

Meteorologické zprávy

ROČNÍK
75–2022

3

**69 Verifikace kvantitativních odhadů srážek
v subdenním kroku**

Vojtěch Bližňák – Ondřej Ledvinka – Petr Novák

**81 Vzťahy medzi intenzitou, trvaním a frekvenciou
krátkodobých dažďov určené pomocou bayesovskej
inferencie parametrov GEV rozdelenia**

Milan Onderka – Jozef Pecho – Lukas Bodinger – Svetlana Bičárová – Veronika
Lukasová – Anna Buchholcerová – Pavol Nejedlík

**89 Strukturovaná verifikace předpovědí srážek
produkovaných současnou konfigurací modelu ALADIN-CZ**

Petr Zacharov – Daniela Řezáčová – Radmila Brožková

Meteorological
Bulletin

Český
hydrometeorologický
ústav



69 Verification of quantitative precipitation estimates in a sub-daily step

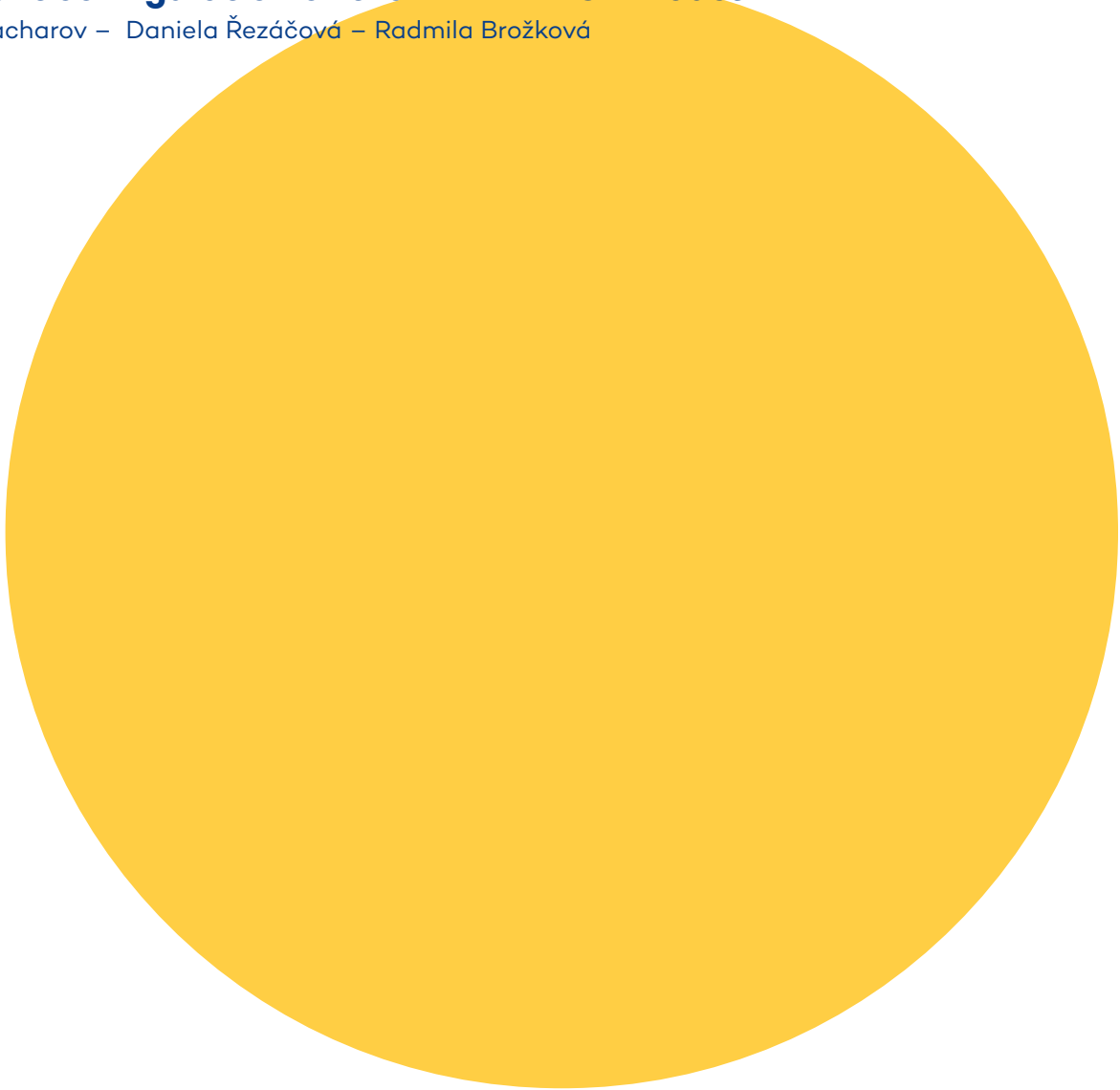
Vojtěch Bližňák – Ondřej Ledvinka – Petr Novák

81 Relationships between intensity, duration and frequency of short-term rains determined by Bayesian inference of GEV distribution parameters

Milan Onderka – Jozef Pecho – Lukas Bodinger – Svetlana Bičárová – Veronika Lukasová – Anna Buchholcerová – Pavol Nejedlík

89 Structured verification of the QPF produced by the current configuration of the ALADIN-CZ model

Petr Zacharov – Daniela Řezáčová – Radmila Brožková



Rozšiřuje – Free booking:

Český hydrometeorologický ústav, tiskové a informační oddělení
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany, tel.: 244 032 722, 244 032 724

Czech Hydrometeorological Institute, Press and Information Department
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4, Czech Republic, Phones: (+420) 244 032 722, (+420) 244 032 724

EDITORIAL

Vážení přátelé Meteorologických zpráv,

dostáváte do rukou další číslo Meteorologických zpráv, tentokrát monotematicky zaměřeného na srážky. Srážky, to je v české meteorologické terminologii souborné označení pro hydro-meteory buď tvořené padajícími srážkovými částicemi, nebo utvářející se na zemském povrchu či různých objektech. Tolik citace z Elektronického meteorologického slovníku doplněná o konstatování, že fulltextové vyhledávání najde srážky v dalších 148 heslech. Srážky jsou zkrátka důležitým, ale i zajímavým meteorologickým prvkem či jevem. Jejich přebytek může být v krajině zodpovědný za povodně a naopak může jejich nedostatek vést k suchu.

Meteorologové a klimatologové studují srážky odnepaměti. Souvislou řadu denních úhrnů srážek máme v Klementinu k dispozici od roku 1804, popis sněhových vloček vydal už Johannes Kepler v roce 1611 a systematickému zpracování srážkových řad se u nás historicky věnovali například Jan Brádka, Stanislav Brandejs, Miloš Nosek nebo František Vítasek. Seznam autorů, kteří se srážkám věnují dnes, by byl téměř nekonečný. Zdaleka nejde jen o statistiky časových řad, dnes se zabýváme měřením a detekcí srážek i oblačnosti, přenosem vlhkosti ve vzduchových hmotách, studujeme změny skupenství vody v atmosféře, předpovídáme množství a intenzitu různých druhů srážek, a dokonce se pokoušíme o projekce srážkových trendů pro další desetiletí. Srážky však nezajímají jen nás, meteorology a klimatology, ale jsou důležitou charakteristikou pro hydrology, zemědělce, lesáky, vodohospodáře a energetiky. Každý z nás potřebuje někdy někam dojet nebo dojet, popřípadě strávit nějaký čas na volném prostranství nebo v přírodě – i k tomu vyhledáváme informace o srážkách aktuálních i budoucích.

Nemělo by nás tedy překvapovat, že Vojtěch Bližňák, Ondřej Ledvina a Petr Novák v prvním článku ověřují (verifikují) vypočtená množství (kvantitativní odhady) hodinových (subdenních) úhrnů srážek, které běžně počítáme z radarových měření. Přepočet radarové odrazivosti na množství srážek není zcela jednoduchý, a v komplexním terénu Česka místy dokonce problematický. Pro návazné aplikace, včetně například předpovědi odtoku za extrémních srážkových situací, je však takový přepočet zcela nepostradatelný. Intenzitě, trvání a frekvenci krátkodobých dešťů se v druhém článku věnují kolegové z několika slovenských pracovišť vedených Milanem Onderkou. V posledních letech se této problematice věnujeme hodně podrobně v souvislosti s probíhající změnou klimatu, která předpokládá výrazný vliv na výskyt extrémních srážek i ve střední Evropě. Málokdo si dokáže dát dohromady možné změny krátkodobých dešťů například s projektováním kanalizací, čističek odpadních vod nebo s obyčejnými parko-



vacími plochami u supermarketů. Kvalitně zpracované podklady od meteorologů jsou zde nepostradatelným vstupem. A v neposlední řadě přinášíme v této srážkové sérii článek Petra Zacharova, Dany Řezáčové a Radmily Brožkové opět o ověřování (verifikaci). Tentokrát ověřujeme srážkové předpovědi z modelu ALADIN. Provozovat vlastní předpovědní model není úplně jednoduché, ale je to jen malý nezbytný krůček k dobré předpovědi počasí, včetně předpovědi srážek. Analýza předpovědaných srážkových polí přináší podněty nejen ke zlepšování samotného modelu, ale i k pochopení modelových produktů, které od nás široká veřejnost dostává.

Jistě můžete mnozí namítnout, že nejen srážky jsou v naší práci důležité. Redakce Meteorologických zpráv je připravena předložit redakční radě ke schválení i jiná, monotematicky zaměřená čísla našeho časopisu. Mezi čtenáři je jistě mnoho kvalitních odborníků, kteří by české a slovenské, odborné i široké, veřejnosti uměli předložit zajímavě napsané články. Najdou se?

RNDr. Radim Tolasz, Ph.D.
šéfredaktor časopisu

Verifikace kvantitativních odhadů srážek v subdenním kroku

Verification of quantitative precipitation estimates in a sub-daily step

Vojtěch Bližňák

Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i.
Oddělení meteorologie
Boční II/1401, 141 00 Praha 4-Spořilov
✉ bliznak@ufa.cas.cz

Ondřej Ledvinka

Český hydrometeorologický ústav
Oddělení hydrofondu a bilanci
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4-Komořany
✉ ondrej.ledvinka@chmi.cz

Petr Novák

Český hydrometeorologický ústav
Oddělení radarové
Generála Šišky 942, 143 00 Praha 12-Kamýk
✉ petr.novak@chmi.cz

An evaluation of radar-derived precipitation estimates adjusted by daily rain gauge measurements in a high temporal and horizontal resolution is presented in the paper. Verification is performed for 1 h precipitation totals with a moving time window of 10 min in six warm (April–October) seasons of the years 2015–2020 using time series from 24 selected meteorological stations in Czechia providing sub-daily precipitation totals. In addition, special attention is paid to the accuracy evaluation of maximum precipitation estimates during extreme precipitation events at selected meteorological stations. The accuracy of precipitation estimates with respect to observations is expressed using various quantitative and categorical skill scores. The accuracy of hourly adjusted precipitation totals depends on factors such as the quality of input (rain gauge and mainly radar) data entering the adjustment procedure and the threshold value of the considered precipitation total. The results show that low hourly precipitation totals (0.1–1 mm) correspond well to the measured values in the majority of cases with high POD and CSI, low FAR scores and the BIAS score close to 1. However, with increasing thresholds (10 mm), precipitation totals are underestimated, and in case of extreme precipitation events this underestimation is around 30% with maxima of up to 50%. The time of occurrence of extreme precipitation event culmination was in most cases in a good agreement with the measurement. In some situations, however, the maximum value of precipitation estimate was shifted by several tens of minutes before or after the measured maximum total.

KLÍČOVÁ SLOVA: adjustace radarových odhadů srážek – Česko – kvantitativní odhady srážek – radar meteorologický – událost srážková

KEYWORDS: adjustment of radar precipitation estimates – Czechia – quantitative precipitation estimates – weather radar – precipitation event

1. Úvod

Plošné kvantitativní odhady srážek využívající kombinaci radarových a srážkoměrných měření jsou klíčovým údajem pro následné meteorologické, klimatologické, hydrologické, ale i environmentální aplikace (Šálek et al. 2006; Münster 2019; Kašpar et al. 2021; Voormansik et al. 2021; Novák et al. 2021). Standardním nástrojem pro měření úhrnů srážek za dané časové období jsou sítě pozemních srážkoměrných stanic. Z hlediska přesnosti stanovení hodnoty srážkového úhrnu představují srážkoměry základní způsob měření srážkových úhrnů a vzhledem k jejich dlouholetému a rozšířenému používání se staly určitým „referenčním etalonem“ v měření srážek. Zde je však potřeba poznamenat, že i srážkoměry jsou zatíženy celou řadou chyb, jejichž rozbořením se zabývala řada prací (např. Lopez et al. 2015; Ma et al. 2015). Jejich hlavní nevýhodou je fakt, že poskytují pouze bodovou informaci, která nemusí a zpravidla není reprezentativní v širším okolí, což do značné míry limituje monitoring úhrnů srážek při konvektivních situacích, které jsou v ploše velmi variabilní. V tomto ohledu jsou velmi přínosná data naměřená meteorologickými radary poskytující mnohem detailnější informaci o prostorovém rozložení srážkových polí, jejichž kvantitativní hodnoty jsou však opět zatíženy řadou chyb (např. Meischner 2004; Michelson et al. 2004; Berne, Krajewski 2013). Z popsaných důvodů se proto přistupuje ke kombinaci obou typů dat formou adjustace radarových měření pomocí úhrnů naměřených na srážkoměrných stanicích, popřípadě pokročilejších kombinačních metod.

V Česku jsou adjustační a kombinační metody vyvíjeny a operativně využívány již více než 20 let (Kráčmar et al. 1999; Sokol 2003; Šálek et al. 2004a; Novák, Kyznarová 2016b) a v zásadě je možné tyto metody rozdělit podle dostupnosti dat do dvou skupin. První z nich využívá pouze off-line (historická) data ze srážkoměrů k odvození parametrů statistického modelu ve vztahu k radarovým měřením. Příkladem této skupiny metod je adjustační metoda vyvinutá na Ústavu fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i. (dále jen ÚFA; Sokol, Řezáčová 2001; Sokol 2003; Zacharov et al. 2004; Bližňák, Sokol, 2008). Druhý typ metod využívá off-line i on-line srážkoměrná data, a to jak pro nastavení statistického modelu, tak i pro jeho vlastní aplikaci. Tento postup je mnohem flexibilnější, protože umožňuje nepřetržitě modifikovat parametry modelu v závislosti na aktuálních datech. Zástupci této kategorie jsou metoda MERGE (Šálek et al. 2004a; Novák, Kyznarová 2013), resp. její modernizovaná

verze MERGE2 (Novák, Kyznarová 2016b), které byly vyvinuty a jsou operativně používány v Českém hydrometeorologickém ústavu (ČHMÚ).

V rámci dílčích aktivit řešených projektů MZe QK1910029 a TA ČR SS01020366 byly připraveny radarové úhrny srážek adjustované metodou ÚFA pro období 2002–2020 v časovém kroku 10 min a horizontálním rozlišení jeden km. Smyslem této práce je zhodnotit jejich přesnost, a to jak v rámci vybraného období 2015–2020 (viz sekce 2), tak především s ohledem na průběh extrémních srážkových událostí, které mohou způsobit významnou hydrologickou odezvu v podobě přívalových povodní a případné eroze. K hodnocení je v této studii využito minutových úhrnů srážek na vybraných 24 meteorologických stanicích.

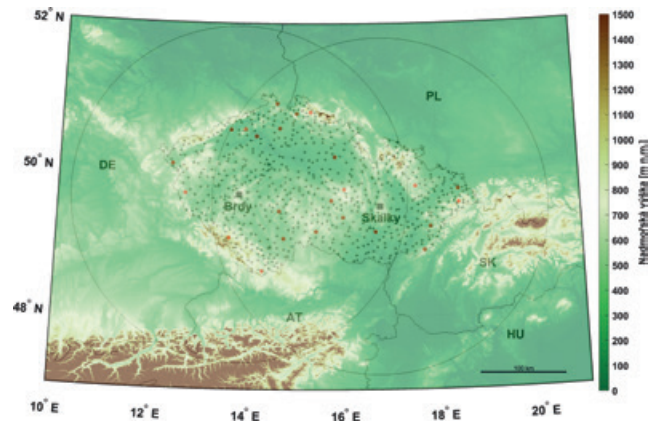
Článek je strukturován do následujících sekcí. Ve druhé části představujeme jednak data použitá pro výpočet adjustovaných úhrnů srážek, jednak data, podle kterých probíhá jejich verifikace, tj. subdenní úhrny srážek na vybraných meteorologických stanicích. Třetí sekce je věnována popisu použité adjustační metody, zatímco popis verifikačních technik aplikovaných na připravená data je uveden v sekci 4. V páté části se zabýváme rozбором a diskuzí vypočtené verifikace srážek a v poslední, šesté sekci je uvedeno celkové shrnutí a závěr.

2. Data

Adjustované radarové úhrny vychází ze dvou základních typů dat – radarových odrazivostí a srážkoměrných měření z šesti teplých sezon (duben–říjen) let 2015–2020. Dané období bylo vybráno především s ohledem na kvalitu radarových dat, která je po modernizaci obou radarů výrazně vyšší (viz níže).

Data radarové odrazivosti byla naměřena dvěma meteorologickými Dopplerovskými radary sítě CZRAD (radary Brdy a Skalky) pracujícími v pásmu C. Radary provádí objemová měření v intervalu 5 min, z nichž jsou vytvářeny a následně slučovány jednotlivé radarové produkty v horizontálním kroku 1 km pro celé území Česka a nejbližší okolí. Pro potřeby radarových odhadů srážek je využíván produkt PseudoCAPPI 2 km (radarová odrazivost v hladině 2 km n. hl. m., detailněji je produkt popsán např. v Novák, Kyznarová (2013)). Poloha obou radarů nad 700 m n. m. zajišťuje, že naměřené radarové odrazivosti nejsou významněji blokovány horskými překážkami (Novák, Kyznarová 2016a). Oba radary spravuje ČHMÚ, který provádí pravidelnou kalibraci, servis a údržbu jak technického, tak softwarového vybavení. Poslední významný upgrade radarové sítě CZRAD proběhl v roce 2015, kdy došlo k výměně za modernější polarimetrické radary (Novák, Kyznarová 2016a) poskytující kvalitnější data s významnou redukcí radarových artefaktů (typicky rušení prostřednictvím RLAN/WiFi nebo zbytkové pozemní odrazy, např. od farem větrných elektráren především v oblasti Krušných hor). Finální radarové produkty jsou výsledkem rutinního postupu zpracování dat zahrnujícího mimo jiné i eliminaci pozemních nemeteorologických cílů (Novák, Kráčmar 2002; Novák, Kyznarová 2016b).

Pozemní síť srážkoměrných stanic pokrývající rovnoměrně oblast Česka (obr. 1) měří denní úhrny srážek od 06:00 UTC do 06:00 UTC následujícího dne. Jejich počet pro každý den zpracovaného období je zobrazen na obr. 2. Rozdíly v počtu použitých srážkoměrných údajů jsou v rámci jednotlivých sezon minimální, a to s minimem 750 stanic a maximem 780



Obr. 1 Rozmístění srážkoměrných stanic použitých pro adjustaci (24hodinové úhrny srážek – černé křížky) a verifikaci (minutové úhrny srážek – červená kolečka) radarových odhadů srážek. Poloha meteorologických radarů Brdy a Skalky je zaznamenána černými čtverci a jejich dosah je znázorněn kružnicemi o poloměru 260 km. Barevné pozadí odpovídá nadmořské výšce (viz legenda).

Fig. 1. Location of rain gauges used for adjustment (24-h precipitation totals – black crosses) and verification (1 min precipitation totals – red circles) of radar-derived precipitation estimates. Location of Brdy and Skalky weather radars is depicted by black squares and their range is marked by circles with a radius of 260 km. Colour background corresponds to altitude (see legend).

stanic (obr. 2). Všechny zpracované údaje ze srážkoměrných stanic byly před zařazením do databáze pečlivě zkontrolovány ČHMÚ.

Pro účely této práce jsme využili hodinové adjustované radarové úhrny s klouzavým časovým oknem 10 min (viz sekce 3.1). Časový krok 1 h se zdá být vhodným kompromisem pro verifikaci subdenních úhrnů srážek. Verifikace kratších časových intervalů (např. 10 min) by s ohledem na časový krok vstupních dat (denní úhrny) mohla být velice problematická. Naopak, použití klouzavého časového okna (10 min) do jisté míry uvolňuje podmínku na přesnou časovou shodu výskytu vysokých hodinových úhrnů. Kromě toho, hodinové úhrny jsou jak v české (Bližňák et al. 2021; Bližňák, Sokol 2011; Novák, Kyznarová 2016b), tak i zahraniční (Gilmore et al. 2016; Lewis et al. 2018) literatuře hojně používány pro verifikaci výskytu extrémních srážkových událostí.

Adjustované radarové úhrny byly verifikovány s využitím dat z 24 automatických srážkoměrů poskytujících minutové úhrny srážek, které byly obdobně akumulovány do 1 h s klouzavým časovým oknem 10 min. Jejich poloha je znázorněna na obr. 1 formou červených bodů a uvedena v tab. 1 spolu s maximálním hodinovým úhrnem, který byl na dané stanici a v daném období (2015–2020) naměřen. Pokud pro tento termín nebyl k dispozici hodinový adjustovaný úhrn (např. z důvodu výpadku radarových měření), pak byl termín nahrazen druhým nejvyšším naměřeným úhrnem pro danou stanici a vybrané období. Z obr. 1 vyplývá, že rozmístění stanic, jejichž data byla využita pro verifikaci, je rovnoměrné s ohledem na celou oblast Česka a také s ohledem na nadmořskou výšku. Zároveň je nutno zdůraznit, že minutové úhrny srážek naměřené vybranými automatickými srážkoměry jsou z pohledu verifikace nezávislé na datech vstupujících do adjustační procedury, která sice využívá data i z vybraných 24 stanic, ale pouze jejich denní (nikoliv subdenní) úhrny.



Obr. 2 Podíl dnů, kdy nebyla splněna podmínka požadovaného množství dostupných radarových měření (blíže viz sekce 3.1) k výpočtu adjustace radarových odhadů srážek v rámci teplých sezon (duben–říjen) let 2015–2020 (sloupcový graf) pro radar Brdy (šedá barva) a Skalky (bílá barva) a počet dostupných srážkoměrů pro každý den použitých pro adjustaci radarových odhadů srážek metodou ÚFA (modrá čára).

Fig. 2. Percentage of days when the condition of the required number of available radar measurements was not met (for more details see Section 3.1) to calculate the adjustment of radar-derived precipitation estimates during warm seasons (April–October) of the years 2015–2020 (bar plot) for radar Brdy (grey colour) and Skalky (white colour), and the number of available daily records from rain gauges used for the adjustment of radar-derived precipitation estimates using the method ÚFA (blue line).

3. Adjustace radarových odhadů srážek

3.1 Výpočet intenzit srážek odvozených z radarových měření

Naměřené radarové odrazivosti v hladině 2 km (produkt PseudoCAPPI 2 km) byly nejprve transformovány na intenzity srážek pomocí standardního Z-R vztahu (Novák, Kyznarová 2013) a následně byla 5minutová měření integrována do 10 minut. Integrační výpočet zahrnoval průměrování tří po sobě jdoucích 5minutových měření, přičemž dvojitá váha byla přiřazena prostřednímu 5minutovému měření. Pokud alespoň jedno ze tří 5minutových měření chybělo, pak byla 10minutovému integrovanému termínu přiřazena chybějící hodnota. Připravené 10minutové radarové odhady srážek byly poté akumulovány od 06:00 UTC do 06:00 UTC následujícího dne tak, aby denní sumy odvozené z radarových měření časově odpovídaly denním úhrnům naměřeným na srážkoměrných stanicích. Dennímu úhrnu odvozenému z radarových měření byla přiřazena chybějící hodnota v případě, kdy chybělo více než 18 hodnot (tj. > 12,5 %) z celkových 144 desetiminutových termínů a tato hodnota nebyla v následujících výpočtech dále uvažována. V případech krátkodobějších výpadků radarů (1–18 desetimi-

Tab. 1 Přehled stanic, podle jejichž měření se prováděla verifikace hodinových úhrnů srážek. Informace o maximálním hodinovém úhrnu srážek je vztažena k verifikovanému období 2015–2020, pro který existuje hodinový adjustovaný úhrn z odpovídajícího pixelu. Zeměpisné souřadnice uvedené v závorce u stanice C2TABO01 jsou platné od 18. 09. 2018, kdy došlo k jejímu přemístění.

Table 1. A list of stations whose measurements were used for the calculation of verification of 1 h precipitation totals. Information on maximum 1 h precipitation is related to the verification period 2015–2020, for which a 1 h adjusted total from a corresponding pixel exists. The geographical coordinates in brackets for C2TABO01 station have been valid since September 18, 2018, when the station was relocated.

ID stanice	Plný název stanice	Zeměpisná šířka [°]	Zeměpisná délka [°]	Nadmořská výška [m n. m.]	Maximální hodinový úhrn srážek [mm]
B1STRN01	Strání	48,9028	17,7078	383	26,2
B1VIZO01	Vizovice	49,2231	17,8436	313	21,8
B2BTUR01	Brno, Tuřany	49,1531	16,6889	241	36,4
B2KMYS01	Kostelní Myslová	49,1592	15,4392	569	35,2
B2VMEZ01	Velké Meziříčí	49,3528	16,0086	452	41,9
C1CHUR01	Churáňov	49,0683	13,6153	1118	27,5
C2TABO01	Tábor	49,4361 (49,41)	14,6603 (14,7098)	459 (467)	34,4
C2TREB01	Třeboň, Lužnice	49,0622	14,7586	428	32,7
C2VBRO01	Vyšší Brod	48,6175	14,3144	559	40,2
H3HRAD01	Hradec Králové, Nový Hradec Králové	50,1778	15,8383	278	20
H3SVRA01	Svratouch	49,735	16,0342	734	21,4
L2PRIM01	Přímda	49,6694	12,6781	743	27,7
L3CHEB01	Cheb	50,0683	12,3914	483	27,9
O1CERV01	Červená	49,7772	17,5419	748	19,0
O1LUCI01	Lučina	49,7308	18,4425	300	27,8
O1LYSA01	Lysá hora	49,5461	18,4475	1322	32,5
P2DESN01	Desná, Souš	50,7894	15,3197	772	30,3
P3PRIB01	Příbyslav, Hřiště	49,5828	15,7625	533	25,4
U1DOKS01	Doksany	50,4589	14,17	158	33,8
U1KOPI01	Kopisty	50,5442	13,6228	240	39,4
U1MILE01	Milešovka	50,555	13,9308	831	18,6
U2DOKY01	Doksy	50,5681	14,6672	284	24,7
U2LIBCO1	Liberec	50,7697	15,0239	398	32,7
U2VARNO1	Varnsdorf	50,9056	14,6022	367	20,6

nutových termínů) byly hodnoty doplněny lineární interpolací mezi 10minutovými úhrny předcházejícími termínu výpadku a následujícími po termínu výpadku. Podíl dnů, kdy nebyla splněna podmínka požadovaného množství dostupných radarových měření v rámci celého zpracovaného období, je znázorněn na obr. 2. Z něho plyne, že nejvyšší podíl dnů, pro které nebyla vypočtena adjustace úhrnů srážek, byl v roce 2015 (16 % pro radar Brdy a 12 % pro radar Skalky), kdy proběhl významný upgrade obou meteorologických radarů (viz sekce 2).

