzy v 06:00 UTC, takže statistické srovnání můžeme provést pouze pro integrace z analýzy v 00:00 UTC 1. června 2013, pro předpovězené úhrny mezi předstihy +6 h až +30 h. Frekvenční odchylka na obr. 11 ukazuje, že model ECMWF výrazně nadhodnotil úhrny od 40 mm za 24 hodin (tyto úhrny předpověděl pro velkou plochu západní poloviny Čech), zatímco předpověď vyšších úhrnů prakticky chyběla. Naproti tomu model DWD předpověděl nejčetnější výskyt velmi vysokých úhrnů, ale ze skóre FSS na obr. 12 jasně vyplývá, že jejich lokalizace je velmi špatná, kdy se předpověď zlepšuje až pro dost velké uvažované území (model DWD předpověděl nejvyšší úhrny pro Karlovarsko a Chebsko).

5. ZÁVĚR

Kvantitativní předpověď srážek vždy byla a je jednou z nejobtížnějších záležitostí, a to zvláště v případě extrémních situací. V tomto příspěvku jsme ukázali, že předpověď 24hodinových srážkových úhrnů v situaci z konce května a začátku června 2013 vykazovala užitečný předstih předpovědi v rozmezí +36 h až +42 h. Pro extrémní srážky v relativně úzkém pásu od Šumavy přes střední Čechy po Krkonoše o víkendu 1. a 2. června byly však předstihy, indikující možnou extremitu, kratší – až integrace modelu z analýz v 06:00 UTC a 12:00 UTC dne 1. června indikovaly v předstizích +33 h a +27 h zhoršování situace s ohledem na množství srážek a možnost dosažení jejich extrémních hodnot v zasažených lokalitách. Byť jsme provedli hodnocení předpovědí jednoho případu, některé závěry, které z této studie vyplývají, mají obecnou platnost. Vybrané testy citlivosti řešení modelu demonstrovaly známou pravdu zlepšení předpovědi závisí na správné kombinaci více faktorů. Jsou jimi vyšší rozlišení, počáteční podmínka s informací v mezo-měřítku a realismus parametrizovaných fyzikálních procesů. Co se týče kvantitativní předpovědi srážek, schopnosti modelu ALADIN na současné úrovni numerické předpovědi počasí se potvrdily ve srovnání s dalšími dostupnými modely, jak také ukázaly objektivní statistiky. Podle statistiky FSS má model ALADIN potenciál lepší lokalizace silných srážek. Zaznamenali jsme též vazbu předpovědi zmíněného srážkového pásu na předpověď anomálií pole PV. Pokud chceme do budoucna zlepšovat předpověď jevů tohoto typu, je zvýšení rozlišení modelu nutnou podmínkou, samozřejmě spolu se zajištěním kvality analýzy a modelu jako takového.

Poděkování

Naše poděkování patří dr. Anně Valeriánové za pomoc při přípravě pozorování srážek na pravidelné síti pro verifikaci. K současné provozní variantě modelu ALADIN též pomohl výzkum a vývoj podporovaný GA ČR, prostřednictvím projektu P209/11/2405 "Vývoj regionálního klimatického modelu pro velmi vysoké rozlišení" a také podpora projektu COST ES0905 "Basic Concepts for Convection Parameterization in Weather Forecast and Climate Models".

Literatura

- AEBISCHER, U. SCHÄR, C., 1997. Low-Level Potential Vorticity and Cyclogenesis to the Lee of the Alps. J. Atmos. Sci., roč. 55, s. 186–207. ISSN 0022-4928.
- [2] BROŽKOVÁ, R. DERKOVA, M. BELLUŠ, M. FARDA, A., 2006. Atmospheric Forcing by ALADIN/ MFSTEP and MFSTEP oriented Atmospheric tuning. *Ocean Sci.*, roč. 2, s. 113–121. ISSN 1812-0784.
- [3] BROŽKOVÁ, R., 2013. Parametrizace srážkových procesů v modelu ALADIN. *Meteorologické Zprávy*, roč. 66, s. 33–41. ISSN 0026-1173.
- [4] CATRY, B. GELEYN, J.-F. TUDOR, M. BÉNARD, P. – TROJÁKOVÁ, A., 2007. Flux conservative thermodynamic equations in a mass weighted framework. *Tellus*, roč. **59A**, s. 71–79. ISSN 1600-0870.