3.2 Popis adjustační metody ÚFA

Adjustační metoda vychází z práce Sokol (2003) a Bližňák et al. (2018) a skládá se ze dvou kroků. Nejprve je celé srážkové pole odvozené z radarových měření vynásobeno konstantou p , která je dána poměrem denní sumy naměřených úhrnů srážek ze všech dostupných stanic a denní sumy radarových odhadů úhrnů srážek z odpovídajících pixelů v termínu od 06:00 do 06:00 UTC následujícího dne podle vzorce:

$$p = \frac{\sum_{k=1}^n G_k + \lambda}{\sum_{k=1}^n R_k + \lambda} \quad (1)$$

kde, $\lambda = 10$, G_k a R_k jsou denní úhrny srážek naměřené na srážkoměrné stanici k , resp. odvozené z radarových měření v pixelu k , kde je srážkoměr instalován, a n je počet všech dostupných srážkoměrů (obr. 1). V případě, že je suma denních úhrnů srážek naměřených na srážkoměrných stanicích menší než 500, pak $p = 1$ a hodnota denní sumy radarového pole se nemění. Kromě toho, hodnota konstanty p je omezena limitními hodnotami 0,3 a 3 tak, aby nedocházelo k nerealisticky nízkým, nebo vysokým korekcím radarového pole (Sokol 2003).

V druhém kroku je takto plošně adjustované denní radarové pole dále adjustováno lokálně v jednotlivých pixelech uvažované domény. Ke každému pixelu je nalezeno 10 nejbližších srážkoměrných stanic, pro které je vypočítána hodnota q představující vážený rozdíl sum z naměřených úhrnů srážek a plošně adjustovaných odhadů (tj. korigovaného radarového pole srážek) z odpovídajících pixelů, přičemž váha w je úměrná vzdálenosti r mezi srážkoměrnou stanicí a uvažovaným pixelem:

$$w = \exp(-\alpha r) \quad (2)$$

kde $\alpha = 0,1$

$$q = \sum_{k=1}^{10} (G_k - R_{adj_k}) w_k \quad (3)$$

kde, R_{adj_k} jsou denní úhrny srážek odvozené z radarových měření a korigované konstantou p v pixelu k , kde je instalován srážkoměr. Hodnota vypočítaného rozdílu je pak přičtena k plošně adjustovanému dennímu úhrnu srážek. Výsledný denní adjustovaný úhrn RA_{24h} je tedy dán vztahem:

$$RA_{24h} = (RR_{24h} \times p) + q \quad (4)$$

kde RR_{24h} je denní úhrn odvozený z radarových měření. Takto získaný denní adjustovaný úhrn srážek je následně rozpočítán

do 10minutových adjustovaných úhrnů srážek RA_{10min} dle 10minutových radarových odhadů RR_{10min} podle vzorce:

$$RA_{10min} = \frac{RA_{24h} \times RR_{10min}}{RR_{24h}} \quad (5)$$

Následnou akumulací 10minutových adjustovaných úhrnů srážek byly vypočítány úhrny za 30 min, 1, 2, 3, 6, 12 a 24 h s klouzavým časovým oknem 10 min.

4. Verifikační metody

Pro posouzení přesnosti adjustovaných radarových úhrnů jsme v této práci využili kvantitativní a kategorické verifikační techniky. Kvantitativní verifikace byla provedena pomocí střední chyby a střední kvadratické chyby, a pro každou časovou řadu byl v místě staničního měření navíc vypočítán i Pearsonův korelační koeficient podle následujících vztahů:

- Průměrná chyba (ME ; z angl. Mean Error)

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i) \quad (6)$$

- Střední kvadratická chyba ($RMSE$; z angl. Root Mean Square Error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2} \quad (7)$$

- Pearsonův korelační koeficient (PCC ; z angl. Pearson's Correlation Coefficient)

$$PCC = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (8)$$

kde N je počet dat, E_i a O_i jsou odhadnuté (dále jen odhad) a naměřené (dále jen měření) hodinové úhrny srážek a $\bar{E}$ a $\bar{O}$ jejich průměry. Obě chybové charakteristiky (tj. ME , $RMSE$) byly s ohledem na proměnlivou velikost průměrného úhrnu v místech vybraných stanic aplikovány i v jejich normované formě podle následujících vztahů:

- Normovaná průměrná chyba ($ME\ NORM$)

$$ME\ NORM = \frac{ME}{\bar{O}} \quad (9)$$

- Normovaná střední kvadratická chyba ($RMSE\ NORM$)

$$RMSE\ NORM = \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad (10)$$

Charakteristiky ME , resp. $ME\ NORM$, mohou nabývat jak kladných, tak záporných hodnot, přičemž kladné hodnoty znamenají nadhodnocení a záporné hodnoty podhodnocení úhrnů srážek a nula znamená přesnou shodu odhadu a měření. Charakteristiky $RMSE$, resp. $RMSE\ NORM$, mohou nabývat pouze kladných hodnot a platí, že čím vyšší hodnota $RMSE$, resp. $RMSE\ NORM$, tím větší je nepřesnost odhadované hodnoty srážkového úhrnu. Hodnoty PCC se pohybují v rozmezí od -1 do $+1$, přičemž -1 znamená nepřímou (antikorelaci) a $+1$ přímou závislost. Hodnota 0 pak vyjadřuje nulovou lineární závislost mezi odhadovanou a naměřenou hodnotou úhrnu srážek.

Kategorické verifikační charakteristiky, vycházející z hodnot v kontingenční tabulce, hodnotí odhadnuté úhrny srážek z různých hledisek. Kontingenční tabulka (tab. 2) je sestavena pro kategorický (ano × ne) odhad události, který je definován jako překročení předem definované prahové hodnoty úhrnu v daném gridovém bodě (Zacharov et al. 2019), přičemž výsledkem mohou být čtyři případy:

- (a) událost byla odhadnuta a nastala,
- (b) událost byla odhadnuta, ale nenastala,
- (c) událost nastala, ale nebyla odhadnuta,
- (d) událost nenastala a nebyla odhadnuta.

Pro účely této práce jsme uvažovali prahové hodnoty 0,1, 1, 5 a 10 mm a následující charakteristiky:

- Pravděpodobnost detekce (*POD*; z angl. Probability of Detection), která je dána vztahem:

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (11)$$

a vyjadřuje poměr správně odhadnutých událostí na celkovém počtu pozorovaných událostí. *POD* může nabývat hodnot od 0 do 1, přičemž 0 znamená nejhorší a 1 nejlepší výsledek.

- Pravděpodobnost chybné detekce (*FAR*; z angl. False Alarm Ratio), která je definována vztahem:

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (12)$$

a vyjadřuje podíl chybně odhadnutých událostí z celkového počtu odhadnutých událostí. Hodnoty *FAR* nabývají stejných hodnot jako *POD* (0 až 1), ale inverzně, tj. 0 představuje správný odhad události ve všech případech, naproti tomu hodnota 1 znamená, že všechny odhady události byly chybné.

- Kritický index úspěšnosti (*CSI*; z angl. Critical Success Index), který je dán vztahem:

$$CSI = \frac{a}{a+b+c} \quad (13)$$

a vyjadřuje podíl všech odhadnutých a/nebo pozorovaných událostí, které byly správně odhadnuty. Index nabývá stejných hodnot jako *POD*.

- Frekvenční bias (*BIAS*), který je dán vztahem:

$$BIAS = \frac{a+b}{a+c} \quad (14)$$

a vyjadřuje poměr počtu odhadnutých a pozorovaných událostí.

Tab. 2 Kontingenční tabulka použitá pro výpočet charakteristik kategorické verifikace.

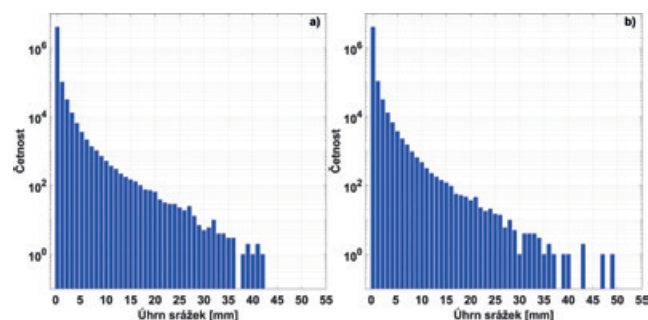
Table 2. Contingency table used for calculation of categorical skill scores.

		Odhad události	
		Ano	Ne
Výskyt události	Ano	a	c
	Ne	b	d

5. Verifikace adjustovaných odhadů srážek

5.1 Verifikace celého období

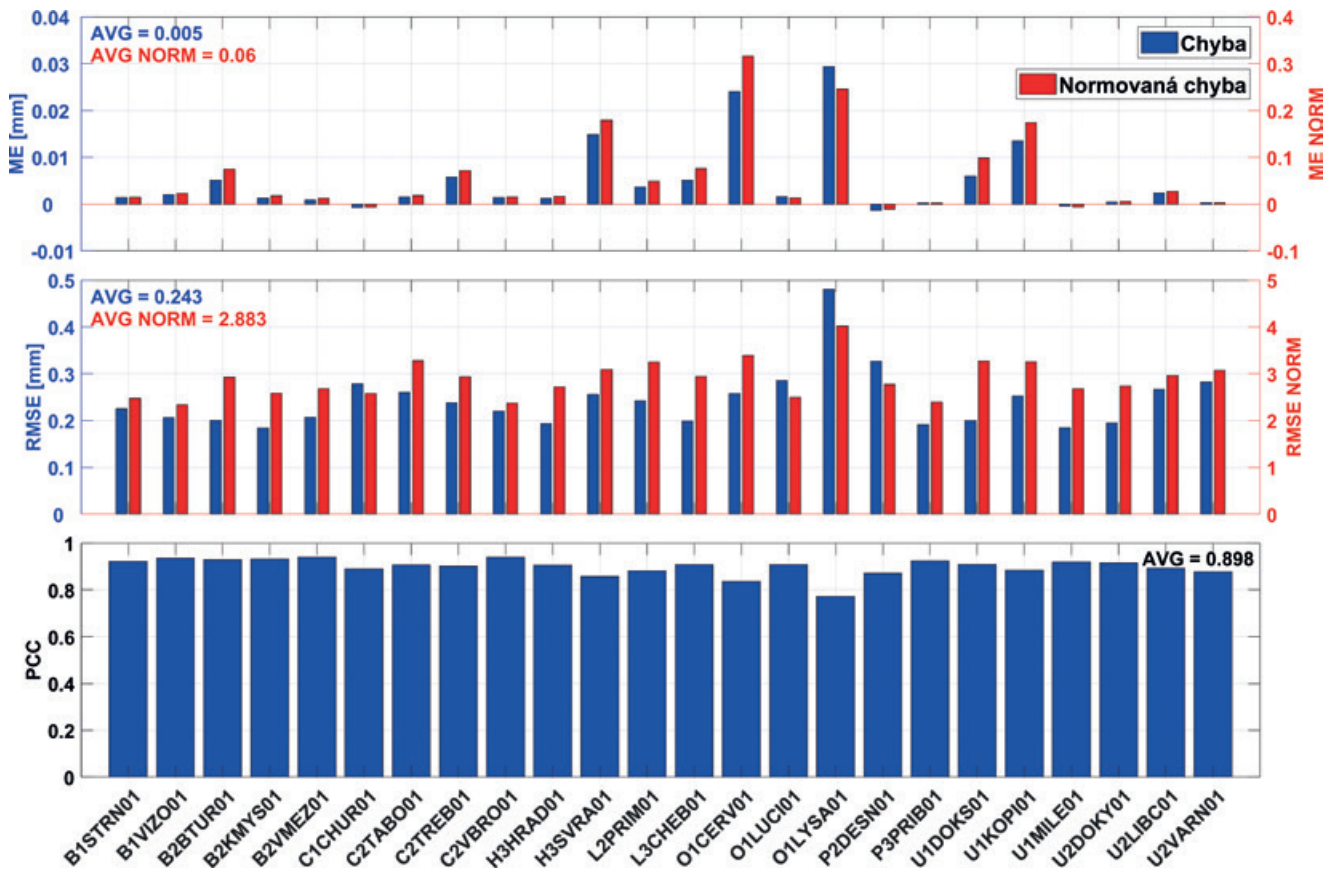
Základní představu o distribuci hodinových adjustovaných radarových úhrnů srážek ve srovnání s naměřenými úhrny za celé verifikované období a pro všechny verifikační stanice dohromady ukazuje obr. 3. Distribuční křivky obou datasetů jsou vykresleny v kroku 1 mm ($\pm 0,5$ mm od 0, 1, 2, ..., 55 mm) a mají velice podobný průběh s malým rozdílem mezi danými četnostmi. Protože vertikální osy obou grafů (obr. 3a, 3b) jsou zobrazeny v logaritmickém měřítku, větší rozdíly jsou patrnější v případech vysokých srážkových úhrnů. Je možno říci, že odhadnuté úhrny sice vykazují vyšší hodnotu absolutního maxima (49 mm) ve srovnání s měřením (41,9 mm), ale naproti tomu frekvence úhrnů v rozmezí 30–40 mm je již velmi blízká naměřeným hodnotám. Četnosti naměřených úhrnů v řádu desítek (tj. 10^1 – 10^2) jsou zastoupeny v kategorii 17–28 mm, naproti tomu odhadnuté úhrny v těchto řádech se pohybují v rozmezí 16–26 mm. Je tedy zřejmé, že uvedené rozdíly vysokých srážkových úhrnů jsou velmi malé, a tedy rozdělení odhadů dobře odpovídá distribuci naměřených hodnot.



Obr. 3 Histogramy četností hodinových úhrnů srážek s klouzavým časovým oknem 10 min naměřených na 24 stanicích určených pro verifikaci (a) a získaných adjustací radarových odhadů srážek podle 24hodinových úhrnů srážek (b).

Fig. 3. Frequency histograms of 1 h precipitation totals with a moving window of 10 min measured by 24 weather stations designated for verification (a) and obtained by adjustment of radar-derived precipitation estimates according to 24 h precipitation totals (b).

Dobrou shodu mezi měřením a odhady rovněž dokládají verifikační charakteristiky porovnávající hodnoty z odpovídajících si termínů měření. Pro úplnost připomínáme, že staniční měření srážek využitá při verifikaci jsou aplikována v subdenním časovém kroku, a jsou tak nezávislá na vstupních datech využívajících denní úhrny. Na obr. 4 jsou znázorněny hodnoty chybových charakteristik *ME* a *RMSE*, resp. jejich normované hodnoty a hodnoty korelačních koeficientů (*PCC*) pro každou stanici zvlášť. V grafech jsou ukázány i průměrné hodnoty přes všechny stanice. Průměrná chyba (*ME*) adjustovaných hodinových úhrnů se pohybuje v rozmezí $-0,001$ – $0,03$ mm, přičemž průměrná hodnota *ME* přes všechny stanice je pouze $0,005$ mm. To jsou hodnoty výrazně nižší, než je rozlišovací schopnost vlastního měření (např. Kněžínková et al. 2010). Hodnoty *RMSE* se pohybují do $0,5$ mm s průměrem přes všechny stanice $0,246$ mm. Největší chyby z pohledu *RMSE* vykazují

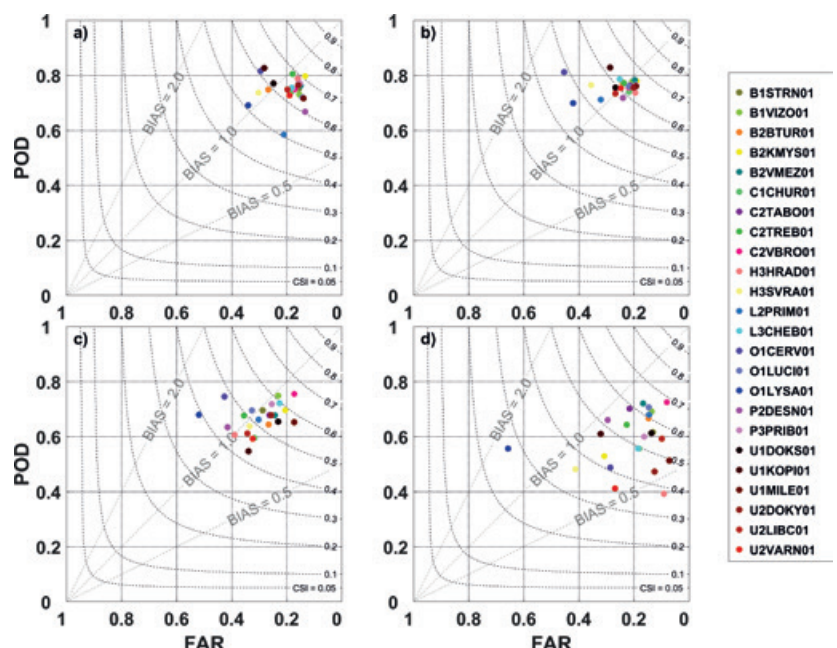


Obr. 4 Výsledky verifikace hodinových adjustovaných radarových úhrnů srážek s klouzavým oknem 10 min pro každou verifikovanou stanici v období 2015–2020. Horní panel ukazuje střední chybu (ME) počítanou jako rozdíl mezi odhadem a měřením, prostřední panel střední kvadratickou chybu (RMSE) a spodní panel korelační koeficient (PCC). Normované hodnoty ME (ME NORM) a RMSE (RMSE NORM) jsou zobrazeny na pravé vertikální ose v horním a prostředním panelu (červená barva). Průměrné hodnoty (AVG) každé verifikované veličiny ze všech stanic jsou uvedeny v levém horním rohu.

Fig. 4. Verification results of 1 h adjusted radar-derived precipitation estimates with a moving window of 10 min for each verified station in the period of 2015–2020. The upper panel shows the mean error (ME) calculated as a difference between estimates and measurements, middle panel shows the root-mean-square error (RMSE) and the bottom panel depicts a correlation coefficient (PCC). Normalized ME (ME NORM) and RMSE (RMSE NORM) are plotted on the right vertical axis in the upper and middle panel (red colour). The averaged values (AVG) of each verified variable derived from all stations are given in the upper left corner.

Obr. 5 Výsledky verifikace hodinových adjustovaných radarových úhrnů srážek s klouzavým oknem 10 min pomocí klasických verifikačních kritérií pro prahy 0,1 mm (a), 1 mm (b), 5 mm (c) a 10 mm (d). Horizontální osa představuje velikost hodnot FAR, vertikální osa pak velikost hodnoty POD. Křivky uvnitř grafů představují velikost hodnot CSI a diagonální přímky ukazují velikost BIAS. Výsledky verifikace pro každou stanici jsou barevně rozlišeny (viz legenda).

Fig. 5. Verification results of 1 h adjusted radar-derived precipitation estimates with a moving window of 10 min using classical verification scores for the thresholds of 0.1 mm (a), 1 mm (b), 5 mm (c) and 10 mm (d). Horizontal and vertical axes represent the magnitude of the FAR and POD values, respectively. The curves inside the plots represent the magnitude of the CSI values, while diagonal lines show the magnitude of BIAS. Verification results are distinguished by colour for each station (see legend).



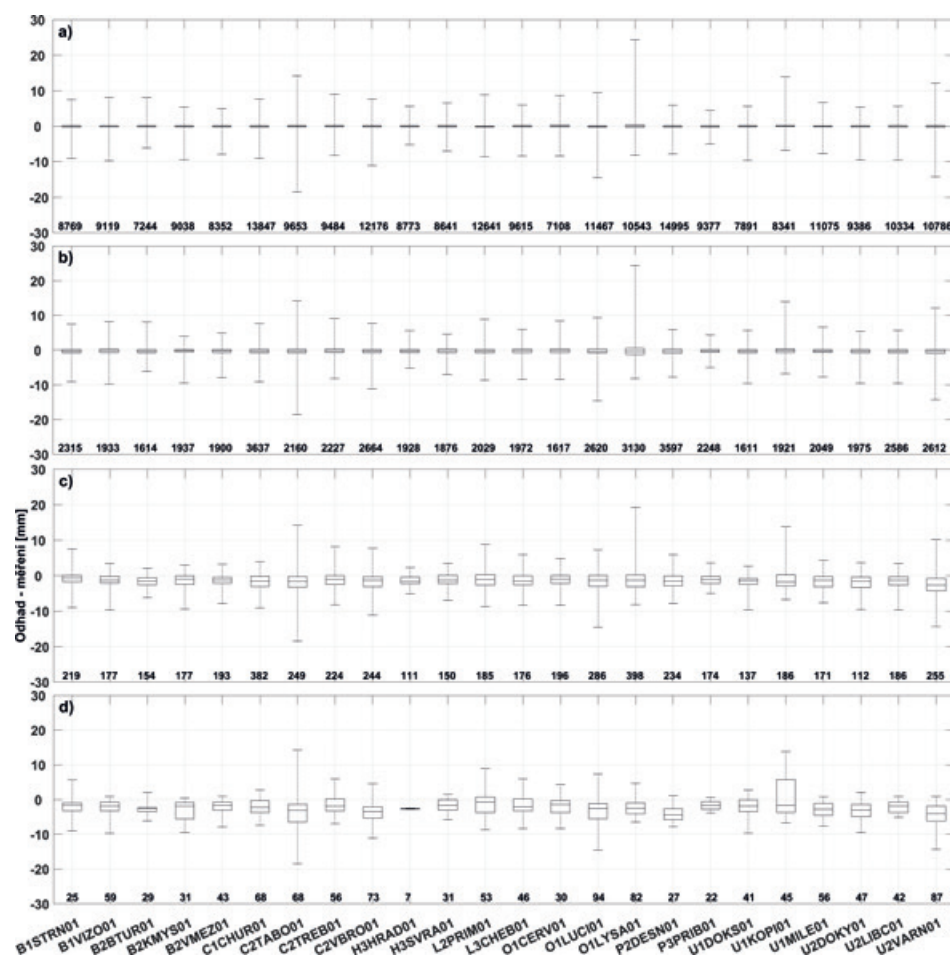
odhady v místech stanic Lysá hora (O1LYSA01; 0,48 mm), Desná, Souš (P2DESN01; 0,33 mm) a Tábor, Náchod (C2TABO01; 0,33 mm) a v případě normovaných chyb *RMSE* pak odhady v místech stanic C2TABO01 (4,12 mm), O1LYSA01 (4,02 mm) a O1CERV01 (3,39 mm). Obdobně tomu je i v případě hodnot *PCC* s nejnižšími hodnotami 0,77 (O1LYSA), 0,84 (O1CERV01) a 0,85 (C2TABO01). Kromě polohy stanice Lysá hora, která je vyloženě horská, se ostatní verifikované pixely s nejnižší přesností odhadů srážek nacházejí spíše v polohách středních v rozmezí 450–800 m n. m. Možným vysvětlením může být skutečnost, že v těchto polohách převažuje výskyt nejvyšších krátkodobých (hodinových) úhrnů srážek, jejichž odhady jsou zatíženy největší chybou (např. Bližňák, Sokol 2008; Bližňák et al. 2018). Naopak jako místa nejpřesnějších odhadů srážek se jeví pixely reprezentující stanice Vizovice (B1VIZO01) a Vyšší Brod (C2VBRO01) s hodnotami *RMSE NORM* 2,33, resp. 2,37 a *PCC* 0,94. Ačkoliv jsme v sekci 2 zmínili, že vhodné umístění meteorologických radarů by mělo redukovat negativní vliv horských překážek na naměřené radarové odrazivosti, není možné zcela vyloučit, že i ty mohou mít za následek některé

chyby, kterými jsou odhadované úhrny zatíženy. Typicky se může jednat o odrazy od nepohyblivých nemeteorologických cílů, částečné blokování radarového paprsku, nebo vertikální variabilitu atmosféry způsobenou například silnými výstupnými pohyby v důsledku orografického zesílení srážek včetně intenzivního nárůstu dešťových kapek v mlze nebo stratifonní oblačnosti (tzv. „low-level growth“; Berne, Krajewski 2013).

Výsledky kategorické verifikace pro dané prahy 0,1, 1, 5 a 10 mm jsou zobrazeny na obr. 5. Barvami jsou odlišeny odhady úhrnů v místech vybraných verifikačních stanic. Pro nízké a střední prahové hodnoty (obr. 5a, 5b a 5c) jsou vypočtené charakteristiky zpravidla lokalizovány v pravém horním kvadrantu, který je charakteristický nízkými hodnotami *FAR*, vysokými hodnotami *POD* a *CSI*. Odhady v tomto kvadrantu tedy představují nejlepší shodu s pozorováním. Zároveň je vidět, že hodnoty frekvenčního biasu se nachází v blízkosti diagonály představující hodnotu 1, což odpovídá naměřeným hodnotám. Přirozeně platí, že se zvyšující se prahovou hodnotou hodinového úhrnu se zvětšují i rozdíly v přesnosti odhadovaných úhrnů srážek. V případě nejvyššího uvažovaného prahu 10 mm

jsou již některé odhady lokalizovány v horní části pravého dolního kvadrantu, který je sice charakteristický nízkou hodnotou *FAR*, ovšem charakteristiky *POD* a *CSI* jsou již nižší než 0,5. Konkrétně se jedná o odhady v místech stanic Hradec Králové (H3HRAD01), Nový Hradec Králové (H3SVRA01), Svatouch (H3SVRA01), Červená (O1CERV01), Doksy (U2DOKY01) a Varnsdorf (U2VARN01). Ve srovnání s naměřenými hodnotami se odhady vysokých srážkových úhrnů jeví jako podhodnocené, což dokládají hodnoty *BIASu* nižší než 1. Znatelně odlišné verifikační charakteristiky pak dávají odhady srážek vyšší než 10 mm v lokalitě Lysá hora, které jsou jako jediné ve srovnání s měřením nadhodnocené. Je však třeba zdůraznit, že většina odhadů vysokých úhrnů srážek je stále lokalizována v pravém horním kvadrantu, což značí vysokou přesnost adjustovaných úhrnů i v případech intenzivních srážek.

Z výše uvedeného tedy vyplývá, že adjustované radarové odhady s nízkou prahovou hodnotou srážkového úhrnu dobře odpovídají naměřeným hodnotám a se zvyšujícím se prahem postupně dochází k celkovému podcenění vysokých úhrnů. Toto tvrzení dokládá i obr. 6 vykreslující krabicové grafy rozdílů odhadnutých a naměřených úhrnů pro každou verifikovanou stanici a daný práh. Střední část (tělo) krabicového grafu je shora ohra-



Obr. 6 Krabicové grafy rozdílů hodinových adjustovaných radarových (odhad) a naměřených (měření) úhrnů srážek s klouzavým časovým oknem 10 min pro každou verifikovanou stanici v období 2015–2020 zvláště pro hodinové úhrny větší nebo rovno 0,1 mm (a), 1 mm (b), 5 mm (c) a 10 mm (d). Čísla pod krabicovými grafy značí počet hodinových úhrnů pro daný práh a stanici.

Fig. 6. Box plots of the difference between 1 h adjusted radar-derived (estimate) and measured (measurement) precipitation totals with a moving time window of 10 min for each verified station in the period 2015–2020 separately for 1 h totals greater than or equal to 0.1 mm (a), 1 mm (b), 5 mm (c) and 10 mm (d). The numbers below the box plots indicate the number of 1 h totals for the given threshold and station.

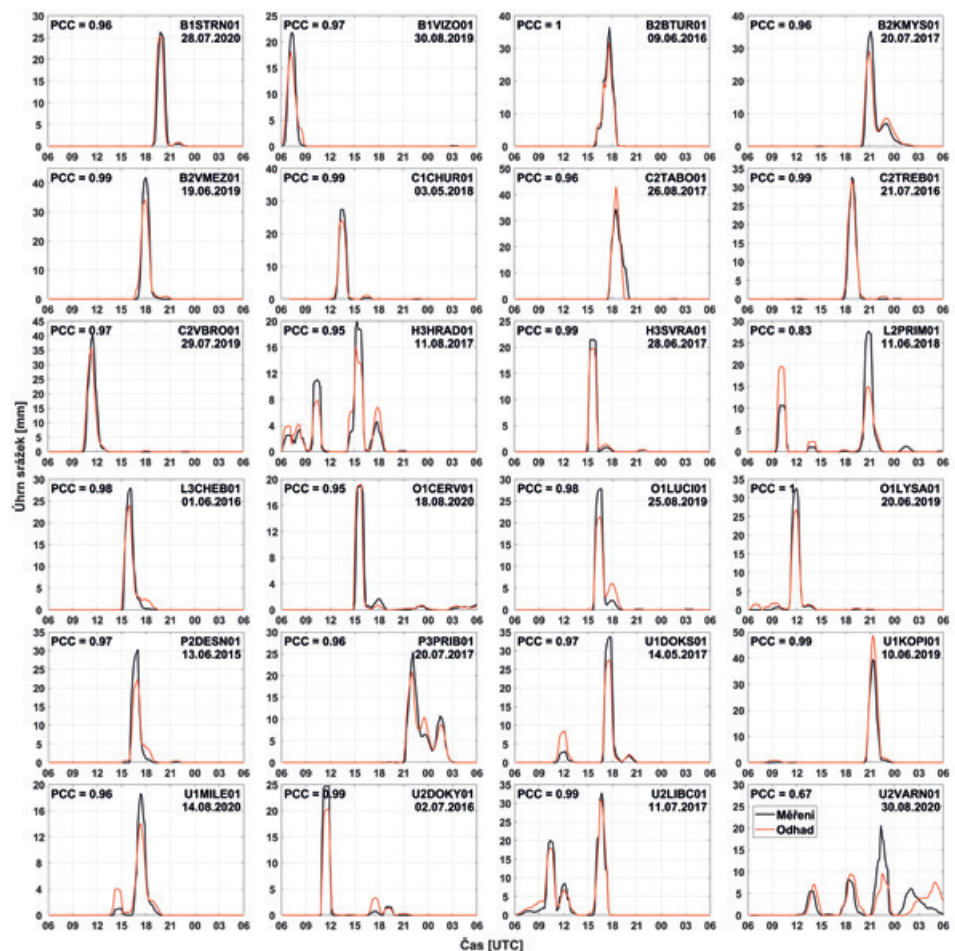
ničena 75. a zespodu 25. percentilem, mezi nimi se nachází linie vymezující medián. „Vousy“ vycházející ze střední části diagramu značí minimální (spodní vous) a maximální (horní vous) hodnotu rozdílu. V dolní části každého grafu je pak pro každou stanici uveden údaj o počtu naměřených hodinových úhrnů spadajících do dané prahové kategorie. Zatímco na obr. 6a uvažujícím úhrny srážek vyšší nebo rovné 0,1 mm se ve všech případech nachází těla grafů kolem hodnoty nula, vysoké hodinové úhrny rovné nebo převyšující 10 mm (obr. 6d) jsou již ve většině případů podceněné. Medián tohoto rozdílu se u většiny stanic pohybuje v rozmezí nula až minus pět milimetrů, přičemž největší rozptýl rozdílu odhadnutých a naměřených úhrnů u všech prahových hodnot je patrný v lokalitě stanice C2TABO01 a kromě nejvyššího prahu 10 mm i O1LYSA01. Důvodem těchto značných rozdílu je typicky časový nesoulad odhadovaných a naměřených klouzavých hodinových úhrnů, které mohou být např. vlivem snosu větru (viz sekce 5.2) časově posunuty i o několik desítek minut. Svou roli zde mohou hrát i situace, kdy v daný den na daném místě docházelo ke střídavému nadhodnocování a podhodnocování radarových odhadů srážek především vlivem výparu, který může množství srážek spadlých na zemský povrch výrazně redukovat (v případě předchozího sucha) ve srovnání s naměřenou radarovou odrazivostí v dané výškové hladině. Přetrvávající srážky mohou naopak nadhodnocování radarových měření utlumit, resp. podhodnocovat. Při adjustační proceduře pak může dojít k zprůměrování odhadovaných úhrnů a přesný čas výskytu významných srážek nemusí odpovídat měření.

I když dosažené výsledky dokazují dobrou přesnost adjustační metody ÚFA, lze předpokládat, že její kvalita bude ve srovnání s metodou MERGE2 nižší, a to především v případech vysokých hodinových úhrnů (Novák, Kyznarová 2016b). Důvodem je fakt, že metoda MERGE2 využívá jako vstupní data srážkoměrná měření z databáze CLIDATA, kde jsou k dispozici 10minutové úhrny srážek v on-line režimu. Pro každou stanici je následně vypočten hodinový úhrn s klouzavým časovým oknem 10 min, který vstupuje do adjustační procedury. Tím je zajištěna vysoká kvalita kvantitativních odhadů srážek v subdenním kroku i pro vysoké úhrny v místech stanic a jejich nejbližším okolí. Naproti tomu výhoda adjustační metody ÚFA (pro experimentální účely) spočívá v tom, že nevyžaduje dostupnost srážkoměrných měření v on-line režimu, čímž je možné

využít hustší síť srážkoměrných stanic poskytujících pouze denní úhrny.

5.2 Verifikace extrémních událostí

Jedním z cílů této práce je rovněž posouzení schopnosti adjustační metody odhadnout vysoké hodinové úhrny srážek v průběhu vybraných extrémních srážkových událostí. Z tohoto důvodu byl pro každou stanici vybrán nejvyšší naměřený hodinový úhrn za celé verifikované období (viz tab. 1), přičemž daná událost byla porovnána s adjustovanými radarovými odhady srážek (obr. 7). Pokud pro událost nebyl k dispozici odpovídající hodinový adjustovaný úhrn, pak byla daná událost nahrazena událostí s druhým nejvyšším naměřeným úhrnem. Pro každou událost byl následně vypočten korelační koeficient mezi měřením a odhadem za celých 24 hodin, v rámci kterých příslušný denní úhrn vstupoval do adjustační procedury (tj. 06:00–06:00 UTC následujícího dne).



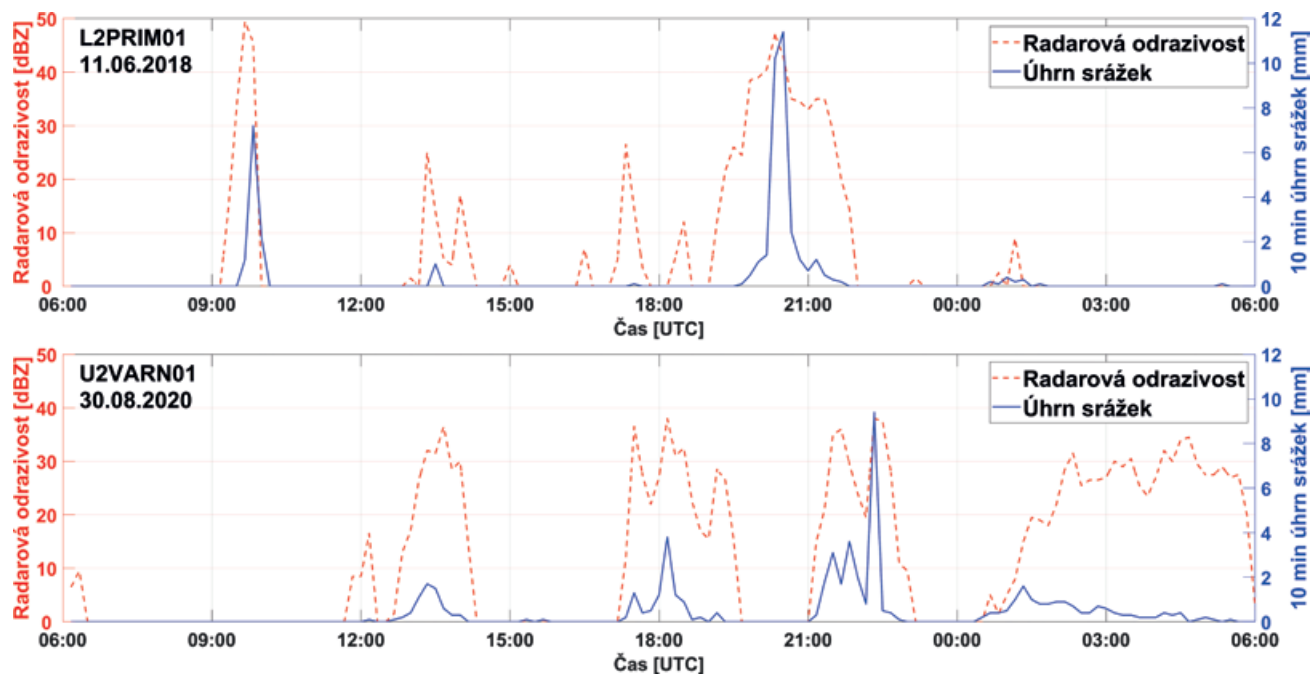
Obr. 7 Časový průběh maximálních hodinových úhrnů srážek s klouzavým časovým oknem 10 min pro každou verifikovanou stanici. Naměřený hodinový úhrn je znázorněn černou čarou, červená čára představuje hodinový adjustovaný úhrn v odpovídajícím pixelu, kde je srážkoměr instalován. Indikativ stanice a datum výskytu maximálního hodinového úhrnu jsou uvedeny v pravém horním rohu. Korelace mezi naměřeným a odhadnutým úhrnem pro každou událost je uvedena v levém horním rohu.

Fig. 7. Temporal course of maximum 1 h precipitation totals with a moving window of 10 min for each verified station. The measured 1 h total is depicted by the black line, the red line shows the 1 h adjusted precipitation estimate in the pixel where the rain gauge is located. The station ID and the date of the maximum 1 h total occurrence are given in the upper right corner. Correlation between measured and estimated precipitation total for each event is given in the upper left corner.

Z obr. 7 vyplývá, že hodnoty úhrnů srážek spojených s výskytem extrémních srážkových událostí na všech 24 stanicích byly téměř perfektně odhadnuty. Ve 22 případech byla hodnota korelačního koeficientu vyšší nebo rovna 0,95 a pouze u dvou událostí byla tato hodnota nižší (0,83 a 0,67). Pro obě tyto srážkové epizody je charakteristický výskyt více srážkových „vln“ jdoucích po sobě, přičemž hodnoty odhadovaných maximálních úhrnů jsou o přibližně 50 % podhodnocené ve srovnání s naměřenými hodnotami. V prvním případě se jedná o událost z 11. června 2018 na stanici Přimda (L2PRIM01). V souvislosti s přechodem zvltněné studené fronty přes jihozápadní oblast Čech se v tento den vyskytla řada konvektivních bouří, které byly kromě vysokých srážkových úhrnů doprovázeny i silným krupobitím (www.eswd.eu). Uvedená situace je charakteristická dvěma výraznými „vlnami“. První z nich souvisí s přechodem izolované konvektivní buňky v dopoledních hodinách (09:30–10:00 UTC), která však vyprodukovala výrazně nižší úhrny srážek (10,6 mm) ve srovnání s přechodem hlavního bouřkového systému v čase 19:30–22:00 UTC, kdy maximální hodinový úhrn dosáhl hodnoty 27,7 mm. Obdobná situace nastala i 30. srpna 2020 na stanici Varnsdorf (U2VARN01), kdy přes území Česka přecházela vlnící se studená fronta, která způsobila, že na mnoha místech vypadávaly intenzivní srážky opakovaně nad stejným místem. V případě stanice Varnsdorf byly pozorovány celkem čtyři „vlny“ vyšších úhrnů srážek. Odhady prvních dvou „vln“ odpovídají velice dobře naměřeným hodnotám, ovšem nejvyšší naměřený hodinový úhrn 20,6 mm byl podhodnocen o více než 50 %. V obou případech došlo k situaci, kdy radar nedokázal odlišit extrém-

nost dílčích „vln“, přičemž maximální hodnota odrazivosti byla mezi jednotlivými vlnami srovnatelná (obr. 8).

Potenciální příčinu uvedených rozdílností je možné rovněž hledat v tzv. snosu srážek větrem, který způsobuje, že odrazivosti detekované radarem v určité hladině nad zemským povrchem (v případě této studie 2 km) mohou být ve srovnání s naměřenými srážkami na zemském povrchu posunuty, přičemž míra tohoto posunu je závislá na několika faktorech. Především je to velikost horizontálního rozlišení radarových měření, a to tak, že se vzrůstajícím horizontálním rozlišením se tato chyba zvětšuje. Druhým faktorem je pak výška použitého radarového produktu, přičemž obecně platí, že čím je hladina nad zemským povrchem nižší, tím je efekt snosu větru menší v důsledku kratší doby pádu srážek k zemskému povrchu. S tím souvisí i topografie terénu pod místem radarového měření, kdy například hlubší údolí mohou uvedenou chybu umocnit (Lack, Fox 2007). Značným zdrojem nejistoty radarových odhadů srážek se ukazuje být i předpoklad linearit vertikálního profilu větru, jelikož zvýšená rychlost větru v přízemních hladinách může padající srážky významně posunout (Sandford 2015). Alternativním vysvětlením nesouladu naměřených a odhadnutých úhrnů pak může být i přítomnost silného sestupného proudu v konvektivních bouřích, který u zemského povrchu diverguje, přičemž oblast zasažená srážkami nacházející se níže, než je nejnižší elevace radarového paprsku, se zvětšuje (Šálek et al. 2004b). Kromě toho se zde může projevovat i efekt proměnlivého nad/podhodnocení během dané srážkové události (viz sekce 5.1).



Obr. 8 Časový průběh srážkové události ze dne 11. června 2018 na stanici Přimda (L2PRIM01; horní panel) a 30. srpna 2020 na stanici Varnsdorf (U2VARN01, spodní panel). Modrou plnou čarou je znázorněn 10minutový úhrn srážek naměřený automatickým srážkoměrem a červená čárkovaná čára představuje radarovou odrazivost naměřenou českou radarovou sítí CZRAD (produkt CAPPI 2 km) v odpovídajícím pixelu.

Fig. 8. Temporal course of the precipitation event of June 11, 2018 at the station Přimda (L2PRIM01; top panel) and August 30, 2020 at the station Varnsdorf (U2VARN01, bottom panel). The blue solid line shows the 10 min precipitation total measured by the automatic rain gauge and the red dashed line represents the radar reflectivity measured by the Czech radar network CZRAD (product CAPPI 2 km) in the corresponding pixel.

Kromě již diskutovaných situací na stanicích L2PRIM01 a U2VARN01 se z kvantitativního hlediska odhady maximálních úhrnů v místech vybraných stanic liší do 30 % od měření a v přibližně 3/4 případů je hodnota tohoto rozdílu do 20 %. Obdobně jako v sekci 5.1, tak i v případě pouze vybraných extrémních srážkových událostí převažuje podcenění maximálních hodnot srážkových úhrnů. Pouze ve třech případech byla hodnota odhadu hodinového úhrnu v rámci dané události (bez ohledu na čas výskytu) vyšší než v případě měření, z toho u jedné události (na stanici O1CERV01) se jedná o zanedbatelný rozdíl (1 %). Nejvyšší přecenění (25 %) můžeme pozorovat 26. srpna 2017 na stanici Tábor (C2TABO01), což je situace spojená s přechodem izolované konvektivní buňky nevelkého plošného rozsahu. Zde je však třeba vyzdvihnout, že maximální hodnoty naměřeného (34,4 mm) i odhadnutého (43,0 mm) hodinového úhrnu byly zaznamenány ve shodném čase 17:30–18:30 UTC. Od 18:40 UTC dále již však radar žádnou odrazivost nenaměřil, přičemž srážkoměr ukazuje poměrně vysoké hodnoty úhrnů až do 19:10 UTC, což může být dáno již zmíněnými faktory snosu větru, příp. divergencí proudění u zemského povrchu. Obdobnou míru nadhodnocení (23 %) můžeme pozorovat i u události z 10. června 2019 na stanici Kopisty (U1KOPI01), kdy rovněž došlo k časové shodě naměřeného (39,4 mm) a odhadnutého (48,7 mm) maximálního hodinového úhrnu v termínu 20:20–21:20 UTC.

6. Shrnutí a závěr

Práce se zabývá hodnocením přesnosti radarových odhadů srážek adjustovaných metodou ÚFA s využitím 24 vybraných meteorologických stanic na území Česka poskytujících minutové úhrny srážek. Verifikace je provedena pro hodinové odhady srážkových úhrnů s klouzavým časovým oknem 10 min ve vybraném období šesti teplých sezon (duben–říjen) let 2015–2020. Zvláštní pozornost je pak věnována hodnocení přesnosti odhadů maximálních srážek během extrémních srážkových událostí v místech vybraných meteorologických stanic.

Výsledky ukazují, že přesnost hodinových adjustovaných odhadů úhrnů srážek závisí na několika faktorech. Především je to kvalita vstupních dat, a to jak radarových, tak srážkoměrných měření. Jelikož radarová měření odrazivosti jsou pro adjustační metodu ÚFA jediným zdrojem informace o subdenním rozložení srážek, přesnost určení času výskytu příslušné radarové odrazivosti je pro korektní hodnotu kvantitativního odhadu stěžejní. Dalším důležitým faktorem je pak prahová hodnota uvažovaného srážkového úhrnu související s extremitou srážek. Obecně platí, že kvalita odhadů subdenních úhrnů srážek klesá s rostoucí extremitou dané události, resp. se zvyšující se prahovou hodnotou úhrnu (Bližňák et al. 2018; Panziera et al. 2018). Hodinové úhrny srážek s nízkou a střední prahovou hodnotou (0,1–5 mm) vykazovaly na většině stanic dobrou shodu s naměřenými úhrny z pohledu různých verifikačních technik (tj. kvantitativní i kategorické metody). Se vzrůstající prahovou hodnotou (10 mm) dochází častěji k situacím, kdy velikost úhrnu srážek není správně odhadnutá a naopak je odhadnutá v místě, kde nebyla naměřena. To může být způsobeno vlivem větru, který je schopen padající srážky snést i o několik kilometrů vzhledem k místu detekce radarem v určité hladině nad zemským povrchem, popř. i vlivy výstupných a sestupných proudů v silnějších konvektivních systémech. Celkově navíc dochází se zvyšujícím se prahem k podcenění

úhrnů, přičemž toto podcenění se u extrémních srážkových událostí pohybuje zpravidla do 20 %, ve velmi mimořádných případech do 50 %. Čas výskytu kulminace extrémních srážkových událostí byl u téměř všech posuzovaných situací shodný s měřením. Odchyly časů maximálních odhadnutých a naměřených úhrnů byly vzácné a pohybovaly se v řádech desítek minut. Možná příčina podcenění vysokých úhrnů srážek spolu s případným časovým posunem jejich kulminace může být částečně způsobena i výskytem stanice (resp. příslušného gridového bodu) na okraji konvektivní bouře, kdy radarová odrazivost v určité výškové hladině vykazuje již vyšší hodnoty, ovšem srážky ještě nedopadly na zemský povrch.

S ohledem na prostorovou i časovou variabilitu extrémních srážkových úhrnů je možné považovat připravené adjustované odhady úhrnů srážek za velmi kvalitní. Ve srovnání s metodou MERGE2 operativně používanou v ČHMÚ existuje předpoklad, že jejich přesnost v místech srážkoměrných stanic vstupujících do adjustační procedury bude nižší, protože metoda MERGE2 využívá jako vstupní data hodinové úhrny srážek v on-line režimu. Tím, že metoda ÚFA využívá hustší síť srážkoměrných stanic měřících denní úhrny, se dá předpokládat, že úhrny adjustované metodou ÚFA budou více odpovídat měření v místech, kde MERGE2 nemá k dispozici dostatečný počet stanic poskytujících subdenní úhrny srážek. To je obzvláště přínosné například pro následné klimatologické aplikace využívající několikaleté časové řady úhrnů srážek ze stanic, jejichž počet se v průběhu let, kdy jsou v Česku provozovány meteorologické radary, liší minimálně (Bližňák et al. 2018). V současné době máme již k dispozici 20letou časovou řadu adjustovaných radarových odhadů úhrnů ve vysokém prostorovém i časovém rozlišení, jejíž zpracování značnou měrou přispěje ke zpřesnění radarové klimatologie srážek Česka.

Poděkování:

Tato práce vznikla za finanční podpory Technologické agentury ČR, projekt SS01020366 a projekt SS02030040, a Ministerstva zemědělství, projekt QK1910029. Autoři článku taktéž děkují dr. Z. Sokolovi za poskytnutí adjustační procedury.

Literatura:

- BERNE, A., KRAJEWSKI, W. F., 2013. Radar for hydrology: unfulfilled promise or unrecognized potential? *Advances in Water Resources*, Vol. **51**, s. 357–366. ISSN 0309-1708. Dostupné z: doi:10.1016/j.advwatres.2012.05.005.
- BLIŽŇÁK, V., SOKOL, Z., 2008. Plošné rozložení krátkodobých srážek na území České republiky s využitím meteorologických radarů. *Meteorologické zprávy*, roč. **61**, č. 6, s. 176–184. ISSN 0026-1173.
- BLIŽŇÁK, V., SOKOL, Z., 2011. Využití dat z meteorologické geostacionární družice Meteosat Second Generation k odhadu srážek ze silných konvektivních bouří. *Meteorologické zprávy*, roč. **64**, č. 2, s. 43–51. ISSN 0026-1173.
- BLIŽŇÁK, V., KAŠPAR, M., MÜLLER, M., 2018. Radar-based summer precipitation climatology of the Czech Republic. *International Journal of Climatology*, Vol. **38**, s. 677–691. ISSN 1097-0088. Dostupné z: doi:10.1002/joc.5202.
- BLIŽŇÁK, V., KAŠPAR, M., MÜLLER, M., ZACHAROV, P., 2021. Analysis and verification of reconstructed historical extreme precipitation events in an hourly resolution. *Atmospheric Research*, Vol. **249**, 105309. ISSN 0169-8095. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosres.2020.105309.

- ESWD (European Severe Weather Database) [online]: Evropská databáze silných bouří, ESSL [cit 11.03.2022]. Dostupné z: <http://eswd.eu>.
- GILMORE, J. B., EVANS, J. P., SHERWOOD, S. C., EKSTRÖM, M., JI, F., 2016. Extreme precipitation in WRF during the Newcastle East Coast Low of 2007. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. **125**, s. 809–827. ISSN 1434-4483. Dostupné z: doi:10.1007/s00704-015-1551-6.
- KÁŠPAR, M., BLIŽŇÁK, V., HULEC, F., MÜLLER, M., 2021. High-resolution spatial analysis of the variability in the subdaily rainfall time structure. *Atmospheric Research*, Vol. **248**, 105202. ISSN 0169-8095. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosres.2020.105202.
- KNĚŽINKOVÁ, B., BRÁZDIL, R., ŠTĚPÁNEK, P., 2010. Porovnání měření srážek srážkoměrem METRA 886 a automatickým člunkovým srážkoměrem MR3H ve staniční síti Českého hydrometeorologického ústavu. *Meteorologické zprávy*, roč. **63**, č. 5, s. 147–155. ISSN 0026-1173.
- KRÁČMAR, J., JOSS, J., NOVÁK, P., HAVRÁNEK, P., ŠÁLEK, M., 1999. First steps towards quantitative usage of data from Czech weather radar network. In: COST 75 Advanced weather radar systems. [Sborník ze semináře]. Locarno, s. 91–101.
- LACK, S. A., FOX, N. I., 2007. An examination of the effect of wind-drift on radar-derived surface rainfall estimations. *Atmospheric Research*, Vol. **85**, s. 217–229. ISSN 0169-8095. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosres.2006.09.010.
- LEWIS, E., QUINN, N., BLENKINSOP, S., FOWLER, H. J., FREER, J. et al., 2018. A rule based quality control method for hourly rainfall data and a 1 km resolution gridded hourly rainfall dataset for Great Britain: CEH-GEAR1hr. *Journal of Hydrology*, Vol. **564**, s. 930–943. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2018.07.034.
- LOPEZ, G., WENNERSTRÖM, H., NORDÉN, L. A., SEIBERT, J., 2015. Location and density of rain gauges for the estimation of spatial varying precipitation. *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography*, Vol. **97**, s. 167–179. ISSN 1468-0459. Dostupné z: doi:10.1111/geoa.12094.
- MA, Y., ZHANG, Y., YANG, D., FARHAN, S. B., 2015. Precipitation bias variability versus various gauges under different climatic conditions over the Third Pole Environment (TPE) region. *International Journal of Climatology*, Vol. **35**, s. 1201–1211. ISSN 1097-0088. Dostupné z: doi:10.1002/joc.4045.
- MEISCHNER, P., 2004. Weather Radar: Principles and Advanced Applications. Berlin: Springer-Verlag, 337 s.
- MICHELSON, D., EINFALT, T., HOLLEMAN, I., GJERTSEN, U., FRIEDRICH, K. et al., 2004. Weather Radar Data Quality in Europe: Quality Control and Characterization. COST-717 working document WDF_MC_200403_1. ISBN 92-898-0018-6.
- MÜNSTER, P., 2019. Možnost využití radarových produktů pro hodnocení eroze zemědělské půdy. *Meteorologické zprávy*, roč. **72**, č. 2, s. 33–39. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., KRÁČMAR, J., 2002. New data processing in the Czech weather radar network. In: *ERAD Publication Series*, Vol. **1**, s. 328–330. ISBN 3-936586-04-7.
- NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2013. Využití radarových měření pro kvantitativní odhady a nowcasting srážek v Českém hydrometeorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*, roč. **66**, č. 6, s. 175–181. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2016a. Obnova meteorologické radarové sítě CZRAD v roce 2015. *Meteorologické zprávy*, roč. **69**, č. 1, s. 17–24. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., 2016b. MERGE2 – modernizovaný systém kvantitativních odhadů srážek provozovaný v Českém hydrometeorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*, roč. **69**, č. 5, s. 137–144. ISSN 0026-1173.
- NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., PECHA, M., ŠERCL, P., SVOBODA, V. et al., 2021. Utilization of Weather Radar Data for the Flash Flood Indicator Application in the Czech Republic. *Remote Sensing*, Vol. **2021**, No. 13, Article No. 3184. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs13163184.
- PANZIERA, L., GABELLA, M., GERMANN, U., MARTIUS, O., 2018. A 12-year radar-based climatology of daily and sub-daily extreme precipitation over the Swiss Alps. *International Journal of Climatology*, Vol. **38**, s. 3749–3769. ISSN 1097-0088. Dostupné z: doi:10.1002/joc.5528.
- SANDFORD, C., 2015. Correcting for wind drift in high resolution radar rainfall products: a feasibility study. *Journal of Hydrology*, Vol. **531**, s. 284–295. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhydrol.2015.03.023.
- SOKOL, Z., ŘEZÁČOVÁ, D., 2001. Statistická korekce denních srážkových úhrnů stanovených radarem s využitím klasifikované regrese. *Meteorologické zprávy*, roč. **54**, č. 2., s. 46–56. ISSN 0026-1173.
- SOKOL, Z., 2003. The use of radar and gauge measurements to estimate areal precipitation for several Czech river basins. *Studia Geophysica et Geodaetica*, Vol. **47**, s. 587–604. ISSN 0039-3169. Dostupné z: doi:10.1023/A:1024715702575.
- ŠÁLEK, M., BŘEZKOVÁ, L., NOVÁK, P., 2006. The use of radar in hydrological modeling in the Czech Republic – case studies of flash floods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **6**, s. 229–236. ISSN 1684-9981. Dostupné z: doi:10.5194/nhess-6-229-2006.
- ŠÁLEK, M., NOVÁK, P., SEO, D. J., 2004a. Operational application of combined radar and raingauges precipitation estimation at the CHMI. In: *ERAD Publication Series*, Vol. **2**, s. 16–20.
- ŠÁLEK, M., CHEZE, J.-L., HANDWERKER, J., DELOBBE, L., UIJLENHOET, R., 2004b. Radar techniques for identifying precipitation type and estimating quantity of precipitation. Doc. COST Action 717, WG 1 Task WG 1-, 1–51.
- VOORMANSIK, T., CREMONINI, R., POST, P., MOISSEEV, D., 2021. Evaluation of the dual-polarization weather radar quantitative precipitation estimation using long-term datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. **25**, s. 1245–1258. ISSN 1027-5606. Dostupné z: doi:10.5194/hess-25-1245-2021.
- ZACHAROV, P., ŠÁLEK, M., NOVÁK, P., 2004. Porovnání různých metod využívajících radarová a srážkoměrná měření pro odhad srážek. *Meteorologické zprávy*, roč. **57**, č. 6., s. 157–167. ISSN 0026-1173.
- ZACHAROV, P., ŘEZÁČOVÁ, D., BROŽKOVÁ, R., 2019. Verifikace kvantitativní předpovědi srážek produkované modelem ALADIN-CZ. *Meteorologické zprávy*, roč. **72**, č. 5., s. 140–151. ISSN 0026-1173.

Lektoři (Reviewers):

Mgr. Petr Münster, RNDr. Milan Šálek, Ph.D.

Vzťahy medzi intenzitou, trvaním a frekvenciou krátkodobých dažďov určené pomocou bayesovskej inferencie parametrov GEV rozdelenia

Relationships between intensity, duration and frequency of short-term rains determined by Bayesian inference of GEV distribution parameters

Milan Onderka

Ústav vied o Zemi Slovenskej akadémie vied
Dúbravská cesta 9, 840 05 Bratislava, Slovensko
Slovenský hydrometeorologický ústav,
Jeséniova 17, 824 12 Bratislava, Slovensko
✉ milan.underka@savba.sk

Jozef Pecho

Slovenský hydrometeorologický ústav
Jeséniova 17, 824 12 Bratislava, Slovensko
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
– Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie
Univerzita Komenského, Mlynská dolina F1
842 48 Bratislava, Slovensko

Lukas Bodinger

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
– Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie
Univerzita Komenského, Mlynská dolina F1
842 48 Bratislava, Slovensko

Svetlana Bičárová, Veronika Lukasová, Anna Buchholcerová, Pavol Nejedlík

Ústav vied o Zemi Slovenskej akadémie vied
Dúbravská cesta 9, 840 05 Bratislava, Slovensko

This paper describes how we applied Bayesian inference to estimate parameters of the generalized extreme value distribution (GEV) of short-term rainfall intensities. The historical records from the self-registering rain gauge at Hurbanovo (Slovakia) covering the period 1961–2009 were used as input data. One of the insurmountable limitations of the frequentist approach when dealing with the probability of extreme rainfall intensities is the necessity to analyse long time series. As there are usually only relatively short time series of annual rainfall maxima available (< 50 years), reliance on classical frequency analysis is usually not the best choice, and therefore it is necessary to seek alternative solutions. In this case study, we assume that the adverse effects of short time series on the estimated distribution of rainfall intensities and consequently the uncertainties associated with the derived rain intensity-duration-frequency curves (IDF curves) can be eliminated by applying Bayesian inference. Here, the GEV distribution parameters were estimated from the annual maximum

rainfall intensities. The rainfall intensities with return periods $T = 2, 5, 10, 20, 30, 50$ and 100 years were calculated along with the uncertainty intervals. Finally, we mathematically expressed the empirically derived relationships between the specific rainfall intensities, duration of the rain and the frequency of occurrence.

KLÚČOVÉ SLOVÁ: bayesovská inferencia – extrémne zrážky – GEV rozdelenie – IDF krivky – intenzita – špecifická výdatnosť dažďa

KEYWORDS: Bayesian inference – extreme rainfall – GEV distribution – IDF curves – intensity – specific rainfall intensity

1. Úvod

Štatistika opisujúca extrémne intenzity atmosférických zrážok zohráva kľúčovú rolu pri návrhu vodohospodárskej infraštruktúry (Koutsoyiannis et al. 2004a,b; Lima et al. 2018; Lutz et al. 2020; Onderka et al. 2020; Papalexiou, Koutsoyiannis 2013; Serinaldi, Kilsby 2014). Extrémne meteorologické udalosti akými sú napr. prívalové dažde, lejaky a prietrže mračen definujeme ako meteorologické situácie, ktoré môžu mať nepriaznivé, ba až ničivé následky na hospodárstvo krajiny, majetok a životy ľudí (Bedient et al. 2008; Beranová et al. 2018; Lakatos et al. 2020). Krátkodobé dažde s trvaním niekoľko minút až desiatok minút sa často vyznačujú vysokou intenzitou. Pre praktické použitie je dôležité poznať závislosť medzi hodnotami intenzít dažďov, trvaním a pravdepodobnosťou ich výskytu. Pri matematickom popise vzťahov medzi intenzitou, trvaním a periodicitou dažďa (v angličtine známych pod názvom Intensity Duration Frequency curves – IDF) sa zameriavame zväčša na odhad tvaru kriviek intenzity a trvania dažďa pre rôzne doby opakovania vychádzajúc z pravdepodobnosti rozdelenia intenzít zrážok nameraných v minulosti. Konštruovanie IDF kriviek pre dažde s krátkym trvaním (napr. 5 minút až 24 hodín) je potrebné najmä pre správne dimenzovanie vodohospodárskych stavieb v malých povodiach, v mestskej infraštruktúre, napr. pri návrhu kanalizačných sietí (Urcikán, Imriška 1986), ale v poslednej dobe už aj pri projekčnej činnosti modrozelených projektov určených na zadržiavanie vody z atmosférických zrážok v krajine (Onderka, Pecho 2021; Onderka et al. 2020). Na Slovensku sa v minulosti odhadu tvaru a parametrov IDF

kriviek venovalo viacero autorov. Prehľad prác pokrývajúcich tému určovania intenzít krátkodobých dažďov na Slovensku je uvedený v článku autorov Kupčo et al. (2021). K najznámejším prácam dodnes využívaným vodohospodárskou praxou a v posudkovej činnosti Slovenského hydrometeorologického ústavu patrí štúdia prezentujúca empirické odhady kvantilov zrážok od autorov Šamaj a Valovič (1973). Za zmienku stojí napríklad Gaál et al. (2009), ale aj posledná práca autorov Bara et al. (2009) pojednávajúca o využití jednoduchého škálovania. Jedna z neprekonateľných limitácií frekvencistického prístupu (klasickej štatistiky) pri riešení pravdepodobností výskytu extrémnych intenzít zrážok je potreba analýzy dlhého časového radu pozorovaní. Napríklad pri odhadovaní parametrov generalizovaného rozdelenia extrémnych hodnôt (Generalized extreme value distribution – GEV distribution) je na dĺžku časového radu mimoriadne citlivý parameter tvaru (Koutsoyiannis et al. 2004a,b; Lima et al. 2018; Papalexiou, Koutsoyiannis 2013). Negatívny vplyv krátkych časových radov na presnosť odhadu parametrov GEV rozdelenia a následne aj na neistoty hodnôt odvodených IDF kriviek môžeme eliminovať využitím bayesovskej inferencie. Primárnym cieľom tejto štúdie je opísať metódu použitú pri odhade najvierohodnejších parametrov GEV rozdelenia intenzít krátkodobých dažďov pomocou bayesovskej inferencie a následne takto získané parametre rozdelenia použiť pre výpočet kvantilov N -ročných hodnôt intenzít dažďa s trvaním od 5 do 180 minút.

2. Materiály a metódy

Ako vstupné údaje použijeme digitalizované záznamy z ombrografu umiestneného v rámci meteorologického observatória v Hurbanove (indikatív zrážkomera 19040). Meteorologické observatórium Hurbanovo je profesionálnou stanicou s najúplnejším a najlepšie spracovaným pozorovacím materiálom na Slovensku a je základnou stanicou pre slovenský klimatologický výskum. V roku 2020 bola táto stanica zaradená na zoznam „Storočných pozorujúcich staníc Svetovej meteorologickej organizácie (WMO)“. Zrážkomer je umiestnený v nadmorskej výške 115 m n. m. (zem. šírka: 47,8725, zem. dĺžka 18,19306). Ide o ombrograf typu METRA 890-IBA konštruovaný s plavákovým systémom s násoskovým vyprázdňovaním. Záchytná plocha tohto typu ombrografu, ktorý sa vyprázdňuje po 30 mm spadnutých zrážok, je 250 cm². V prvom kroku bolo nevyhnutné ombrografické minútové záznamy agregovať (s použitím kľazových súm) na dlhšie trvania dažďových oddielov, t.j. na 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 120, a ďalej so 60 minútovými inkrementami až po 1 440 minútové úhrny, a tieto následne prepočítať na minútové intenzity. V druhom kroku sme pre každý takto agregovaný časový rad identifikovali ročné maximá minútových intenzít. Ročné maximum definujeme ako najvyššiu hodnotu intenzity vyskytujúcu sa v kalendárnom roku. Pre úplnosť treba podotknúť, že spracovaný časový rad zrážok pokrýva iba teplú časť roka (približne od apríla do novembra). Kvapalnú zrážku v chladnej časti roka sa ombrografom METRA 890 nezaznamenávajú z dôvodu rizika mrznutia vody v ombrografe.

Intenzita zrážok je definovaná ako objem zrážkovej vody, ktorý spadne na jednotku plochy za jednotku času. V SI sústave je intenzita zrážok vyjadrená jednotkou 1 m³·m⁻²·s⁻¹. V meteorologickej praxi sa však stretávame skôr s jednotkami mm·min⁻¹, prípadne mm·h⁻¹. V slovenských technických normách pokrývajúcich potreby vodného hospodárstva sa dokonca popri pojmu intenzita zrážok vyskytuje (z historických dôvodov) aj

pojem špecifická výdatnosť dažďa s jednotkou [l·ha⁻¹·s⁻¹]. Aj s ohľadom na túto skutočnosť v predkladanej štúdii považujeme intenzitu zrážok a špecifickú výdatnosť dažďa ako významovo rovnocenné pojmy. Z tohto dôvodu výsledné IDF krivky budú vyjadrené vo forme špecifických výdatností dažďa. V prípade potreby prepočtu z jednotiek špecifickej výdatnosti dažďa q_s [l·ha⁻¹·s⁻¹] na minútové intenzity i [mm·min⁻¹] možno použiť jednoduchý vzťah $i = q_s / 166,67$.

2.1 Generalizované rozdelenie extrémnych hodnôt (GEV)

Štandardnými parametrickými modelmi sa snažíme aproxi-movať rozdelenie pozorovaných intenzít zrážok jedným pravdepodobnostným rozdelením. Medzi najzaujímavejšie spôsoby modelovania rozdelenia môžeme bez pochyb zaradiť analýzu blokových maxim, v ktorej pozorovania rozdeľujeme do niekoľkých n rovnako veľkých blokov (najčastejšie kalendárnych rokov). Pre každý blok sa určí ročné maximum $M_n = \max \{X_1, \dots, X_n\}$ z nezávislých a identicky distribuovaných (i.i.d.) náhodných premenných X pozorovaných počas jedného roka. Nech takáto náhodná premenná má rozdelenie F . Predpokladajme, že existuje postupnosť reálnych čísel $a_n > 0$ a b_n tak, že postupnosť $(M_n - b_n) / a_n$ konverguje v distribúcii, t.j. $P((M_n - b_n) / (a_n \leq x)) = F^n(a_n x + b_n) \rightarrow G(x)$, $n \rightarrow \infty$, pre nejakú nedegenerovanú distribučnú funkciu $G(x)$. Ak táto podmienka platí, potom hovoríme, že F sa nachádza vo sfére príťažlivosti G (v angl. maximum domain of attraction – MDA), t.j. $F \in MDA(G)$. Teoreticky preto môžeme rozdelenie všetkých ročných maxim M_n aproxi-movať generalizovanou distribučnou funkciou extrémnych hodnôt $G(x)$, ktorá je definovaná pre $\{x: 1 + \xi(x - \mu) / \sigma\}$, kde $-\infty < \mu < \infty$, $\sigma > 0$ a $-\infty < \xi < \infty$ ako

$$G(x) = \exp \left[- \left(1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right)^{-1/\xi} \right] \quad (1)$$

kde μ je parameter polohy špecifikujúci stred rozdelenia, σ je parameter škály určujúci veľkosť odchýlky od stredu rozdelenia, ξ je parameter tvaru funkcie rozdelenia, ktorý vplyva na správanie sa pravej časti distribučnej funkcie (Coles 2001; Cheng et al. 2014, 2015; Koutsoyiannis et al. 2004a,b; Ragno et al. 2019). V limitnej podobe, kde $\xi \rightarrow 0$, korešponduje GEV rozdelenie s Gumbelovým rozdelením, pre $\xi < 0$ s Weibullo-vým rozdelením a pre $\xi > 0$ s rozdelením typu Fréchet (Coles 2001). Ak poznáme parametre rozdelenia $G(x)$, potom odhady extrémnych kvantilov ročných maxim je možné pre prípad kedy pre $\xi \neq 0$ odvodiť z inverznej funkcie (2):

$$x = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - \{-\log(1 - p)\}^{-\xi} \right] \quad (2)$$

kde x je hľadaný kvantil intenzít zrážok zodpovedajúci dobe opakovania ($T = 1/p$). Kvantil x môžeme preto chápať ako hodnotu intenzity zrážok, ktorá je prekročená v priemere každých $T = 1/p$ rokov.

Odhadnutie správnej hodnoty parametra tvaru ξ je kruciálny krok pri výpočte kvantilov zrážok (Koutsoyiannis et al. 2004a,b; Sarinaldi a Kilsby 2014). Parameter tvaru ξ určuje správanie sa tzv. „ťažkých chvostov – heavy tails“, ktoré ovplyvňujú pravdepodobnosť výskytu extrémov v pravej časti distribučnej funkcie zodpovedajúcich práve oblasti zrážkových extrémov. Koutsoyiannis et al. (2004a, 2004b) vo svojich prácach poskytli teoretické aj empirické dôkazy o tom,

že v praxi bežne používané (pozn. z dôvodu tradície a jednoduchosť výpočtu) dvojparametrické Gumbelovo rozdelenie (kde $\xi \rightarrow 0$) sa nejaví ako vhodné rozdelenie pre štúdium extrémov zrážok. Analýzou údajov zo 169 lokalít v rôznych častiach sveta s dĺžkou časových radov pozorovaní od 100 do 154 rokov poukázali autori Koutsoyiannis et al. (2004b) na skutočnosť, že v prípade krátkych časových radov ročných maxim (< 50 rokov) nie je možné detekovať prítomnosť „ťažkých chvostov“, ktoré sú detekovateľné len pri dlhých časových radov (> 100 rokov). Čo sa týka numerickej hodnoty parametra tvaru ξ rozdelenia GEV, Koutsoyiannis et al. (2004b) sformulovali hypotézu, podľa ktorej hodnota parametra tvaru ξ pri denných úhrnoch by mohla byť univerzálna konštanta pre celý svet rovnajúca sa hodnote 0,15. Avšak na základe výsledkov neskoršej štúdie vychádzajúcej z hodnotenia viac ako 15 000 časových radov denných úhrnov z rôznych častí sveta o dĺžke 40 až 163 rokov (Papalexiou, Koutsoyiannis 2013) sa táto hypotéza nepotvrdila, keďže v predmetnej štúdii hodnota parametra tvaru GEV rozdelenia s dĺžkou časového radu blížiac sa v limite nekonečna nadobúdala hodnoty blízke 0,114 (so štandardnou odchýlkou $\approx 0,045$). Podobne aj ďalší autori potvrdzujú, že v prípade denných zrážkových extrémov je hodnota parametra tvaru vždy kladná ($\xi > 0$), čo naznačuje, že v prípade štúdia rozdelenia extrémnych hodnôt zrážok je potrebné uvažovať skôr o distribúcii typu Fréchet ako o Gumbelovej distribučnej funkcii (Fukutome et al. 2018; Huard et al. 2010; Lutz et al. 2020; Rath et al. 2017; Serinaldi, Kilsby 2014).

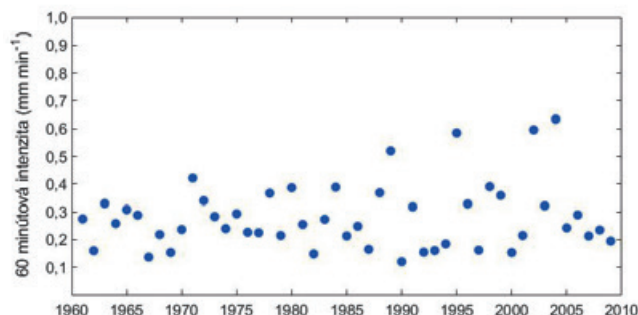
2.2 Bayesovská inferencia parametrov GEV rozdelenia

Klasická štatistická škola vychádza z tzv. frekventistického prístupu vnímajúceho pravdepodobnosť ako dlhodobú relatívnu početnosť javu (AghaKouchak et al. 2013; Hebák 2012). Základný rozdiel medzi frekventistickým a bayesovským prístupom spočíva v zmene celej paradigmy inferencie parametrov modelu. V klasickej štatistickej inferencii uvažujeme o parametroch modelu ako o neznámej fixnej premennej, ktorú chceme odhadnúť ako jedinú správnu hodnotu (AghaKouchak et al. 2013; Coles 2001; Ragno et al. 2019; Renard et al. 2006). Naopak, bayesovská štatistika neprisudzuje parametru modelu iba jednu a jedinú možnú správnu hodnotu. Čo môžeme chápať za fixné v bayesovskej štatistike, sú iba namerané údaje. Definujme vektor θ ako nejaké parametre distribučnej funkcie a nech existuje vektor pozorovaní $y = \{y_1, \dots, y_n\}$, čo môže byť napríklad sekvencia ročných maxim intenzít zrážok za n rokov. V Bayesovskej inferencii parametrov modelu vychádzame z apriórnej predstavy o pravdepodobných hodnotách parametrov modelu definovaných prostredníctvom tzv. apriórnej hustoty vektora (alebo matice) parametrov $p(\theta)$, tiež v skrátenej forme nazývanej prior. Naopak, aposteriórna hustota (v skrátenej forme posterior) $p(\theta | y)$ je tvorená kombináciou poznatkov o správaní sa modelu pomocou prioru a funkcie vierohodnosti (v angl. likelihood function) pozorovaných údajov $p(y | \theta)$. Podľa bayesovskej vety (3) platí, že pravdepodobnosť parametrov θ podmienená pozorovaniami y (čiže posterior $p(\theta | y)$) proporčne narastá s pravdepodobnosťou parametrov θ (prioru) a s pravdepodobnosťou pozorovaní y podmienenou parametrami θ , tj. $p(y | \theta)$:

$$p(\theta | y) \propto p(\theta) \prod_{i=1}^n p(y_i | \theta) \quad (3)$$

kde $\propto$ je symbol proporcionality a $\prod_{i=1}^n p(y_i | \theta)$ je funkcia vierohodnosti (AghaKouchak et al. 2013; Coles 2001; Ragno et al. 2019).

Na lepšie pochopenie použitia bayesovskej inferencie parametrov GEV rozdelenia uvádzame príklad založený na skutočných pozorovaniach. Použili sme ročné maximá 60 minútových intenzít zrážok (y) nameraných zrážkomerom umiestnenom v Hurbanove za obdobie 1961 až 2009 (obr. 1).



Obr. 1 Ročné maximá 60 minútových intenzít dažďa pozorované v stanici Hurbanovo.

Fig. 1. Annual maxima series of 60 minute rainfall intensities observed at the Hurbanovo station.

Predpokladajme, že ročné maximá vychádzajú z GEV rozdelenia s neznámymi parametrami $\theta = (\mu, \sigma, \xi)$. Potom funkciu vierohodnosti $\prod_{i=1}^n p(y_i | \theta)$ môžeme za predpokladu nezávislosti zapísať v tvare pre GEV rozdelenie ako:

$$p(y | \mu, \sigma, \xi) \propto \prod_{i=1}^n p_{GEV}(y_i | \mu, \sigma, \xi) \quad (4)$$

kde $p_{GEV} = (y_i | \mu, \sigma, \xi)$ je distribučná funkcia GEV rozdelenia hodnotená osobitne pre každé y_i . Každý z parametrov GEV rozdelenia (μ, σ, ξ) má svoj vlastný prior, ktorého voľba môže byť založená na teoretických, alebo empirických „apriórnych“ znalostiach o predpokladaných hodnotách tohto parametra. Rozdelenie prioru má zásadný význam na rozdelenie posterioru hlavne v prípade, keď nemáme k dispozícii dostatok údajov, čo je aj prípad ročných maxim intenzít zrážok. Vo všeobecnosti však možno povedať, že rozdelenie prioru vyjadruje naše presvedčenie o správnosti rozdelenia parametrov modelu (apriórne rozdelenia parametrov) ešte pred samotným výpočtom posterioru. Aby sme minimalizovali subjektivitu pri určovaní apriórneho rozdelenia jednotlivých parametrov GEV modelu, bolo potrebné nájsť relevantné fakty v dostupnej literatúre podporujúce voľbu intervalu hodnôt zvoleného rozdelenia prioru. Pri voľbe hodnoty prioru parametra tvaru ξ sme vychádzali z výsledkov štúdií autorov Koutsoyiannis et al. (2004a,b), Papalexiou, Koutsoyiannis (2013) a Serinaldi, Kilsby (2014). V nedávnej štúdii autorov Ulrich et al. (2021) bol parameter tvaru modelovaný na ročných maximách ako funkcia trvania dažďa od 1 minúty po 120 hodín s hodnotami parametra tvaru v približne rozsahu 0 až 0,3. Na základe uvedených štúdií sme pre prior parametra tvaru ξ zvolili normálne rozdelenie $\xi \sim N(0,15; 0,075)$, kde 0,15 je stredná hodnota a 0,075 je štandardná odchýlka, z ktorého vyplýva, že 95 % hodnôt bude pochádzať z intervalu $\xi \in (0;$

0,3), ktorý možno považovať za dostatočne široký pre výber hodnôt parametra ξ aj v našich simuláciách. Keďže z fyzikálnej podstaty intenzity zrážok je zrejme, že intenzity môžu nadobúdať iba kladné hodnoty, prior pre parameter polohy (μ) sme zadefinovali tak, aby jeho hodnoty sledovali normálne rozdelenie tohto parametra s kladnou strednou hodnotou $\mu \sim N\{\text{priemer}(\mathbf{y}); \text{štandardná odchýlka}(\mathbf{y})\}$. Obdobne aj parameter škály (σ) bolo potrebné zvoliť tak, aby jeho hodnoty boli vždy kladné, preto tento parameter bol modelovaný v logaritmickej škále a po jeho inferencii následne delogarithmizovaný, tak ako je opísané v prácach Coles (2001) a Ragno et al. (2019). Rozdelenie prioru parametra škály sme zadefinovali širšie (na základe vlastných skúseností) ako $\sigma \sim N\{0; 10\}$. Samotné parametre GEV rozdelenia a posteriornú funkciu sme odhadli bayesovskou inferenciou s použitím Hybridného-Evolučného Markov-Chain Monte-Carlo (HE-MCMC) algoritmu implementovaného v Matlab balíku ProNEVA opísaného napríklad v práci Sadegh et al. (2017) s praktickými aplikáciami publikovanými v prácach autorov AghaKouchak et al. (2013), Cheng et al. (2014) a Ragno et al. (2019). Aj keď nie je cieľom tejto štúdie oboznámiť čitateľa s detailmi HE-MCMC algoritmu z dôvodu obsírnosti problematiky a pomerne rozsiahleho matematického aparátu, naznačíme aspoň v krátkosti základné procesné princípy. Pri odhade parametrov v bayesovskej inferencii začíname s počiatočnými odhadmi parametrov modelu a pokračujeme v iteráciách, pričom v každej iterácii sú simulované výbery z aposteriorného rozdelenia a tieto sú následne aktualizované (Renard et al. 2006). HE-MCMC vytvára paralelne Markovovske reťazce, ktorých limitným rozdelením bude aposteriorné rozdelenie. Aktualizácia aposteriorného rozdelenia parametrov modelu je kľúčový krok v bayesovskej inferencii, čo ju odlišuje od klasickej štatistickej inferencie, keďže našim cieľom je získať aposteriorné rozdelenie (interval hodnôt) a nie len bodový odhad funkcie rozdelenia. Viac informácií o použití HE-MCMC algoritmu možno nájsť v prácach AghaKouchak et al. (2013), Cheng et al. (2014), Ragno et al. (2019) a Renard et al. (2006). Pre potreby tohto článku sme s malými úpravami v skripte použili voľne dostupný balík ProNEVA (Process-informed Nonstationary Extreme Value Analysis), ktorý je pomerne podrobne opísaný v práci Ragno et al. (2019). V uvádzanom príklade s údajmi z Hurbanova sme počet reťazcov nastavili na chain = 6 s počtom iterácií prislúchajúcich jednému reťazcu 2 500. Výsledkom každej z týchto HE-MCMC simulácií sú parametre modelu μ, σ, ξ . Je potrebné upozorniť na skutočnosť, že MCMC reťazec sa dostane do najpravdepodobnejšej oblasti vzorkového priestoru až po zbehnutí určitého dostatočného počtu počiatočných iterácií. Z tohto dôvodu počiatočné výsledky simulácie aposteriorného rozdelenia je potrebné jednoducho vymazať (v literatúre označované ako „odpálená vzorka – burn-in sample“). V našom príklade sme na základe empirickej skúsenosti za burn-in sample označili prvých 100 iterácií, ktoré sme odstránili. Preto skutočný počet iterácií použitý pri simuláciách kvantilov intenzít bol $6 \times (2\,500 - 100) = 14\,400$. Pripomeňme si, že našim cieľom nie je iba odhadnúť rozdelenie parametrov modelu, ale aj vypočítať kvantily intenzít zrážok zodpovedajúcich dobám opakovania $T = 2, 5, 10, 20, 30, 50$ a 100 rokov. Vychádzajúc z rovnice (2) a po dosadení simulovaných kombinácií parametrov μ, σ, ξ sme vypočítali jednotlivé kvantily intenzít zrážok (14 400 simulovaných kvantilov). Následne sme z takto vypočítaných kvantilov vypočítali zvolené charakteristiky polohy (medián, modus), prípadne percentily P05 a P95.

2.3 IDF krivky

Vzťahy medzi intenzitou dažďa (prípadne špecifickou výdatnosťou dažďa), jeho trvaním a frekvenciou výskytu sa v grafickom formáte vyjadrujú prostredníctvom tzv. IDF kriviek (Koutsoyiannis et al. 1998). Štandardne sa IDF krivky konštruujú ako bodové odhady pre konkrétne zrážkomerné stanice. Predpokladajme, že medzi intenzitou dažďa y s trvaním (dĺžkou) časového oddielu D platí vzťah (Koutsoyiannis et al. 1998):

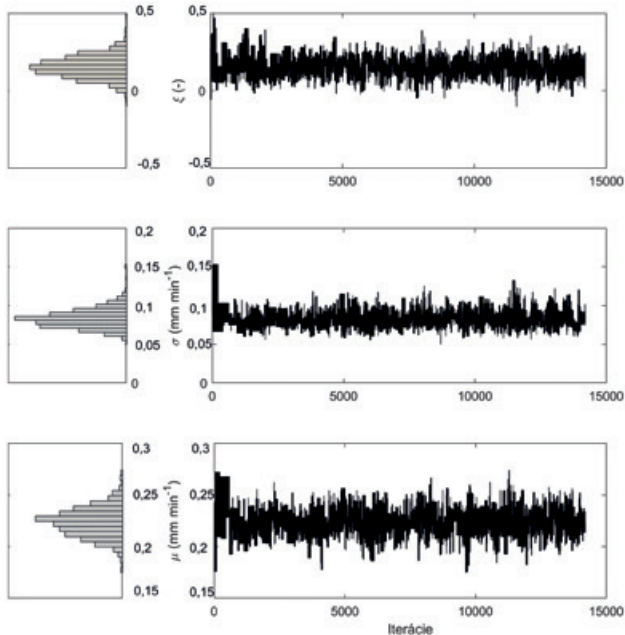
$$y(D, T) = \frac{\lambda T^\kappa}{(D + \delta)^\eta} \quad (5)$$

kde D je dĺžka dažďového oddielu (min), T je doba opakovania (rok) a $\lambda, \delta, \kappa, \eta$ sú empirické parametre. Zároveň platia pre parametre η a δ obmedzujúce podmienky: $0 < \eta \leq 1$ a $\delta \geq 0$. Je zrejme, že rovnica nemá analytické riešenie a jej štyri parametre ($\lambda, \delta, \kappa, \eta$) musia byť odhadnuté použitím napríklad optimalizačných metód. V predloženej štúdii sme na odhad parametrov rovnice (5) využili metódu Levenberg-Marquardt, kde ako objektívnu funkciu sme použili minimum sumy štvorcov.

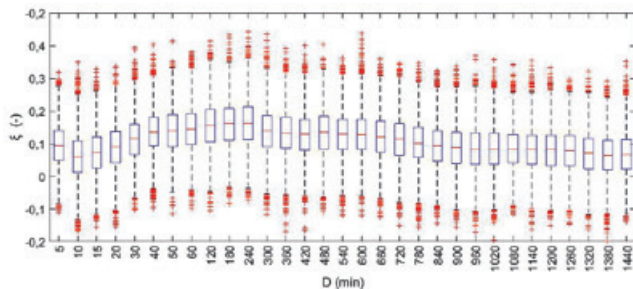
3. Výsledky s diskusiou

Ako príklad bayesovskej inferencie parametrov rozdelenia (μ, σ, ξ) sme pomocou HE-MCMC simulácii zostrojili stopové diagramy zobrazujúce vývoj hodnôt parametrov v iteračnom cykle spolu s marginálnymi rozdeleniami vo forme histogramov každého parametra osobitne pre hodinové intenzity zrážok (obr. 2 vľavo). Stopové diagramy (obr.2 vpravo) nám ukazujú vývoj hodnôt jednotlivých parametrov modelu s narastajúcim počtom zbehnutých iteračných cyklov. Komplexnejšiu predstavu o posteriornom rozložení hodnôt parametrov pre všetky úrovne agregácie intenzít zrážok, t.j. od 5 min po 1440 min, je možné získať z boxplotov na obr. 3. V prípade hodinových intenzít je mediánová hodnota parametra tvaru $\xi = 0,148$. Tieto boxploty (obr. 3) zobrazujú závislosť parametra tvaru ξ od dĺžky trvania dažďa D vrátane celkového rozptylu hodnôt parametra pre jednotlivé trvania dažďa. Z posteriorného rozdelenia parametra tvaru ξ pre jednotlivé trvania dažďa (obr. 3) vyplýva, že tento parameter vykazuje tendenciu narastať s dĺžkou dažďového oddielu D v intervale od 10 min po 180 min, a následne hodnota parametra tvaru klesá pri narastajúcej D až po 1440 minút, kde mediánová hodnota $\xi = 0,0668$. Maximálne hodnoty nadobúda parameter tvaru ξ pri $D = 180$ minút ($\xi = 0,163$). Naopak, najnižšiu hodnotu parametra ξ sme pozorovali pre $D = 10$ minút. Zaujímavá je aj rastúca hodnota ξ pre 5 minútové trvanie dažďa. Podobné výsledky získali autori štúdie Ulrich et al. (2021).

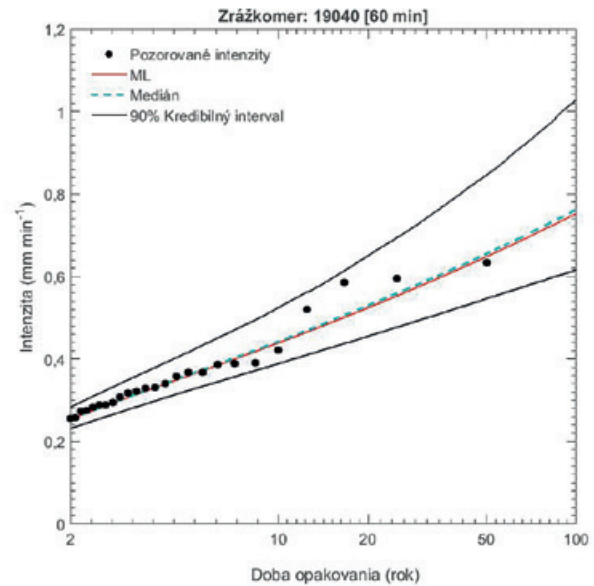
Závislosť medzi intenzitou dažďa a dobou opakovania pre 60 minútové intenzity je zobrazená na obr. 4. Obdobné grafické závislosti možno zostrojiť aj pre ďalšie trávania dažďa, ale z dôvodu obmedzeného priestoru v článku uvádzame túto závislosť len pre 60 minútové intenzity. Neoceniteľnou výhodou HE-MCMC simulácií je možnosť odhadu intervalu neistoty počítaných kvantilov zrážok. Z obr. 4 vyplýva, že neistota kvantilov hodinových intenzít zrážok rastie s dobou opakovania. Napríklad pri dobe opakovania 10 rokov až 90 % simulovaných hodnôt spadá do intervalu 0,4 až 0,55 mm min⁻¹, zatiaľ čo v prípade doby opakovania 100 rokov sa tento interval rozširuje do rozpätia od 0,62 do 1,02 mm min⁻¹. Je potrebné si uve-



Obr. 2 Histogramy a stopové diagramy marginálneho posteriorného rozdelenia parametra polohy μ , parametra škály σ a parametra tvaru ξ simulované pre hodinové intenzity.
Fig. 2. Histograms and trace diagrams of marginal posterior distributions for the location parameter μ , scale parameter σ , and shape parameter ξ simulated for hourly rainfall intensities.



Obr. 3 Závislosť parametra tvaru ξ od dĺžky trvania dažďa D .
Fig. 3. Relationship between the shape parameter ξ and rainfall duration D .

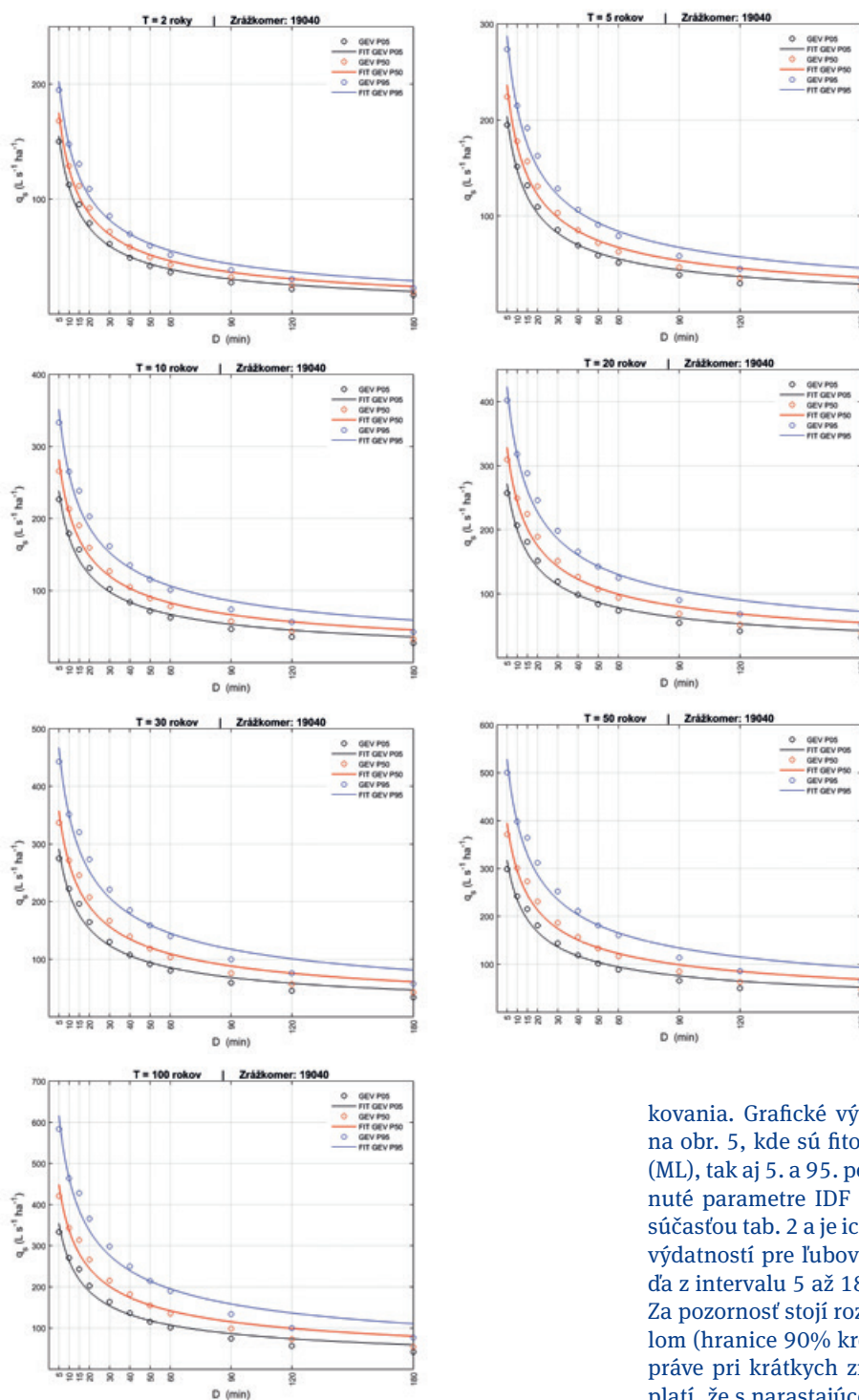


Obr. 4 Závislosť medzi intenzitou dažďa [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] a dobou opakovania pre 60 minútové trvania. Skratka ML označuje maximálne virohodné hodnoty.
Fig. 4. Relationship between rainfall intensity [$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$] and return period of 60-minute durations. ML stands for maximum likelihood estimates.

Tab. 1 Maximálne virohodné kvantily špecifickej výdatnosti dažďa [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$] vypočítané pre zrážkomernú stanicu v Hurbanove. V hranatých zátvorkách je uvedený 90% kredibilný interval ohraničený 5. a 95. percentilom.

Table 1. Maximum likelihood estimates of specific rainfall intensities [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$] calculated for the rain gauge located at Hurbanovo. The 90% credible intervals (bounded by the 5th and 95th percentiles) are indicated in brackets.

T (rok)	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min	120 min	180 min
2	190,9	142,1	117,0	96,7	73,1	58,8	49,1	42,4	25,3	18,9
	[175,64	[129,35	[107,13	[88,19	[66,69	[53,52	[44,88	[38,64	[23,16	[17,34
	208,86]	155,54]	127,86]	106,08]	80,42]	65,3]	54,78]	47,21]	27,88]	20,64]
5	257,2	191,9	158,5	131,3	100,3	81,7	68,7	59,8	34,8	25,3
	[234,15	[173,89	[144,15	[118,94	[90,62	[73,7	[62,04	[53,96	[31,39	[22,91
	290,46]	217,36]	178,94]	148,81]	114,39]	93,96]	79,00]	68,99]	39,6]	28,7]
10	305,4	226,7	187,9	156,2	120,5	98,9	83,4	73,0	42,1	30,2
	[273,58	[202,59	[168,34	[139,52	[107,38	[87,91	[74,29	[64,91	[37,36	[27,02
	354,73]	265,12]	218,52]	182,47]	141,5]	116,3]	98,44]	86,64]	48,94]	35,23]
20	354,9	261,6	217,8	181,6	141,7	117,2	99,1	87,1	49,9	35,5
	[311,45	[228,93	[190,98	[159,39	[123,8	[102,44	[86,61	[76,07	[43,45	[31,23
	426,72]	317,87]	261,58]	219,69]	171,44]	142,16]	120,58]	106,52]	59,7]	42,93]
30	385,0	282,3	235,8	197,0	154,7	128,6	108,9	95,9	54,8	38,9
	[333,74	[244,07	[203,67	[170,47	[133,38	[110,8	[93,84	[82,78	[47,04	[33,8
	471,85]	350,73]	289,04]	243,57]	191,28]	158,94]	135,5]	119,76]	66,91]	47,92]
50	424,4	309,0	259,0	217,0	171,9	143,8	122,0	107,6	61,3	43,5
	[361,05	[262,16	[219,01	[184,54	[145,43	[121,44	[103,28	[91,27	[51,75	[37
	535,38]	396,09]	326,67]	277,16]	217,96]	182,47]	156,24]	138,43]	77,17]	55,09]
100	480,8	346,3	291,8	245,5	196,8	166,0	141,1	124,9	71,1	50,2
	[397,05	[285,74	[239,51	[203,25	[161,6	[136,34	[116,2	[102,95	[58,29	[41,53
	633,74]	464,18]	383,25]	328,18]	259,24]	219,69]	187,45]	167,87]	93,33]	66,3]



Obr. 5 Kvantily špecifickej výdatnosti dažďa q_s [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$] s dĺžkou dažďového oddielu D (min) od 5 minút po 180 minút počítané pre doby opakovania $T = 2, 5, 10, 20, 30, 50$ a 100 rokov. Krivky spájajúce odhady kvantilov maximálnej vierohodnosti (FIT GEV ML) ako aj kredibilný interval vymedzený 5. a 95. percentilom (FIT GEV P05 a FIT GEV P95) boli fitované podľa vzťahu uvedeného v rovnici (5).

Fig. 5. Quantiles of specific rainfall intensities q_s [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$] with rainfall duration D (min) ranging from 5 minutes to 180 minutes simulated for return periods $T = 2, 5, 10, 20, 30, 50$ and 100 years. The curves connecting the quantile estimates corresponding to the maximum likelihood (FIT GEV ML) and the credible interval defined by the 5th and 95th percentiles (FIT GEV P05 and FIT GEV P95) have been fitted using Eq. 5.

domiť, že výsledkom bayesovskej inferencie s HE-MCMC simuláciou nie je len jedna jediná „správna“ hodnota kvantilu; naopak, výsledok simulácií je kredibilný interval (v angl. credible interval), ktorý sme v našom príklade vymedzili 5. a 95. percentilom (P05 a P95). Avšak pre účel ďalšieho spracovania IDF kriviek je vhodné počítať s jednou konkrétnou hodnotou, ktorú si môžeme zvoliť buď ako medián, modus, prípadne simuláciu korešpondujúcu maximumu logaritmu posterioru (maximum likelihood – ML). Spôsobom opísaným v hore uvedenom príklade z Hurbanova sme vypočítali aj kvantily 5–180 minútových intenzít, ktoré boli následne prepočítané na špecifické výdatnosti dažďa.

Za účelom lepšieho pochopenia použitej metodiky sme na obr. 5 vyniesli simulované a fitované kvantily špecifických výdatností dažďa (maximálne vierohodné odhady spolu s kredibilnými intervalmi) s použitím rovnice (5).

Výsledky všetkých simulácií sú prehľadne sumarizované v tab. 1, kde sú uvedené jednotlivé kvantily špecifickej výdatnosti dažďa vo forme maximálneho vierohodného odhadu (ML) a intervalov kredibilných hodnôt pre trvanie dažďa od 5 minút po 180 minút s príslušnou dobou opakovania.

Grafické výstupy fitovania rovnice (5) sú uvedené na obr. 5, kde sú fitované jednak najvierohodnejšie kvantily (ML), tak aj 5. a 95. percentil simulovaných kvantilov. Odhadnuté parametre IDF kriviek fitovaných podľa rovnice (5) sú súčasťou tab. 2 a je ich možné použiť pre výpočet špecifických výdatností pre ľubovoľné hodnoty zrážkových oddielov dažďa z intervalu 5 až 180 minút pre uvedené doby opakovania. Za pozornosť stojí rozpätie kvantilov medzi 5. a 95. percentilom (hranice 90% kredibilného intervalu), ktoré je najväčšie práve pri krátkych zrážkových oddieloch dažďa. Všeobecne platí, že s narastajúcou dĺžkou D sa kredibilný interval zužuje. Samotné IDF krivky sú štandardne zobrazené v logaritmickom formáte na obr. 6.

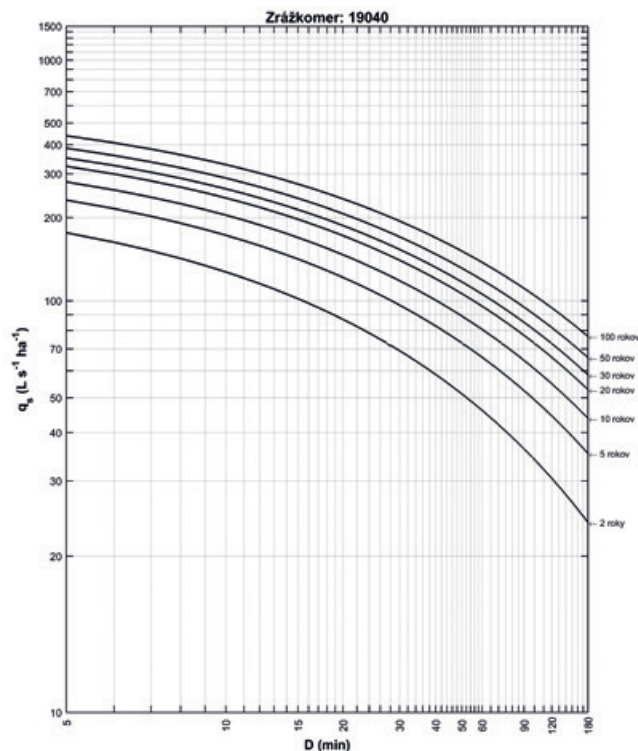
4. Záver a diskusia

Hlavným cieľom štúdie bolo odhadnúť najvierohodnejšie parametre rozdelenia GEV rozdelenia ročných maxim krátkodobých dažďov pomocou bayesovskej inferencie z údajov zo zrážkomernej stanice v Hurbanove za obdobie 1961–2009. V práci sme opísali procesný postup použitý pri odhade parametrov rozdelenia GEV s použitím bayesovskej štatistiky a následný spôsob určenia návrhových hodnôt intenzít zrážok pre trvania dažďa (dĺžku zrážkových oddielov) od 5 min do 180 min s do-

Tab. 2 Parametre IDF kriviek získané fitovaním rovnice (5) s použitím kvantilov špecifických výdatností dažďa. Parametre sú separátne uvedené pre maximálne vierohodné kvantily (ML) a kredibilný interval definovaný 5. a 95. percentilom (P05 a P95).

Table 2. Parameters of the IDF curves obtained by fitting Eq. (5) using quantiles of specific rainfall intensities. The parameters are separately indicated for the maximum likelihood (ML) quantiles and the credible interval defined by the 5th (P05) and 95th (P95) percentiles.

	T (rok)	λ	κ	δ	η
P05	2	1532,517	0,1631	7,8359	0,8934
	5	2002,467	0,0796	8,0973	0,8846
	10	2146,917	0,0492	7,6724	0,8569
	20	2214,767	0,0245	7,0045	0,8205
	30	2295,017	0,0079	6,5784	0,8005
	50	2330,917	0,0	6,1265	0,7771
	100	2341,65	0,0	5,7200	0,7524
ML	2	1776,217	0,1725	8,3482	0,9069
	5	2157	0,0937	8,1951	0,8831
	10	2261,083	0,0710	7,6874	0,8534
	20	2312,867	0,0531	7,0264	0,8192
	30	2344,433	0,0425	6,5990	0,7980
	50	2341,7	0,0346	6,0253	0,7704
	100	2342,15	0,0257	5,2688	0,7341
P95	2	1842,067	0,1717	8,1389	0,8916
	5	2345,45	0,0928	8,0999	0,8705
	10	2480,383	0,0975	7,8335	0,8509
	20	2499,95	0,0980	7,2811	0,8232
	30	2543,233	0,0924	7,0009	0,8060
	50	2566,45	0,0863	6,5070	0,7817
	100	2544,017	0,0794	5,6582	0,7445



Obr. 6 IDF krivky určené z údajov ombrografu v Hurbanove (interpolované bodové odhady maximálne vierohodných kvantilov q_0).

Fig. 6. IDF curves calculated from the pluviographic records at Hurbanovo (interpolated point estimates of the maximum likelihood quantiles q_0).

bami opakovania $T = 2, 5, 10, 20, 30, 50$ a 100 rokov vrátane intervalov neistôt. Takto získané kvantily intenzít zrážok sme použili na následnú parametrizáciu IDF kriviek.

Pozornosť sme venovali aj opisu závislosti hodnoty parametra tvaru ξ rozdelenia GEV od úrovne agregácie údajov vyjadrenej dĺžkou trvania dažďa. Ukázali sme, že tento parameter vykazuje tendenciu narastať s dĺžkou dažďového oddielu v intervale od 10 min po 180 minút, a následne hodnota parametra tvaru klesá, keď pri dĺžke oddielu 1 440 minút je mediánová hodnota parametra tvaru rovná 0,0668. Maximálne hodnoty nadobúda parameter tvaru pri dĺžke dažďového oddielu 180 minút ($\xi = 0,163$). Táto opísaná závislosť parametra tvaru je konzistentná s nedávnou štúdiou Ulrich et al. (2021).

Pokiaľ je nám známe, na Slovensku (a pravdepodobne ani v Česku) zatiaľ neboli spracované IDF krivky metódami bayesovskej štatistiky. Opačná situácia je v krajinách ako Nórsko (Lutz et al. 2020), USA (Rath et al. 2017), Kanada (Huard et al. 2010) a Švajčiarsko (Fukutome et al. 2018), kde metódy bayesovskej inferencie pri odhade návrhových intenzít zrážok sa stávajú už bežnou metodikou využívanou aj miestnou meteorologickou službou. U nás v aplikovanom výskume všeobecne stále dominuje tradičný frekventistický štatistický prístup pri hodnotení kvantilov zrážok. Naša práca preto vyplňa túto medzeru aj z pohľadu používania novších a progresívnych metód pri odhade kvantilov extrémov zrážok použiteľných pre vodohospodársku prax v prípade kratších dostupných časových radov. V každom prípade našim eminentným záujmom v budúcom výskume je získať bodové hodnoty aj pre ďalšie zrážkomerné stanice na Slovensku a interpolovať, prípadne regionalizovať kvantily odhadnuté bayesovskou štatistikou v priestore tak, aby bolo možné odhadnúť kvantily zrážok aj v lokalitách bez pozemných pozorovaní a rozšíriť naše poznanie o regionálnych rozdieloch vplyvom orografie a ďalších cirkulačných a klimatických činiteľov. Nakoniec netreba opomenúť ani možnosť zamerať sa na inferenciu parametrov GEV rozdelenia a následne aj IDF kriviek v nestacionárnom režime (Onderka et al. 2020), čo je určite zaujímavé smerovanie výskumu do budúcnosti aj z pohľadu vplyvu meniacej sa klímy na výskyt extrémov a požiadavku praxe aktualizovať návrhové hodnoty zrážok.

Podakovanie:

Autori ďakujú obom recenzentom za ich cenné pripomienky. Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: „Údajová a vedomostná podpora pre systémy rozhodovania a strategického plánovania v oblasti adaptácie poľnohospodárskej krajiny na klimatické zmeny a minimalizáciu degradácie poľnohospodár-

ských pôd“ (kód ITMS2014 + 313011W580), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Poďakovanie patrí aj projektu VEGA 2/0003/21 „Komplexná analýza vplyvu rastúcej teploty vzduchu na extremalitu zrážok na Slovensku“.

Literatúra:

- AGHAKOUCHAK, A., EASTERLING, D., HSU, K., SCHUBERT, S., SOROSHIAN, S., 2013. Extremes in a Changing Climate: Detection, Analysis and Uncertainty. Dordrecht: Springer. ISBN 978-94-007-4479-0.
- BARA, M., KOHNOVÁ, S., GAÁL, L., SZOLGAY, J., HLAŤOVÁ, K., 2009. Estimation of IDF curves of extreme rainfall by simple scaling in Slovakia. *Contributions to Geophysics and Geodesy*. Vol. **39**, s. 187–206. ISSN 1338-0540.
- BEDIENT, P., HUBER, W., VIEUX, B., 2008. Hydrology and Floodplain Analysis: International Edition. 4th ed. Pearson Education (US). ISBN 10 0132422867.
- BERANOVÁ, R., KYSELÝ, J., HANEL, M., 2018. Characteristics of sub-daily precipitation extremes in observed data and regional climate model simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. **132**, s. 515–527. ISSN 1434-4483. Dostupné z: doi:10.1007/s00704-017-2102-0.
- CHENG, L., AGHAKOUCHAK, A., GILLELAND, E., KATZ, R. W., 2014. Non-stationary extreme value analysis in a changing climate. *Climate Change*, Vol. **27**, s. 353–69. ISSN 0165-0009.
- CHENG, L., AGHAKOUCHAK, A., 2015. Nonstationary Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves for Infrastructure Design in a Changing Climate. *Scientific Reports Nature*, Vol. **4**, s. 7093. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep07093.
- COLES, S. G., 2001. An introduction to statistical modeling of extreme values. London: Springer-Verlag. ISBN 978-1-4471-3675-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4471-3675-0.
- FUKUTOME, S., SCHINDLER, A. C. A., CAPOBIANCO A., 2018. MeteoSwiss extreme value analyses: User manual and documentation. *Technical Report*, No. 255. Zurich: MeteoSwiss. 80 s. ISSN 2296-0058.
- HUARD, D., MAILHOLT, A., DUCHESNE, S., 2010. Bayesian estimation of intensity-duration-frequency curves and of the return period associated to a given rainfall event. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. **24**, s. 337–347. ISSN 1436-3259.
- HEBÁK, P., 2012. A Comparison of Classical and Bayesian Probability and Statistics (2). *Acta Oeconomica Pragensia*, Vol. **20**, Issue. 2, s. 77–92. e-ISSN 1804-2112. Dostupné z doi: 10.18267/j.aop.365.
- GAÁL, L. et al., 2009. Metódy výpočtu štatistických charakteristík návrhových hodnôt úhrnov zrážok na Slovensku. Ostrava: Key Publishing, 224 s. ISBN 978-80-7418-047-7.
- KOUTSOYIANNIS, D., 2004a. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I, Theoretical investigation. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. **49**, Issue 4, s. 590, ISSN 2150-3435. Dostupné z doi:10.1623/hysj.49.4.575.54430.
- KOUTSOYIANNIS, D., 2004b. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: II, Empirical investigation of long rainfall records. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 49, Issue. 4, s. 610. ISSN 2150-3435. Dostupné z doi:10.1623/hysj.49.4.591.54424.
- KOUTSOYIANNIS, D., KOZONIS, D., MANETAS, A., 1998. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, Vol. **206**, s. 118–135. ISSN 1879-2707.
- KUPČO, M., NEJEDLÍK, P., ONDERKA, M., 2021. Problém určovania intenzít krátkodobých dažďov na Slovensku. *Meteorologický časopis*, roč. **24**, s. 3–10. ISSN 1335-339X.
- LAKATOS, M., IZSÁK, B., SZENTES, O., HOFFMANN, L., KIRCSI, A., BIHARI, Z., 2020. Return values of 60-minute extreme rainfall for Hungary. *Időjárás*, Vol. **124**, Issue 2, s. 143–156. ISSN 2677-187X. Dostupné z doi:10.28974/idojaras.2020.2.1.
- LIMA, C. H. R., KWON, H. H., KIM, Y. T., 2018. A local-regional scaling-invariant Bayesian GEV Model for estimating rainfall IDF curves in a future climate. *Journal of Hydrology*, Vol. **566**, s. 73–88. ISSN 1879-2707.
- LUTZ, J., GRINDE, L., DYRRDAL, A. V., 2020. Estimating rainfall design values for the city of Oslo, Norway – Comparison of methods and quantification of uncertainty. *Water*, Vol. **12**, s. 1735. ISSN 2073-4441. Dostupné z doi:10.3390/w12061735.
- ONDERKA, M., PECHO, J., NEJEDLÍK, P., 2020. On how rainfall characteristics affect the sizing of rain barrels in Slovakia. *Journal of Hydrology – Regional Studies*, Vol. **32**, s. 100747. ISSN 2214-5818. Dostupné z doi: 10.1016/j.ejrh.2020.100747.
- ONDERKA, M., PECHO, J., 2021. Sensitivity of selected summertime rainfall characteristics to pre-event atmospheric and near-surface conditions. *Atmospheric Research*, Vol. **259**, s. 105671. ISSN 1873-2895. Dostupné z doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105671.
- ONDERKA, M., PECHO, J., MARKOVIČ, L., NEJEDLÍK, P., 2020. Are rainfall extremes becoming non-stationary due to global warming? A case-study from Slovakia. *Meteorologické zprávy*, Vol. **73**, s. 138–145. ISSN 0026-1173.
- PAPALEXIOU, S. M., KOUTSOYIANNIS, D., 2013. Battle of extreme value distributions: A global survey on extreme daily rainfall. *Water Resources Research*, Vol. **49**, s. 187–201. ISSN 0043-1397. Dostupné z doi:10.1029/2012WR012557.
- RATH, J., ROY, S., BUTCHER, J., 2017. Intensity duration frequency curves and trends for the city of Seattle. Technical Memorandum, Seattle Public Utilities CSO Reduction Program [online]. [cit. 12. 5. 2022]. Dostupné z WWW: http://climatechange.seattle.gov/wp-content/uploads/2018/01/Seattle-IDF-Curve-Update-TM_12-29-2017.pdf.
- RAGNO, E., AGHAKOUCHAK, A., CHENG, L., SADEGH, M., 2019. A generalized framework for process-informed nonstationary extreme value analysis. *Advances in Water Resources*, Vol. **130**, s. 270–282. ISSN 1872-9657. Dostupné z doi: 10.1016/j.advwatres.2019.06.007.
- RENARD, B., GARRETA, V., LANG M., 2006. An application of Bayesian analysis and Markov chain Monte Carlo methods to the estimation of a regional trend in annual maxima. *Water Resources Research*, Vol. **42**, Issue 12. ISSN 1944-7973. Dostupné z doi:10.1029/2005WR004591.
- SADEGH, M., RAGNO, E., AGHAKOUCHAK, A., 2017. Multivariate Copula Analysis Toolbox (MvCAT): Describing dependence and underlying uncertainty using a Bayesian framework. *Water Resources Research*, Vol. **53**, s. 5166–5183. ISSN 1944-7973. Dostupné z doi:10.1002/2016WR020242.
- ŠAMAJ, F., VALOVIČ, Š., 1973. Intenzity krátkodobých dažďov na Slovensku. *Zborník prác Hydrometeorologického ústavu*, č. **5**, s. 84. Bratislava: Slovenské pedagogické nakladateľstvo.
- SERINALDI, F., KILSBY, C., 2014. Rainfall extremes: Toward reconciliation after the battle of distributions. *Water Resources Research*, Vol. **50**, Issue 1, s. 336–352. ISSN 1944-7973. Dostupné z doi:10.1002/2013WR014211.
- ULRICH J., FAULER F. S., RUST H. W., 2021. Modeling seasonal variations of extreme rainfall on different time scales in Germany. *Hydrology and Earth Science Systems*, Vol. **25**, Issue 12, s. 6133–6149. Dostupné z doi: <https://doi.org/10.5194/hess-25-6133-2021>.
- URCIKÁN, P., IMRIŠKA, L., 1986. Stokovanie a čistenie odpadových vôd. Tabuľky na výpočet stôk. Bratislava: ALFA-SNTL.

Lektoři (Reviewers):

Mgr. Ondřej Ledvinka, Ph.D., prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Strukturovaná verifikace předpovědí srážek produkovaných současnou konfigurací modelu ALADIN-CZ

Structured verification of the QPF produced by the current configuration of the ALADIN-CZ model

Petr Zacharov, Daniela Řezáčová

Ústav fyziky atmosféry AVČR, v. v. i.
Boční II/1401, 141 00, Praha 4-Spořilov
✉ petas@ufa.cas.cz, rez@ufa.cas.cz

Radmila Brožková

Český hydrometeorologický ústav
Na Šabatce 17, 143 06, Praha 4-Komořany
✉ radmila.brozakova@chmi.cz

The study presents verification results of precipitation forecasts produced by the current version of the ALADIN model. Traditional and spatial verification methods are applied to 1 h precipitation amounts and the results of the MERGE algorithm are used as verification data. The precipitation forecasts are verified for the time period from 1. 4. 2020 to 30. 9. 2020, starting at 00:00 UTC and the lead time 1 h–72 h. Precipitation categories are defined according to (a) the mean precipitation (R_{mean}) and the maximum precipitation (R_{max}) over the verification domain, and (b) the grid point elevation.

The four (a) categories were defined on the basis of diagnostic R_{mean} and R_{max} values to represent: no precipitation, weak precipitation, convective type of precipitation and high precipitation amount cases. First, the correlations between diagnostic and prognostic characteristics, all categories together, were determined as high. Next, the traditional verification comprised the mean error (ME), the mean absolute error (MAE), and the root-mean-square error (RMSE). The spatial verification used the SAL and FSS method. In general, verification results differ significantly depending on the category and method used. Particularly, the high precipitation amounts of the last category D were spatially verified as well predicted. The spatial verification showed a better model skill than the traditional point-wise verification in case of afternoon precipitation. This is likely due to the well-known double penalty problem pronounced more in case of afternoon showers and thunderstorms.

Only the traditional verification could be applied to the elevation categories (b). The results indicate the increase of errors with increasing elevation. Nevertheless, the differences among category medians are of the order of 0.01 mm only, and they are not important from a practical point of view.

KLÍČOVÁ SLOVA: předpověď srážek kvantitativní – verifikace předpovědi prostorová – model ALADIN-CZ – metoda SAL – metoda FSS – struktura srážkového pole – srážky konvektivní – srážky vrstevnaté

KEYWORDS: quantitative precipitation forecast – spatial forecast verification – ALADIN-CZ model – SAL method – FSS method – structure of precipitation field – convective precipitation – stratiform precipitation

1. Úvod

Tato studie přímo navazuje na práci Zacharova et al. (2019), v níž byly popsány výsledky tradiční i prostorové verifikace pro soubor předpovědí srážek provedených modelem Aladin s modelovým rozlišením 4,711 km. Byly také ukázány první jednoduché příklady verifikace strukturované podle globálních charakteristik pole srážek. Už v době publikování uvedené studie pracoval model Aladin v konfiguraci s nehydrostatickým dynamickým jádrem a s větším rozlišením 2,325 km. Základní popis všech změn zahrnutých do nové konfigurace lze nalézt v práci Brožkové et al. (2019).

Vhodná verifikace předpovědi srážek v modelech s vysokým rozlišením je stále předmětem intenzivního studia. Mezinárodní projekt ICP (The Spatial Forecast Verification Methods Inter Comparison Project; Gilleland et al. 2010) zavedl pojem prostorových metod a jejich klasifikaci. Navazující projekt Mesovict (Mesoscale Verification Inter-Comparison over Complex Terrain; Dorninger et al. 2018) se věnoval verifikaci ansámbových předpovědí a definoval řadu schémat pro strukturu srážkových polí a jejich verifikaci (viz např. Gilleland et al. 2020; Buschow, Friedrichs 2021). Výsledky mohou sloužit především k porovnávání kvality nových prostorových verifikačních technik. V této studii se věnujeme verifikaci provozní předpovědi srážek, aplikujeme obecně používané verifikační metody a snažíme se strukturu srážkových polí a kvalitu předpovědi vystihnout pomocí globálních charakteristik.

Prvním cílem studie je proto diskutovat výsledky verifikace předpovědi modelu ALADIN CZ se současným rozlišením. Sledujeme také vliv struktury srážkového pole a nadmořské výšky na kvalitu předpovědi. Verifikační data byla stanovena s využitím algoritmu MERGE (Novák, Kyznarová 2016), který je provozně používán pro vytvoření informace o srážkách sloučením radarových a pozemních dat. Časové období, v němž lze využít radarovou informaci, odpovídá současnému stavu provozních předpovědí srážek. Druhým cílem této studie je proto

posoudit možnost využití charakteristik struktury prognostického pole srážek pro stanovení vhodných kategorií, které odliší výsledky verifikace u srážek různé velikosti a z převládající konvektivní a stratiformní oblačnosti. Na základě stanovení vazby mezi výsledky verifikace a kategoriemi vycházejícími z globálních charakteristik srážkového pole bude možné zhodnotit kvalitu předpovědi srážek i v budoucí klimatické verzi modelu určené pro analýzu v režimu klimatické změny.

V dalším textu budeme pro termín kvantitativní předpověď srážek užívat zkratku QPF (z angl. Quantitative Precipitation Forecast), viz také studie Zacharova et al. (2019).

2. Použitá vstupní data

Pro testování kvality QPF jsme použili soubor předpovědí za období 1. 4. 2020–30. 9. 2020 se startem v 00:00 UTC a dobou trvání předpovědi 1–72 h. Jde tedy o 183 dní a 13 176 hodinových prognostických úhrnů ve všech gridech verifikační domény.

Prognostické hodinové srážkové úhrny byly stanoveny ve 281×181 gridových bodech (g. b.) modelové domény. Ta byla redukována na vnořenou verifikační doménu obsahující modelové g. b. 33 až 245 ve směru osy x a g. b. 29 až 155 ve směru osy y . Verifikační doména tedy zahrnuje 28 321 g. b.

Soubor verifikačních dat je tvořen sloučením radarové informace a pozemních srážkových úhrnů z území ČR s využitím



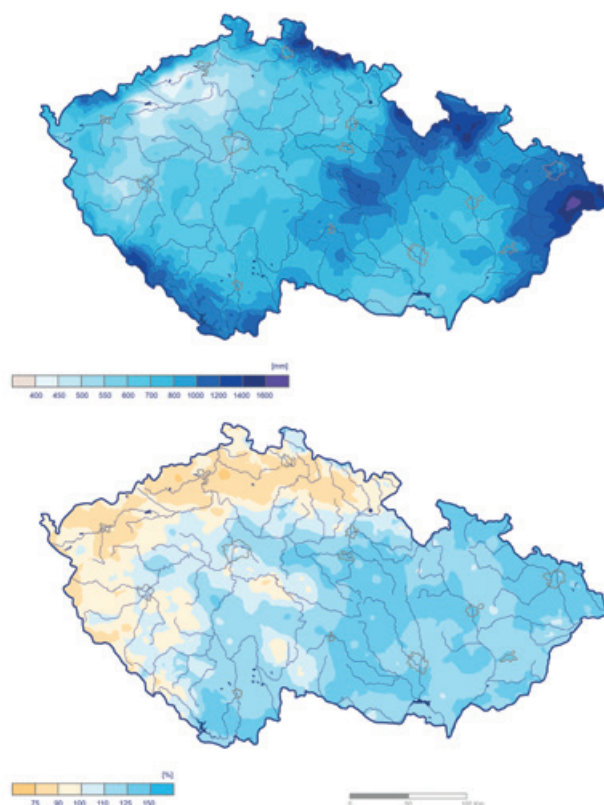
Obr. 1 Modelová a verifikační doména modelu Aladin obsahující 1 053 × 837 g. b., verifikační doména je vyznačena červeně ohraničeným obdélníkem.

Fig. 1. Model domain and verification domain for the Aladin model covering 1,053 × 837 of grid points, the verification domain is marked by a red bordered rectangle.

Tab. 1 Měsíční srážky v roce 2020 (S) porovnané s dlouhodobým srážkovým normálem 1981–2010 (N), třetí řádek je úhrn srážek (S) v % normálu 1981–2010 (%). Tučně jsou zaznamenány údaje ze sledované verifikační periody (zdroj chmi.cz 2021).

Table 1. Monthly precipitation in 2020 (S) as compared with precipitation normal 1981–2010 (N). The third line gives the precipitation expressed in percentage of normal values (%). The data from the summer verification period are shown in bold (source chmi.cz 2021).

2020	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I–XII
S [mm]	19	78	36	18	75	152	61	111	74	92	22	28	766
N [mm]	44	38	48	42	69	79	88	80	58	43	49	50	686
%	43	205	75	43	109	192	69	139	128	214	45	56	112



Obr. 2 Hodnota ročního úhrnu srážek v roce 2020 (horní obrázek) a roční úhrn vyjádřený v % normálu (dolní obrázek). Převzato z Tolasz et al. (2021).

Fig. 2. The annual precipitation total in 2020 (upper figure) and total values in % of normal (lower figure) adopted from the study Tolasz et al. (2021).

produktu MERGE (Novák, Kyznarová 2016), přičemž dosah meteorologických radarů ČHMÚ je limitující složkou pro definici verifikační domény. Sloučená verifikační data zahrnují 1hodinové srážkové úhrny, jsou k dispozici s horizontálním rozlišením 1 km a byla převedena do sítě modelových gridů. Modelová a verifikační doména jsou ukázány na obr. 1.

Jak uvádí studie Tolasz et al. (2021), patří v České republice rok 2020 s ročním srážkovým úhrnem 766 mm mezi roky srážkově nadnormální. Normál za období 1981–2010 je v Česku 686 mm. Roční srážkové úhrny na území ČR jsou vyznačeny na obr. 2.

Srovnání měsíčních srážkových úhrnů s klimatickým normálem (Tolasz et al. 2021) ukazuje, že nejvíce srážek, v průměru 151 mm, tj. 191 % normálu, spadlo v červnu a nejméně, v průměru jen 18 mm, to je 43 % normálu, v dubnu. V období sledovaném v této studii se klasifikace jednotlivých měsíců značně liší. Duben je klasifikován jako srážkově silně podnormální, květen srážkově normální, červen srážkově mimořádně nadnormální, červenec podnormální, srpen a září nadnormální, říjen silně nadnormální (viz tab. 1).

Ve sledované verifikační periodě je výrazné měsíční maximum v červnu, kdy se na území ČR vyskytly opakovaně vydatné srážky doprovázené silnou povodňovou odezvou. Studie Šrámka et al. (2021) obsahuje zhodnocení

příčin, průběhu i předpovědi červnových povodní z pohledu předpovědní meteorologické služby. Uvádí, že z hlediska denních srážek lze červen 2020 rozdělit do pěti období s vydatnějšími srážkami. Mezi jednotlivými obdobími byly denní srážkové úhrny relativně nižší, nenulové srážky se však v červnu 2020 vyskytly každodenně. Extrémní srážkové období bylo zaznamenáno od 18. do 20. června, kdy spadlo v ČR v průměru 43 mm srážek.

3. Použité verifikační techniky

Na verifikaci předpovědi srážek lze pohlížet dvěma způsoby. V prvním případě se hodnotí přímá bodová shoda předpovědi a měření. Takový přístup je zaměřen spíše uživatelsky, protože konzument předpovědi vyžaduje přesnou předpověď v zájmovém místě. Pro tento způsob verifikace používáme tzv. tradiční metody verifikace, které zahrnují např. spojitě chyby předpovědi, nebo kritéria úspěšnosti odvozená z kontingenční tabulky. Význam těchto metod je oslaben tzv. problémem dvojitého trestu (angl. „double penalty“), kdy i nevýznamná chyba v lokalizaci srážek je penalizována dvakrát (chybný výskyt i chybné vynechání výskytu).

Ve druhém případě je požadavek přesné shody uvolněn a hodnotí se shoda určitých vlastností srážkových objektů, nebo shoda rozdělení srážek v prostoru. Jde o způsob orientovaný spíše na modelářské využití, neboť dokáže najít v předpovědi shodu s měřením, aniž by nastala zcela přesná shoda bodová. Metody používané v této kategorii verifikace umožňují odbourat problém dvojitého trestu, který je typický hlavně pro předpověď s vysokým rozlišením, pro kterou byly prostorové a objektové verifikační techniky vytvořeny. V této studii navazujeme na soubor metod, který byl použit v předchozích studiích (Zacharov, Řezáčová 2010; Rezacova et al. 2015; Zacharov et al. 2013; 2019), proto jejich popis uvádíme jenom jako stručnou informaci o principu metody.

3.1 Tradiční verifikace

Mezi metody tradiční verifikace použité v tomto článku patří spojitě chyby předpovědi, a to střední chyba (*ME*), střední absolutní chyba (*MAE*) a střední kvadratická chyba (*RMSE*). Zatímco *ME* hodnotí bias předpovědi, tzn. průměrný rozdíl mezi předpovědí a měřením, *MAE* hodnotí průměrnou absolutní hodnotu tohoto rozdílu. *RMSE* hodnotí také průměrnou velikost rozdílu, ale navíc ještě více penalizuje předpovědi s vyššími odchylkami.

Další skupinou tradičních metod je vyjádření úspěšnosti pomocí kritérií založených na kontingenční tabulce. Tato tabulka představuje porovnání binární předpovědi a měření, v praxi nahrazené počtem předpovědi a měření, která převyšují určitý zvolený práh srážek. Z porovnání počtu úspěšných předpovědí, falešných poplachů, nezachycených předpovědí a správně předpovězeného nepřekročení zvoleného prahu jsou odvozena kritéria jako např. *POD* (pravděpodobnost detekce), *FAR* (poměr falešných poplachů), *CSI* (Critical Success Index) a frekvenční bias. Pro definice všech těchto tradičních verifikačních metod odkážeme čtenáře na předchozí literaturu, např. Zacharov, Řezáčová 2010; Zacharov et al. 2013; 2019; Wilks 2019. Ze zmíněných tradičních verifikačních metod a kritérií používáme v této studii tři výše uvedené typy chyb, které považujeme za dostatečně reprezentativní pro vystižení strukturálních rozdílů tradičními metodami.

3.2 Metoda SAL

Na rozdíl od tzv. objektových metod, které posuzují vzájemně přiřazené prognostické a diagnostické srážkové objekty, porovnává metoda *SAL* vlastnosti objektů nalezených v poli měření a předpovědi bez nutnosti jejich vzájemného přiřazení (Wernli et al. 2008; Zacharov et al. 2019). Zejména při předpovědi konvektivních srážek může model vytvářet odlišné cirkulace, a tedy i odlišnou strukturu objektů srážkového pole od pole reálně podloženého měřením.

Metoda *SAL* identifikuje diagnostické i prognostické objekty pomocí zvolené prahové srážky (intenzity) a sleduje tři souhrnné charakteristiky srážkového pole označené jako struktura (*S*), amplituda (*A*) a lokalizace (*L*). Prahová srážka pro definici objektů je stanovena buď absolutně, nebo relativně, kdy pro vhodnou prahovou hodnotu R_{TH} navrhuji autoři *SAL* empirický vztah (Wernli et al. 2008)

$$R_{TH} = R_{95} / 15, \quad (1)$$

kde R_{95} značí 95% percentil všech gridových hodnot, v nichž srážkový úhrn překračuje 0,1 mm. Volba hodnoty 15 je založena na empirickém poznatku, že takto definované objekty dobře odpovídají vizuálnímu vnímání. Vzhledem k tomu, že je udaná prahová hodnota shodu poměrně malá, použili jsme dále ještě $R_{95} / 10$ a $R_{95} / 5$.

Kritérium A (amplituda) charakterizuje normalizovaný rozdíl mezi středními hodnotami předpovězených a naměřených srážek. Kladné hodnoty *A* indikují přecenění střední předpovězené srážky, záporné naopak její podcenění. *A* nabývá hodnot v rozsahu -2 až $+2$ a pro perfektní předpověď ve smyslu kritéria *A* má hodnotu 0.

Mírou shody prostorové struktury srážkových polí je **kritérium L (lokalizace)**, které je součtem dvou složek L_1 a L_2 . Složka L_1 nabývá hodnot v intervalu $(0, 1)$ a charakterizuje normalizovanou vzdálenost mezi těžišti polí předpovězených a naměřených srážek. Hodnota $L_1 = 0$ indikuje, že obě těžiště mají identickou polohu. Složka L_2 hodnotí shodu diagnostické a prognostické střední vzdálenost mezi těžištěm srážkového pole a těžišti jednotlivých srážkových objektů. Hodnota L_2 je větší než nula, pokud se v poli naměřených srážek vyskytují objekty v jiné vzdálenosti od celkového těžiště než v poli předpovězených srážek. Hodnota L_2 má stejný rozsah jako L_1 a kritérium *L* tedy nabývá hodnot v intervalu $<0, 2>$.

Kritérium S (struktura) hodnotí celkovou shodu prognostických a diagnostických srážkových objektů. Nabývá hodnot v rozsahu -2 až $+2$. Kladné hodnoty indikují, že prognostické objekty jsou příliš velké, nebo příliš ploché. Záporné hodnoty naopak ukazují, že prognostické objekty jsou příliš malé, nebo s příliš výrazným maximem.

Z kombinace charakteristik *S* a *A* můžeme usuzovat na:

- $S \sim 0$ a $A \sim 0$: perfektní předpověď (hit),
- $S \sim 2$ a $A \sim 2$: příliš velké objekty a přecenění srážek (false alarm)
- $S \sim 2$ a $A \sim -2$: příliš velké objekty a podcenění srážek – příliš stratiformní srážky
- $S \sim -2$ a $A \sim 2$: příliš malé objekty a přecenění srážek – příliš konvektivní srážky
- $S \sim -2$ a $A \sim -2$: příliš malé objekty a podcenění srážek (miss).

3.3 Metoda FSS

Verifikační metoda FSS (z angl. Fractions Skill Score, Roberts 2008; Roberts, Lean 2008) představuje prostorovou verifikační metodu, která posuzuje shodu rozdělení frakce nadprahové srážky, která je stanovena ve zvolených zájmových oblastech EA (z angl. Elementary Area) dané velikosti. Stejně jako u SAL se definuje prahová srážka (intenzita) R_{TH} a pole předpovězených i naměřených srážek se převede na binární pole podle tohoto prahu. FSS je pak míra shody prognostických a diagnostických frakcí nadprahových hodnot v EA oblastech. Parametry pro výpočet FSS je kromě prahové srážky i velikost zájmové oblasti EA. Tato oblast je postupně přiřazena okolí každého bodu verifikační domény a výsledná FSS je stanovena z frakcí ve všech EA na verifikační doméně. Pro závislost FSS(EA) můžeme využít koncept překročení referenční hodnoty $FSS_{uniform}$, která je definovaná vztahem

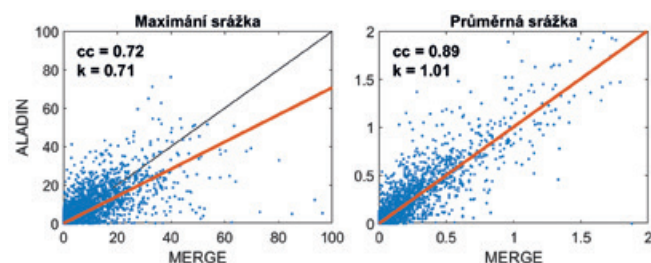
$$FSS_{uniform} = 0,5 / f_0, \quad (2)$$

kde f_0 značí pozorovanou relativní četnost gridů v celé verifikační doméně, v nichž je překročena prahová hodnota R_{TH} . Velikost EA, při níž $FSS(EA)$ odpovídá referenční hodnotě, je potom kritickou minimální hodnotou měřítka, pro něj je předpověď považována za užitečnou (Zacharov et al. 2019). Kvalitu souboru předpovědí pak charakterizujeme relativní četností hodnot FSS větších než referenční hodnota $FSS_{uniform}$ pro danou velikost EA.

4. Výsledky verifikace předpovědi srážek

4.1 Definice srážkových kategorií

Jako základní charakteristiky srážkového pole byly zvoleny střední a maximální hodnota srážek stanovená pro daný termín a přes všechny uvažované gridové body. Pro prognostické (modelové) i diagnostické (verifikační) srážky tak získáváme soubor hodnot pro střední hodnotu srážek (R_{mean}) a pro maximální hodnotu srážek (R_{max}). Jednoduché porovnání prognostických a diagnostických hodnot R_{mean} a R_{max} , které využívá lineární regresi je znázorněno na obr. 3.



Obr. 3 Scatterplot ALADIN vs. MERGE, levý panel představuje srovnání maximálních srážek (R_{max}) a pravý panel průměrných srážek (R_{mean}). Červeně je znázorněná regresní přímka procházející počátkem, hodnota k představuje směrnici regresní přímky. Hodnota cc představuje korelaci mezi měřením a předpovědí.

Fig. 3. The scatter plot of ALADIN vs. MERGE parameters indicates the corresponding values of R_{max} (left panel) and R_{mean} (right panel). The red straight line represents the regression line with the slope k given in the legend. The cc value gives the correlation between measurement and forecast.

Tab. 2 Rozdělení srážkových polí do čtyř kategorií. Ve třetím sloupci tabulka udává počet diagnostických srážkových polí s odpovídajícími hodnotami R_{mean} a R_{max} .

Table 2. The distribution of precipitation fields into four categories. The third column gives the numbers of diagnostic precipitation fields with the corresponding R_{mean} and R_{max} values.

A	$R_{max} < 1$ & $R_{mean} < 0,1$	6 220	Žádné srážky
B	$1 \leq R_{max} < 5$	2 919	Malé srážky
C	$R_{max} \geq 5$ & $R_{mean} < 0,5$	3 239	Konvektivní srážky
D	$R_{max} \geq 5$ & $R_{mean} \geq 0,5$	798	Velké srážky
N	Všechny srážky	13 176	

Tab. 3 Roztřídění do srážkových kategorií u diagnostických dat (MERGE) a prognostických dat (ALADIN). Procenta na krajích řádků a sloupců vyznačují poměr správně předpovězené kategorie srážek v rámci celé kategorie. Procento vpravo dole vyznačuje poměr všech správně přiřazených kategorií v rámci celého souboru dat.

Table 3. The partition of diagnostic data (MERGE) and prognostic data (ALADIN) into precipitation categories. Percent values at rows and columns give the ratio of correct precipitation forecasts in each category. The value right below gives the percentage of all correctly determined categories for the whole data set.

		MERGE				
		A	B	C	D	
ALADIN	A	5089	676	252	2	85 %
	B	937	1478	671	31	47 %
	C	190	683	2019	213	65 %
	D	4	82	297	552	59 %
		82 %	51 %	62 %	69 %	69 %

Obrázek dokumentuje kvalitní vztah mezi diagnostickými a prognostickými hodnotami obou charakteristik. Korelace maximálních hodnot R_{max} dosahuje 0,72 a je snížena několika odlehlými hodnotami. Při vynechání čtyř bodů s vysokými diagnostickými hodnotami R_{max} , které předpověď nezachytíla, roste korelace na 0,75. Také směrnice regresní přímky vzrostla z hodnoty 0,71 na hodnotu 0,75. U průměrné srážky přes verifikační doménu R_{mean} dosahuje korelace výborných 0,89, což je podpořeno i směrnici regresní přímky, která se hodnotou 1,01 příliš neliší od optimální hodnoty 1. Čtyři vynechané body odpovídají situaci, kdy se na území ČR vyskytla pouze jedna přeháňka, která se navíc takřka nepohybovala a vytvořila tak velký srážkový úhrn. Vzhledem k tomu, že se v dané době v ČR žádná jiná srážka nevyskytla, jedná se o těžko předpověditelný jev.

Na základě obou charakteristik byly definovány kategorie srážkových polí vystihující základní vlastnosti konvektivních a stratiformních srážek. Pro spíše lokální krátkodobé konvektivní srážky menšího plošného rozsahu jsou v zásadě charakteristické vysoké hodnoty R_{max} v kombinaci s nízkými hodnotami R_{mean} . U plošně rozsáhlejších stratiformních srážek čekáme spíše nižší hodnoty R_{max} v kombinaci s vyššími hodnotami R_{mean} . Vzhledem k variabilitě srážek a jejich plošného rozložení je jisté třeba tuto základní charakterizaci chápat značně volně.

Výsledkem souboru experimentů s různými volbami prahových hodnot pro R_{mean} a R_{max} je rozdělení do kategorií znázorněné v tab. 2, které bylo zvoleno pro tuto studii. Jde o diagnostické kategorie určené na základě diagnostických srážkových polí.

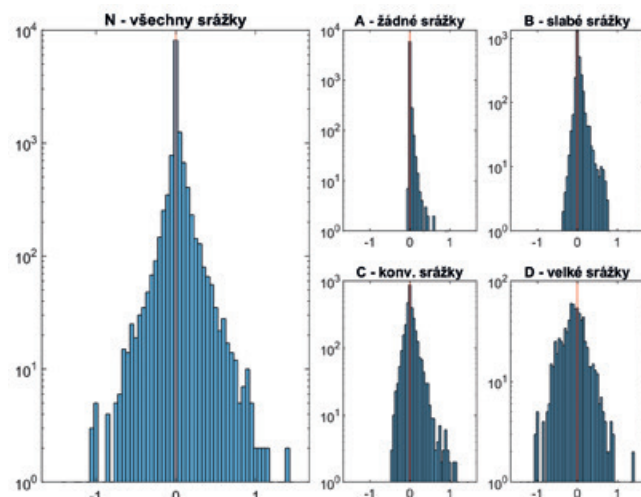
Definice kategorií uvedená v tab. 2 byla aplikovaná na výsledky předpovědi srážek a výsledné zařazení do prognostických a diagnostických kategorií je uvedeno v tab. 3.

V diagonálních polích je obsaženo 69,4 % celkového počtu hodnot, tzn., že cca 70 % srážek bylo předpovězeno do správné kategorie. Celkem 26,4 % předpovědí spadá do sousední kategorie a pouze 4,3 % předpovědí v rozích tabulky se zařadilo zcela chybně.

Z 26,4 % nepřesně zařazených předpovědí dává ALADIN v 11,8 % nižší sousední kategorii (realita je výš) a ve 14,5 % vyšší sousední kategorii (realita je niž).

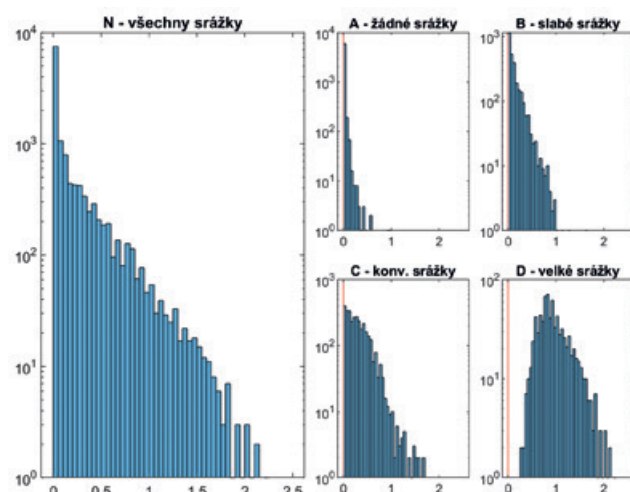
4.2 Aplikace tradiční verifikace

V rámci tzv. tradiční verifikace byly stanoveny tři typy spojitě chyby předpovědi a to střední chyba (ME), střední absolutní chyba (MAE) a střední kvadratická chyba ($RMSE$). Rozdělení četnosti ME , která charakterizuje bias předpovědi, je znázorněno na obr. 4 pro celý soubor předpovědí i pro jednotlivé



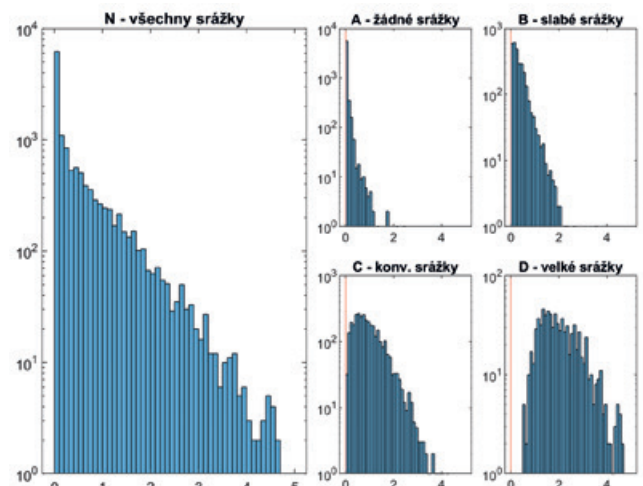
Obr. 4 Střední chyba ($ME \sim ALADIN-MERGE$) pro celý soubor předpovědí N a pro jednotlivé kategorie A, B, C a D.

Fig. 4. Mean error ($ME \sim ALADIN-MERGE$) for the whole set of N forecasts and for A, B, C, and D categories.



Obr. 5 Střední absolutní chyba (MAE) pro celý soubor předpovědí a pro jednotlivé kategorie A, B, C a D.

Fig. 5. Mean absolute error (MAE) for the whole set of N forecasts and for A, B, C, and D categories.

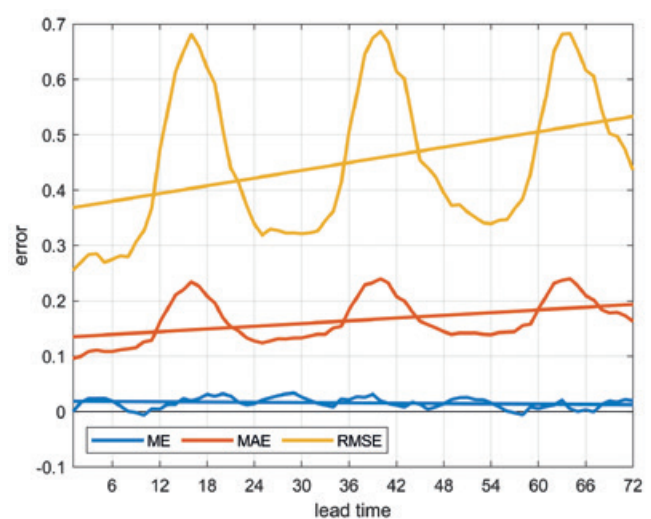


Obr. 6 Střední kvadratická chyba ($RMSE$) pro celý soubor předpovědí a pro jednotlivé kategorie A, B, C a D.

Fig. 6. The root-mean-square error ($RMSE$) for the whole set of N forecasts and for A, B, C, and D categories.

kategorie. Na celkovém histogramu je zřejmá jeho symetrie, která znamená analogický počet nadhodnocených a podhodnocených předpovědí. Zcela převažující rozsah hodnot ME je v intervalu od -1 k $+1$ s maximem u nulové hodnoty. U jednotlivých kategorií se projevují v chování histogramu podstatné rozdíly.

U kategorie A (beze srážek) se setkáváme s omezeným počtem hodnot ME nad požadovanou nulou, celkově je počet nadhodnocených předpovědí minimální (cca 7 %), přičemž hodnota ME nepřesahuje 0,5. Výraznější asymetrie rozdělení se projevuje u kategorií B a C. U kategorie B je nadhodnoceno 41 % předpovědí. Předpovědi kategorie C (konvektivní srážky) jsou nadhodnoceny v 40 % případů, přičemž jenom 0,2 % hodnot ME přesahuje 1. Rozdělení četnosti ME u kategorie D je poměrně symetrické s mírným sklonem k podhod-



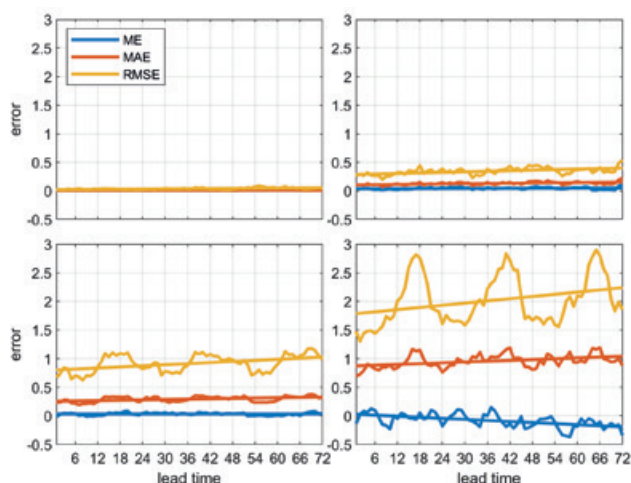
Obr. 7 Závislost chyby předpovědi na době trvání předpovědi v hodinách pro všechny druhy střední chyby definované v legendě obrázku. Jednotlivé regresní přímky vyjadřují trend závislosti na předpovědní době.

Fig. 7. The forecast error in relation to the forecast lead time. All three types of error are shown and indicated in the legend. The regression straight lines express the trend for the dependence on the lead time.

Tab. 4 Směrnice trendu závislosti chyby předpovědi na čase a hladina statistické významnosti hypotézy nulové směrnice (p Value) pro jednotlivé kategorie a chyby. Směrnice jsou v jednotkách mm/h. Tučně uvedené směrnice a odpovídající p Value jsou statisticky významné na hladině 5 %.

Table 4. Linear trend estimation [mm/h] for the time dependence of forecast errors and their statistical significance of null hypothesis (p value) for each precipitation category. The trend and p values in bold are statistically significant at the 5% significance level.

	ME		MAE		RMSE	
	směrnice $\times 10^4$	p Value	směrnice $\times 10^4$	p Value	směrnice $\times 10^4$	p Value
N	-0,8	0,14065	8,2	0,00022	23,2	0,00205
A	1,2	0,00001	1,2	0,00002	4,5	0,00000
B	1,8	0,08348	6,6	0,00000	15,6	0,00000
C	0,1	0,95310	10,1	0,00010	31,5	0,00013
D	-30,8	0,00000	23,6	0,00017	63,8	0,00845



Obr. 8 Jako na obr. 7, ale odděleně pro jednotlivé kategorie A (vlevo nahoře), B (vpravo nahoře), C (vlevo dole) a D (vpravo dole).
Fig. 8. Similar to Fig. 7 but separately for the category A (at the top left), B (at the top right), C (bottom left), and D (bottom right).

nocení předpovědi. Celkově 14,4 % hodnot *ME* je záporných a u 24,3 % hodnot střední chyba *ME* indikuje nadhodnocení předpovědi.

Obdobně se projevují i rozdíly v chování *MAE* a *RMSE* v jednotlivých kategoriích (viz obr. 5 a obr. 6). U těchto chyb je nejpodstatnější, že jejich vysoké hodnoty jsou omezeny na kategorii D, která zahrnuje velké srážky převážně i velkého plošného rozsahu.

Závislost hodnot chyb *ME*, *MAE* a *RMSE* na předpovědní době je znázorněna na obr. 7 pro celý soubor předpovědí a na obr. 8 pro jednotlivé kategorie. Na obr. 7 je zřetelný denní chod u *RMSE* a *MAE* s maximálními hodnotami v odpoledních a podvečerních hodinách. U *ME*, kde se kladné a záporné odchylky kompenzují, není výrazný denní chod zaznamenán a bias předpovědi je nevýrazný. Pozitivním rysem je absence trendu *ME* v průběhu trvání předpovědi. V trendu hodnot *MAE* a *RMSE* lze zaznamenat rostoucí velikost chyby s růstem předpovědní doby.

Denní chod chyby předpovědi pro jednotlivé kategorie je znázorněn na obr. 8 a ukazuje výrazně odlišné časové závislosti sledovaných chyb u jednotlivých kategorií. Prakticky nulová hodnota chyb u kategorie A (beze srážek) odpovídá velmi nízkému počtu nenulových předpovědí u této kategorie (viz tab. 3). S přechodem na kategorie B, C a D roste velikost chyb v celém rozsahu prognostické doby i výraznost denního chodu. U kategorie D je také výrazně rostoucí trend u *RMSE* a *MAE*

a trend klesající do záporných hodnot u *ME*. Z hlediska statistické významnosti (viz tab. 4) roste podcenění pouze u velkých srážek (D), pro ostatní kategorie srážek se bias významně v čase nemění. Naopak pro střední absolutní i kvadratickou chybu je malý růst chyby s předpovědní dobou statisticky významný pro všechny srážkové kategorie. Vzhledem k tomu, že se s časem nemění bias, není nárůst chyb způsoben nárůstem nebo poklesem předpovězených srážek, ale nárůstem odchylek předpovězených od měřených hodnot.

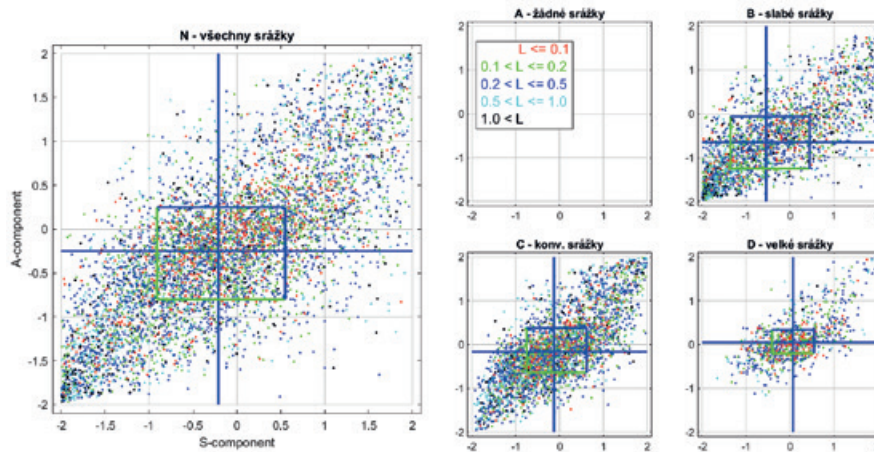
4.3 Verifikace metodou SAL

Při aplikaci metody SAL byly pro definici objektů použity 4 absolutní prahové hodnoty 10, 5, 1, 0,5 mm/h a tři relativní hodnoty $R^*/1$, $R^*/5$ a $R^*/15$, kde R^* je 95% kvantil všech srážkových bodů. Příklad výsledku verifikace pro prahovou hodnotu 1 mm/h je ukázán na obr. 9.

Z obr. 9 je zřejmé, že v kategorii A (žádné srážky) se z definice žádné objekty s prahovou hodnotou 1 mm/h nevyskytují. U kategorií B a C dochází k velkému rozptýlení bodů ve verifikačním grafu zejména v oblasti indikující chybné varování (false alarm). Naopak u kategorie D je významná koncentrace bodů kolem počátku a nejmenší zastoupení předpovězených hodnot (vlevo dole – miss), což se odráží i ve snížené mezikvartilové šířce parametrů *S* i *A*. Výsledky pro další uvažované prahy mají analogické vlastnosti.

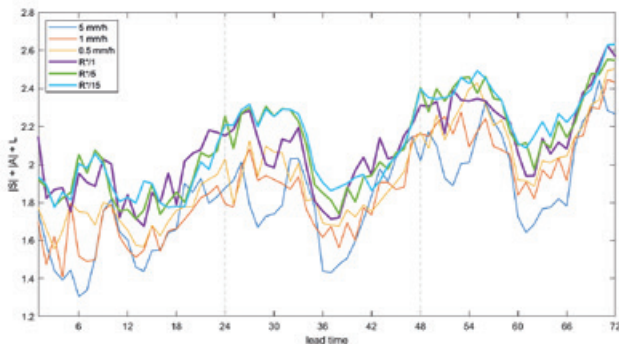
Výsledky pro všechny uvažované prahové hodnoty jsou zahrnuty do grafu na obr. 10. Ten znázorňuje hodnoty součtu absolutních hodnot všech tří kritérií v závislosti na předpovědní době. Jednotlivé křivky i body na křivkách vykazují značný rozptyl, který dokumentuje rozmanitost struktury srážkového pole a definovaných objektů. Nicméně celkem zřetelně vystupuje pokles hodnoty sledovaného součtu, a tedy zvýšená přesnost předpovědi v odpoledních a podvečerních hodinách. To je v zajímavém rozporu s výsledky tradiční verifikace (viz obr. 7 a obr. 8), kde právě v odpoledních a podvečerních hodinách dochází k nejvyšším hodnotám tradičních chyb. Obrázek 11 ukazuje, že průměrné prognostické i diagnostické srážky ve sledovaném období dosahují maxim v odpolední době, což záporně koreluje s chodem součtu velikostí parametrů *S*, *A* a *L*. Z hlediska SAL není tedy nárůst v kvalitě předpovědi (pokles součtu $|S|+|A|+|L|$) z důvodu poklesu srážek, ale v lepší předpovědi srážek. Pokles kvality u výsledků tradiční verifikace je pravděpodobně typickým důsledkem dvojitého trestu, který je klasickým projevem při verifikaci předpovědi s vysokým rozlišením.

Z obr. 10 je patrné, že použití relativních prahů přináší horší výsledky verifikace z hlediska SAL (tučně vykreslené křivky mají vyšší součet $|S|+|A|+|L|$ než tenké křivky absolutních srážek).



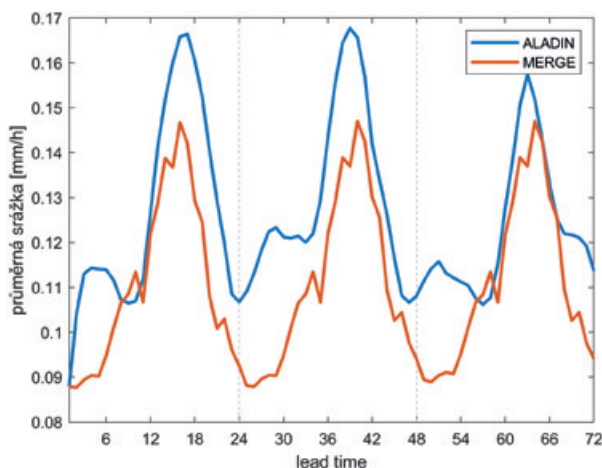
Obr. 9 Výsledek verifikace metodou SAL s využitím prahu 1 mm/h pro všechny předpovědi (vlevo) a pro jednotlivé kategorie (vpravo). Na vertikální ose je parametr A, na horizontální ose parametr S. Barvou je vyznačena stupnice L (viz legenda). Horizontální a vertikální čára představuje medián parametrů S a A, jejich barva medián parametrů L (viz barva v legendě). Obdélník představuje první a třetí kvartil parametrů S a A, barva parametru L.

Fig. 9. The result of verification by the SAL method. The threshold of 1 mm/h has been applied. All forecasts (left) and the forecast structured into categories (right) are considered. The vertical and horizontal axes are scaled according to the parameter A and S, respectively. Colour scale indicates the L parameter (see the legend). The horizontal and vertical lines indicate the medians of S and A parameters, their colour corresponds to the L value. The rectangle represents the first and the third quartiles of S and A, the colour follows again the L value.



Obr. 10 Součet absolutních hodnot tří komponent SAL v závislosti na předpovědní době. Prahové hodnoty pro definici srážkových objektů jsou uvedeny v legendě.

Fig. 10. The sum of absolute value of three SAL components as depending on forecast lead time. The threshold values for precipitation object definitions are given in the legend.



Obr. 11 Průměrná hodnota hodinových srážek přes verifikační doménu v závislosti na předpovědní době.

Fig. 11. The mean hourly precipitation over the verification domain depending on the forecast lead time.

kových prahů). To je způsobeno tím, že při použití relativního prahu se do verifikace dostane větší množství objektů v poli měřených i předpověděných srážek. Tyto objekty představují plochy s nízkými úhrny srážek, které jsou obtížně předpověditelné a zatížené větší chybou, což způsobuje zmíněný lehký nárůst chyby z hlediska SAL.

4.4 Aplikace kritéria FSS

Výsledky hodnocení pomocí kritéria FSS vyjadřujeme jako procento předpovědí, u nichž je hodnota FSS vyšší než referenční klimatická hodnota $FSS_{uniform}$, viz vztah (2). Pro danou prahovou hodnotu srážky závisí výsledek na velikosti plochy EA, na níž je frakce překročení prahové hodnoty hodnocena. Na obr. 12 je souhrn výsledků pro kategorie B, C a D. Pro kategorii A (žádné

srážky) nemá prostorová verifikace tohoto typu význam, protože metoda nenachází žádné nadprahové srážky, jejichž frakce by porovnávala. I v kategorii B (malé srážky) se jednak nachází málo nadprahových srážek a jednak je předpověď malých náhodných srážek velmi obtížná a zatížená velkou chybou. Vyšší práh 5 mm/h je samozřejmě v této kategorii nedetekovatelný. Pokles úspěšnosti s předpovědní dobou není u kategorie B tak markantní jako u vyšších kategorií.

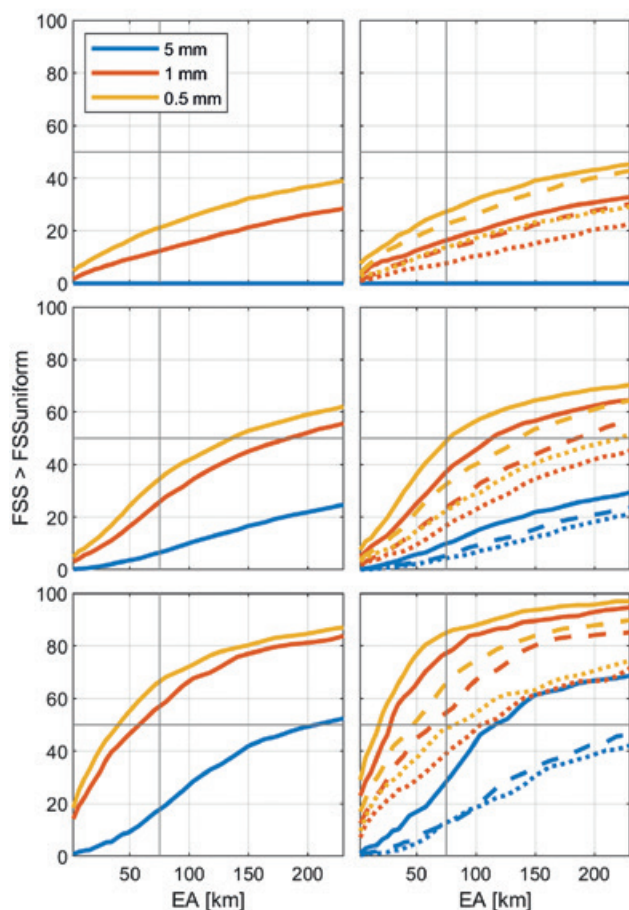
Verifikace kategorií vyšších srážek C a D vykazuje oproti tradiční verifikaci dobré výsledky. Předpovědi na první den mají výrazně vyšší úspěšnost a hranice 50 % úspěšných předpovědí je pro prahy hodinových srážek 1 mm a 0,5 mm překročena už pro EA pod 50 km (kat. D) a 120 km (kat. C); poznamenejme, že průměrný charakteristický rozměr krajů v ČR je 78 km. Z výsledků vyplývá, že předpověď velkých srážek je úspěšná spíše na ploše velikosti krajů než okresů. Pro prahovou hodnotu 5 mm klesá úspěšnost i v kategorii C a D. Jde o hodinové srážky, kdy předpověď nad prahem 5 mm je obtížná a bude zajímavé ji sledovat pro větší datové soubory.

Ze získaných výsledků vyplývá, že ve smyslu hodnocení FSS patří předpověď velkých srážek v kategorii D k neúspěšnější skupině předpovědí.

5. Závislost výsledků verifikace na nadmořské výšce

Při posuzování vlivu nadmořské výšky na chybu předpovědi srážek byly uvažovány 4 kategorie podle klasifikace používané v předpovědi počasí ČHMÚ pro dělení met. jevů podle nadmořské výšky (eMS 2022). Kategorie jsou uvedeny v tab. 5.

Vzhledem ke členitosti povrchu ČR byla zatím závislost chyby na nadmořské výšce vyhodnocována pouze tradičním grido-vým způsobem, protože velká proměnlivost neumožňuje snadné využití prostorových nebo objektových verifikačních metod.



Obr. 12 Závislost počtu užitečných předpovědí v % na velikosti čtvercové elementární plochy EA (velikost hrany EA v km). Legenda uvádí prahovou hodnotu hodinové srážky pro stanovení FSS. Obrázky v prvním řádku odpovídají kategorii B, v druhém řádku kategorii C a ve třetím řádku kategorii D. Levý sloupec uvádí výsledek pro všechny předpovědní doby a ve druhém sloupci jsou křivky pro předpovědi z 1. dne (plné linie), 2. dne (čárkované linie) a 3. dne (tečkované linie). Šedá horizontální linie představuje hranici 50 % úspěšných předpovědí, a šedá vertikální linie vyznačuje střední charakteristický rozměr krajů ČR.

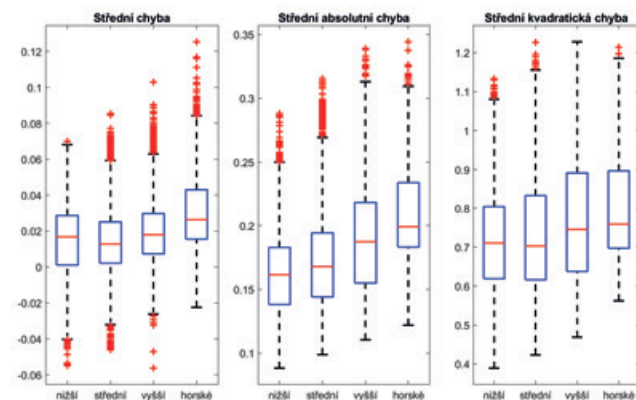
Fig. 12. The percentage of useful forecasts in relation to the squared EA size (the EA side in km). The legend gives the 1 h precipitation threshold for FSS determination. The figures in the 1st row correspond to the B category, the 2nd row is for the C category and the 3rd row is for the D category. The left column shows the result for all the forecast lead times, and the right column shows the results for the 1st day forecasts (full lines), 2nd day forecasts (dashed lines), and 3rd day forecasts (dotted line). Grey horizontal line shows the threshold of 50 % useful forecasts, the vertical grey line represents the mean characteristic size of Czech subregions.

Výsledky hodnocení pomocí ME, MAE a RMSE jsou shrnuty na obr. 13. I když je z obrázku patrné, že každá chyba obecně roste s výškovou kategorií, rozdíly v mediánech jsou minimální. Odpovídají 0,01 mm pro ME, 0,04 pro MAE a 0,05 pro RMSE. Nicméně z analýzy rozptylu (ANOVA, viz např. Meloun, Militký 2002) vyplývá, že u všech tří chyb je rozdíl mezi mediány signifikantní. Statisticky významný rozdíl tedy naznačuje, že chyba předpovědi srážek roste s nadmořskou výškou, ale rozdíly jsou z hlediska praktického využití minimální.

Tab. 5 Rozdělení gridů do kategorií podle nadmořské výšky (zdroj eMS 2022).

Table 5. The distribution of grid points according to the altitude (source eMS 2022).

Slovní formulace	Nadmořská výška	Počet bodů verif. domény
nižší polohy	do 400 m n. m.	12 996
střední polohy	od 400 včetně do 600 m n. m.	9 425
vyšší polohy	od 600 včetně do 800 m n. m.	2 897
horské polohy	od 800 m n. m. včetně	881



Obr. 13 Boxplot pro střední chybu (vlevo), střední absolutní chybu (uprostřed) a střední kvadratickou chybu (vpravo) pro kategorie podle hodnot nadmořské výšky gridových bodů, pro které byla chyba počítána. Střední červená čára v boxu představuje medián, modré vodorovné čáry horní a dolní kvartil, vousy představují vzdálenost $1,5 \times \text{IQR}$ (mezikvartilová šířka) od spodního/horního kvartilu, délka vousu představuje pozici posledního bodu, který není odlehlý (leží mimo hranici kvartil $\pm 1,5 \times \text{IQR}$), červené křížky představují odlehlé hodnoty.

Fig. 13. The box plot indicating the mean error (left), the absolute error (in the middle) and root-mean-square error (right) of precipitation forecast divided into four categories by elevation. The red line in each box represents median value, blue lines represent first and third quartile, whiskers are shown for $1.5 \times \text{IQR}$ (interquartile range) from first/third quartile and red crosses show the outliers.

6. Diskuze a závěr

Po změně nastavení modelu ALADIN, které se projevuje mimo jiné zvýšením horizontálního rozlišení, jsou operativně k dispozici hodinové srážkové úhrny, které jsme na území ČR verifikovali klasickými i prostorovými metodami. Jako verifikační data jsme použili adjustovaná radarová data MERGE. Verifikace byla strukturovaná (a) do 4 kategorií podle diagnostických hodnot střední (R_{mean}) a maximální (R_{max}) hodinové srážky (viz tab. 2) a (b) opět do 4 kategorií podle nadmořské výšky grido-vého bodu (viz tab. 5). Motivací pro rozdělení srážkových polí do kategorií je možnost použít zvolenou kategorizaci i pro výstupy klimatického modelu včetně závěrů týkajících se rozdílné kvality předpovědi v různých kategoriích.

I když podrobná struktura pole diagnostických a prognostických srážek může být značně odlišná, globální diagnostické a prognostické charakteristiky R_{mean} i R_{max} jsou silně korelované. U hodnoty R_{mean} dosahuje korelace hodnoty 0,89. Korelace hodnot R_{max} dosahuje 0,72 a po vynechání čtyř bodů

s vysokými diagnostickými hodnotami $R_{\max}$, které předpověď nezachytila, roste na 0,75. V soulasu s dobrou korelací jsou diagnostické a prognostické kategorie v dobré shodě. Celkově bylo zařazeno do zcela shodné kategorie 69,4 % srážkových polí a pouze 4,3 % předpovědí byly zařazeny zcela chybně.

Rozdělení do kategorií podle R_{mean} a $R_{\max}$ se projevuje rozdílnými výsledky verifikace předpovědi. Tradiční verifikace prokázala zřetelné rozdíly mezi kategoriemi v hodnotách střední chyby (ME), střední absolutní chyby (MAE) i střední kvadratické chyby (RMSE). Při hodnocení četnosti těchto chyb je nejpodstatnější, že vysoké hodnoty chyb jsou zřetelně omezeny na kategorii D, která zahrnuje velké srážky převážně i velkého plošného rozsahu.

Závislost hodnot chyb ME, MAE a RMSE na předpovědní době ukázala zřetelný denní chod u RMSE a MAE s maximálními hodnotami v odpoledních a podvečerních hodinách opět zejména v kategorii D. U střední chyby ME, kde se kladné a záporné odchylky kompenzují, nebyl výrazný denní chod zaznamenán a jde tedy o nevýrazný bias předpovědi.

Při prostorové verifikaci jsme použili metodu SAL a metodu FSS. Obě metody uvolňují požadavek gridové shody a u obou metod se potvrdila rozdílná kvalita verifikace u jednotlivých kategorií.

Zajímavý závěr vyplývá ze závislosti na předpovědní době u součtu absolutních hodnot kritérií SAL v rozporu s výsledky tradiční verifikace se projevuje pokles hodnoty součtu, a tedy zvýšená přesnost předpovědi v odpoledních a podvečerních hodinách, kdy srážky ve sledovaném období dosahují maxim. Pokles kvality u výsledků tradiční verifikace je pravděpodobně typickým důsledkem dvojitého trestu, který je klasickým projevem při verifikaci předpovědi s vysokým rozlišením.

Kritérium FSS charakterizuje rozdělení frakce nadprahových hodnot srážek nad elementární oblastí dané velikosti EA. Stanoví procento předpovědí, u nichž je hodnota FSS vyšší než referenční klimatická hodnota, a tyto předpovědi lze považovat za užitečné. Pro danou prahovou hodnotu srážky závisí výsledek na velikosti EA.

Výsledky v jednotlivých kategoriích jsou opět značně rozdílné. Pro kategorii A (žádné srážky) metoda nenachází žádné nadprahové srážky, jejichž frakce by porovnávala. I v kategorii B (malé srážky) se nachází nadprahové srážky pouze stopově a jejich předpověď je zatížena poměrně velkou chybou. Verifikace kategorií vyšších srážek C a D vykazuje oproti tradiční verifikaci dobré výsledky. Předpovědi na první den mají výrazně vyšší úspěšnost a hranice 50 % úspěšných předpovědí je pro prahy hodinových srážek 1 mm a 0,5 mm překročena už pro EA pod 50 km (kat. D) a 120 km (kat. C).

Celkem lze shrnout, že vysoké srážkové úhrny vyjádřené kategorií D jsou prostorově verifikovány jako dobře předpověditelné. Sníženou kvalitu tradiční verifikace je třeba připsat požadavku gridové shody, a tedy i výskytu dvojitého trestu při tradiční verifikaci.

Závislost chyby předpovědi na nadmořské výšce byla vyhodnocována pouze tradičním gridovým způsobem, protože velká prostorová proměnlivost neumožňuje snadné využití prostorových nebo objektových verifikačních metod. Výsledky ukazují, že sledované chyby obecně rostou s výškovou kategorií, rozdíly v mediánech jsou však pouze na úrovni setin mm. Nicméně z analýzy rozptylu vyplývá, že u všech tří chyb je tento rozdíl mezi mediány statisticky významný. To naznačuje, že chyba

předpovědi srážek roste s nadmořskou výškou, ale rozdíly jsou z hlediska praktického využití minimální.

Výsledky získané v této studii je nutné považovat za předběžné. Byly získány na souboru omezeného rozsahu zahrnujícího hodinové úhrny v letní sezóně 2020. Byla také navržena a testována kategorizace založená pouze na dvou souhrnných parametrech. Bude nutné zvětšit rozsah vstupních dat, což umožní verifikovat předpověď srážkových úhrnů různého trvání včetně úhrnů denních. Současně to umožní definovat kategorie pro celé spektrum dob trvání srážky, přejít na kategorizaci podle prognostických hodnot charakteristik a využít výstupy klimatické verze modelu ALADIN pro hodnocení důsledků kategorizace.

Poděkování:

Výsledky shrnuté v této studii byly získány v rámci projektu PERUN, podporovaného grantovou agenturou TAČR, program Prostředí pro život, číslo SS02030040.

Literatura:

- BROŽKOVÁ, R., BUČÁNEK, A., MAŠEK, J., SMOLÍKOVÁ, P., TROJÁKOVÁ, A., 2019. Nová provozní konfigurace modelu ALADIN ve vysokém rozlišení. *Meteorologické zprávy*, roč. 72, č. 5, s. 129–139. ISSN 0026-1173.
- BUSCHOW, S., FRIEDRICHS, P., 2021. SAD: Verifying the scale, anisotropy and direction of precipitation forecasts. *QJR Meteorol. Society*, Vol. 147, s. 1150–1169.
- CHMI.CZ, 2021. Český hydrometeorologický ústav [online]. cit. [10.11.2022]. Dostupné z <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-srazky>.
- DORNINGER, M., GILLELAND, E., CASATI, B., MITTERMAIER, M., EBERT, E. et al., 2018. The set-up of the Mesoscale Verification-Inter-comparison over Complex Terrain (MesoVICT) project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 99, No. 9, s. 1887–1906.
- eMS, 2022. Česká meteorologická společnost [online]. Elektronický meteorologický slovník (eMS) [cit 13.01.2022]. Dostupné z WWW: <http://slovník.cmes.cz>.
- GILLELAND, E., AHJEVICH, D. A., BROWN, B. G., EBERT, E., 2010. Verifying forecasts spatially. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 91, No. 10, s. 1365–1376.
- GILLELAND, E., SKOK, G., BROWN, B. G., CASATI, B., DORNINGER, M. et al., 2021. A Novel Set of Geometric Verification Test Fields with Application to Distance Measures. *Monthly Weather Review*, Vol. 148, s. 1653–1673.
- MELOUN, M., MILITKÝ, J., 2002. Kompendium statistického zpracování dat. Academia, 763 s.
- NOVÁK, P., KYZNAŘOVÁ, H., 2016. MERGE2-modernizovaný systém kvantitativních odhadů srážek provozovaný v Českém hydrometeorologickém ústavu. *Meteorologické zprávy*, roč. 69, č. 5, s. 137–144. ISSN 0026-1173.
- REZACOVA, D., SZINTAI, B., JAKUBIAK, B., YANO, J.I., TURNER, S., 2015. Verification of high resolution precipitation forecast by radar-based data. In: „Parameterization of atmospheric convection: Current issues and new theories“, London: Imperial College Press, s. 173–214.
- ROBERTS, N., 2008: Assessing the spatial and temporal variation in the skill of precipitation forecasts from an NWP model. *Meteorol. Appl.*, Vol. 15, s. 163–169.
- ROBERTS, N., M. LEAN, H. W., 2008. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high resolution forecast of convective events. *Monthly Weather Review*, Vol. 136, s. 78–97.
- ŠRÁMEK, J., HUJSLOVÁ, J., SANDEV, M., ŠOPKO, F., HANDŽÁK, Š. et al., 2021. Zhodnocení meteorologických příčin povodní v červnu 2020. *Meteorologické zprávy*, roč. 74, č. 1, s. 2–10. ISSN 0026-1173.

- TOLASZ, R., ČEKAL, R., ŠKÁCHOVÁ, H., VLASÁKOVÁ, L., 2021. Rok 2020 v Česku. *Meteorologické zprávy*, roč. 74, č. 2, s. 33–45. ISSN 0026-1173.
- WERNLI, J. H., PAULAT, M., HAGEN, M., FREI, CH., 2008. SAL – A novel quality measure for the verification of Quantitative Precipitation Forecast. *Monthly Weather Review*, Vol. 136, s. 4470–4487.
- WILKS, D.S., 2019. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Fourth Edition. Kidlington: Elsevier. ISBN 978-0-12-815823-4.
- ZACHAROV, P., REZÁČOVÁ, D., BROŽKOVÁ, R., 2013. Evaluation of the QPF quality for convective flash flood rainfalls from 2009. *Atmospheric Research*. Vol. 131, s. 95–107.

- ZACHAROV, P., ŘEZÁČOVÁ, D., 2010. Verifikace kvantitativní předpovědi srážek. *Meteorologické zprávy*, roč. 63, č. 5, s. 133–146. ISSN 0026-1173.
- ZACHAROV, P., ŘEZÁČOVÁ, D., BROŽKOVÁ, R., 2019. Verifikace kvantitativní předpovědi srážek produkované modelem ALADIN-CZ. *Meteorologické zprávy*, roč. 72, č. 5, s. 140–151. ISSN 0026-1173.

Lektoři (Reviewers):

RNDr. František Šopko, prof. RNDr. Jan Bednář, CSc.

INFORMACE

Meteorologická konference Jizerka 2022

Ve dnech 17. až 19. května 2022 se na Jizerce v Jizerských horách (Panský dvůr a Pyramida) konala meteorologická konference pod názvem Jizerka 2022 pořádaná Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ) a Českou meteorologickou společností (ČMeS).

Na základě velkého zájmu o účast na předešlých dvou horských konferencích jsme se rozhodli uspořádat v obdobném schématu v pořadí již třetí horskou meteorologickou konferenci. Organizační výbor konference po dohodě s vedením ČHMÚ navrhl možnost konání konference v pravidelném dvouletém cyklu a hledal vhodné místo pro uspořádání této akce. Z několika navržených lokalit Jizerských hor byla vybrána lokalita na Jizerce a termín byl předběžně stanoven na 18. až 20. května 2021. Vzhledem k nepříznivé epidemiologické situaci způsobené virem SARS-CoV-2 bylo však již v listopadu 2020 rozhodnuto o odložení konání této konference. V návaznosti na to byl na podzim roku 2021 naplánován nový termín na 17. až 19. května 2022.

Jizerské hory jsou plošně relativně malým pohořím, mají však velké množství zajímavých lokalit. Ze všech zajímavých míst jsme vybrali Jizerku pro uspořádání konference. Jizerka je bezesporu jedna z nejpůvabnějších horských osad v Česku, je to turisticky známá a celoročně velmi exponovaná lokalita. Meteorologicky patří mezi nejzajímavější lokality v rámci celé republiky, vyhlášená výskytem silných mrazů a velkou tradicí měření a pozorování. Ostatně celé Jizerské hory jsou osazeny velkým množstvím meteorologických a hydrologických sta-

nic, a to nejen ze strany ČHMÚ, ale celé řady dalších institucí a amatérských meteorologů. Je to místo zaslíbené jak provozním měřením, výzkumu tak i účelovému monitoringu.

Měření ve středních a vyšších polohách je daleko náročnější jak na techniku, tak na pozorovatele a má řadu problémů a úskalí. Svá specifika má rovněž předpověď počasí pro hory a tvorba klimatologických charakteristik. I když na našem území nemáme velehory, tak jsou kvalitní předpovědi pro naše hory důležité nejen pro turisty, ale i pro řadu činností, které jsou zde často závislé právě na počasí, nebo mají k počasí úzký vztah.

Program meteorologické konference Jizerka 2022 byl třídní, přednášky zazněly v šesti tematických blocích. V druhém dnu konference byl odpolední program věnován odborným exkurzím a návštěvám zajímavých lokalit.

Bloky konference:

- I. Jizerské hory – historie, současnost a budoucnost
- II. Meteorologická a jiná měření v Jizerských horách (včera, dnes a zítra)
- III. Problematika měření na horách – horské stanice, meteorologické přístroje a technika na horách
- IV. Klimatologická zpracování, charakteristiky území a klimatická změna ve středních a vyšších nadm. výškách
- V. Hydrologie a kvalita ovzduší středních a vyšších poloh
- VI. Problematika předpovědi počasí, synoptické hodnocení a hydroprognóza ve středních a vyšších polohách

Tato spíše provozní než vědecká konference přinesla mnoho zajímavých poznatků a informací, které – jak pevně věříme – budou účastníci dále intenzivně rozvíjet. Na konferenci se tak diskutovala řada problémů s měřením na horách, ať už manuálním, nebo s přístrojovou technikou a novými meteorologickými čidly. Velká pozornost byla věnována problematice měření srážek a sněhu v zimním období, teploty vzduchu a větru, dále nebezpečným jevům, předpovědím a dalším zajímavým tématům.

Literatura:

- LIPINA, P., PROCHÁZKA, J. (ed.), 2022. Meteorologická konference Jizerka 2022. Sborník příspěvků z konference pořádané Českým hydrometeorologickým ústavem a Českou meteorologickou společností konané ve dnech 17.–19. května 2022 v hotelu Pyramida na Jizerce v Jizerských horách. Praha: ČHMÚ. 1. vydání, 144 s. ISBN 978-80-7653-034-8.

Pavel Lipina, Jan Procházka



Meteorologická konference Jizerka 2022 se uskutečnila 17. až 19. května 2022 v prostorách hotelů Panský dvůr a Pyramida v Jizerských horách. Foto: H. Stehlíková

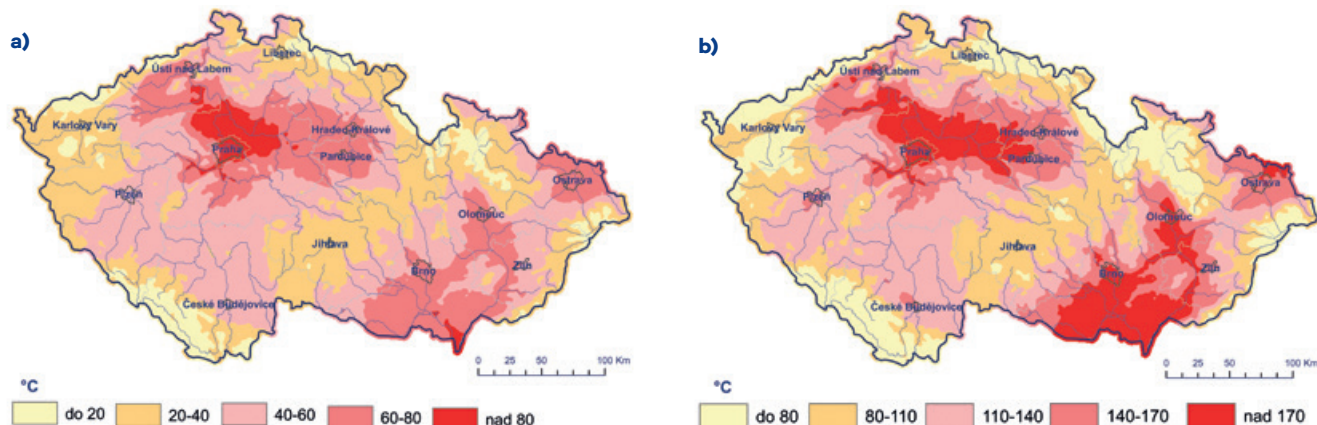
POČASÍ A ROSTLINY

Fenologický vývoj na území ČR od ledna do dubnu 2022

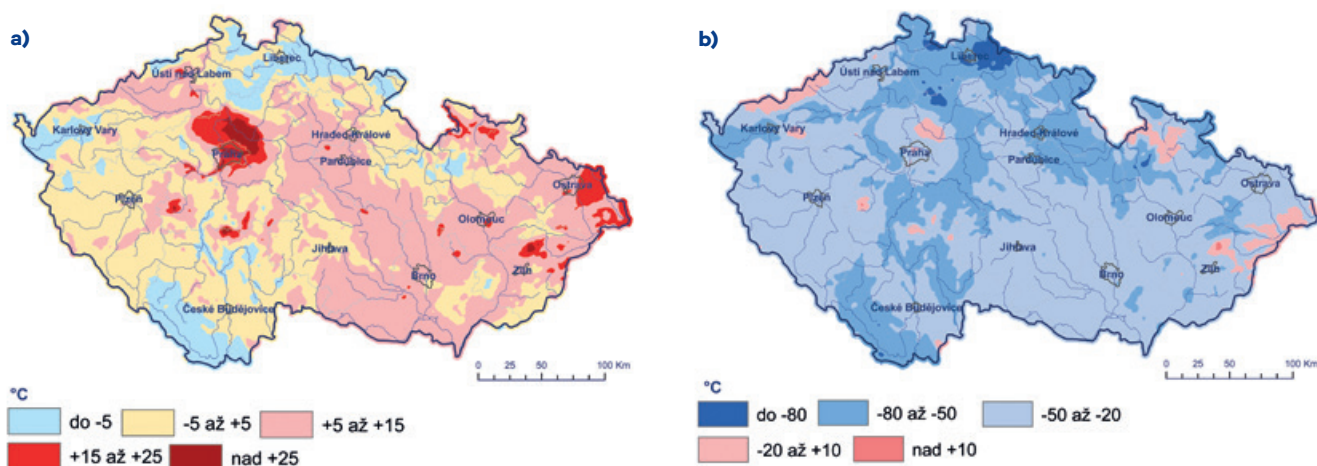
V tomto čísle vyhodnotíme časové období od 1. ledna do 30. dubna 2022.

Celkovou sumu **efektivních teplot nad 5 °C** od 1. 1. 2022 do 31. 3. 2022 a 30. 4. 2022 a její srovnání s normálem 1991–2020

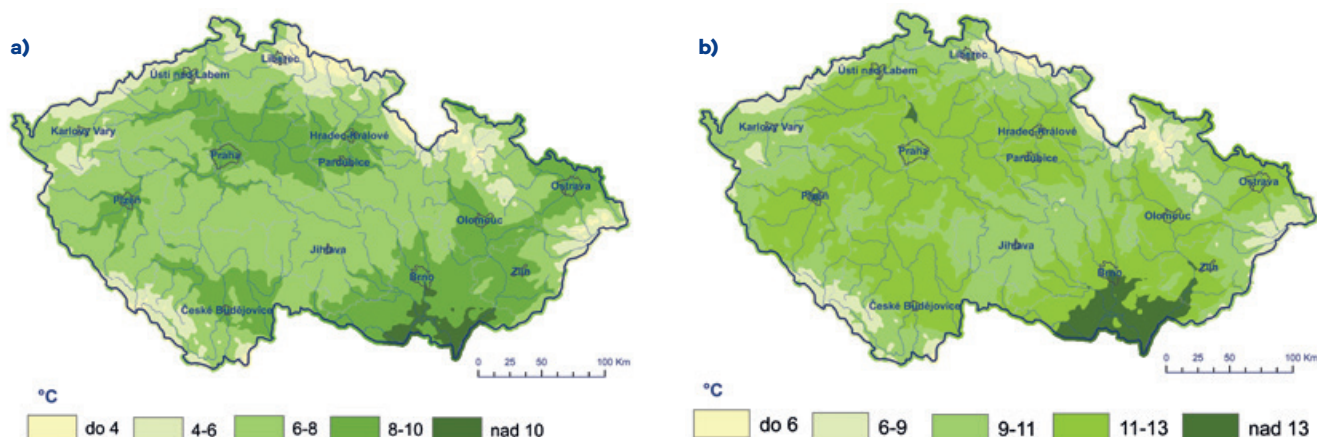
zobrazují následující mapy (obr. 1, 2). Absolutní hodnoty sumy efektivních teplot vzduchu nad 5 °C byly v březnu v rozmezí od 20 do 80 °C (v roce 2021 byly hodnoty v rozmezí 20 až 50 °C), v dubnu od 80 do 170 °C (v roce 2021 byly hodnoty v rozmezí 85 až 125 °C). Nejvyšší hodnoty byly naměřeny na jižní Moravě a v Polabské nížině. Odchytky od normálu 1991–2020 se v březnu pohybovaly v rozmezí pod –5 až +25 °C a v dubnu –80 až +10 °C – duben byl velmi chladný a odrazilo se to na rychlosti vývoje vegetace. Nejvyšší kladné odchytky byly v březnu zázna-



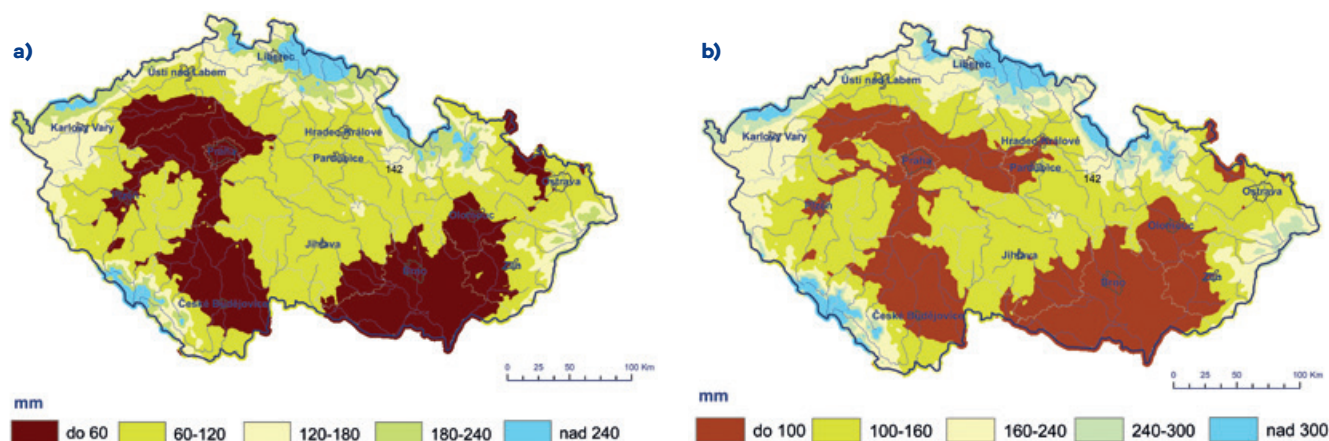
Obr. 1 Suma efektivních teplot vzduchu nad 5 °C od 1. 1. 2022 do 31. 3. 2022 (a) a do 30. 4. 2022 (b).



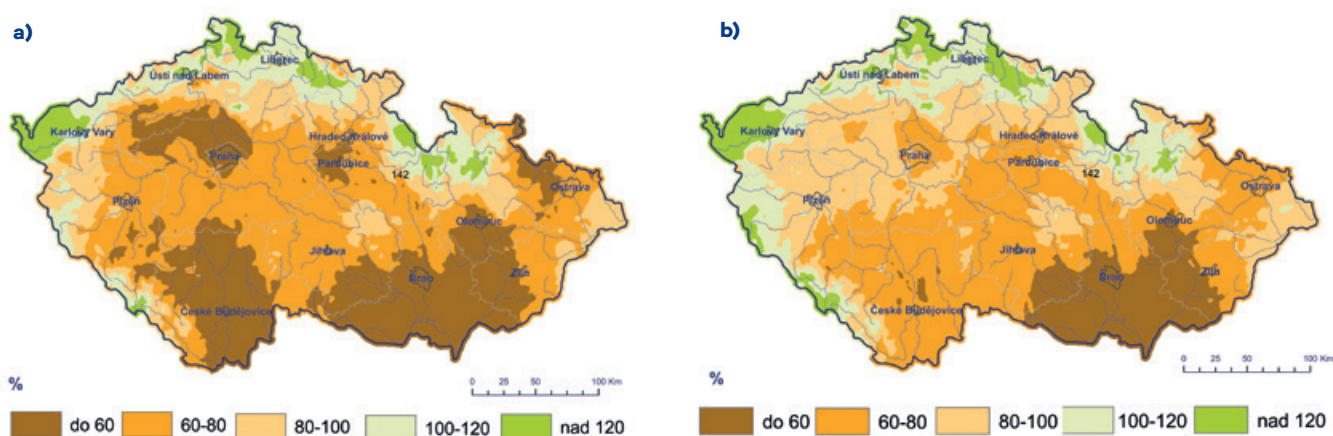
Obr. 2 Suma efektivních teplot vzduchu nad 5 °C – odchylka od normálu 1991–2020 od 1. 1. 2022 do 31. 3. 2022 (a) a do 30. 4. 2022 (b).



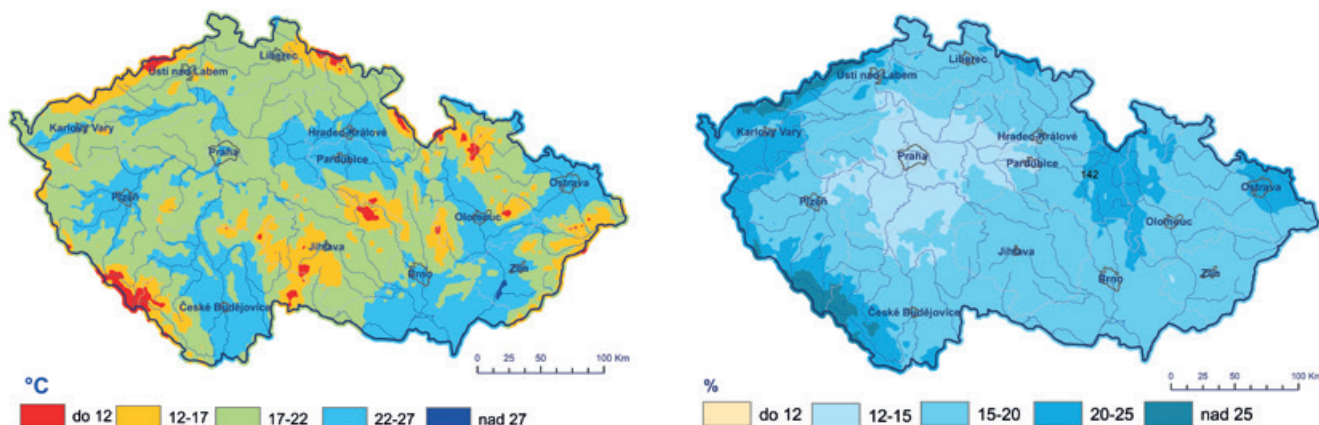
Obr. 3 Průměrná denní teplota půdy v hloubce 10 cm dne 31. 3. 2022 (a) a 30. 4. 2022 (b).



Obr. 4 Kumulativní úhrn srážek k 31. 3. 2022 (a) a 30. 4. 2022 (b).



Obr. 5 Kumulativní úhrn srážek (procenta normálu 1991–2020) k 31. 3. 2022 (a) a 30. 4. 2022 (b).



Obr. 6 Amplituda teploty vzduchu 23. 3. 2022 (°C).

Obr. 7 Relativní vlhkost vzduchu ve 14 hodin SEČ 13. 3. 2022 (%).

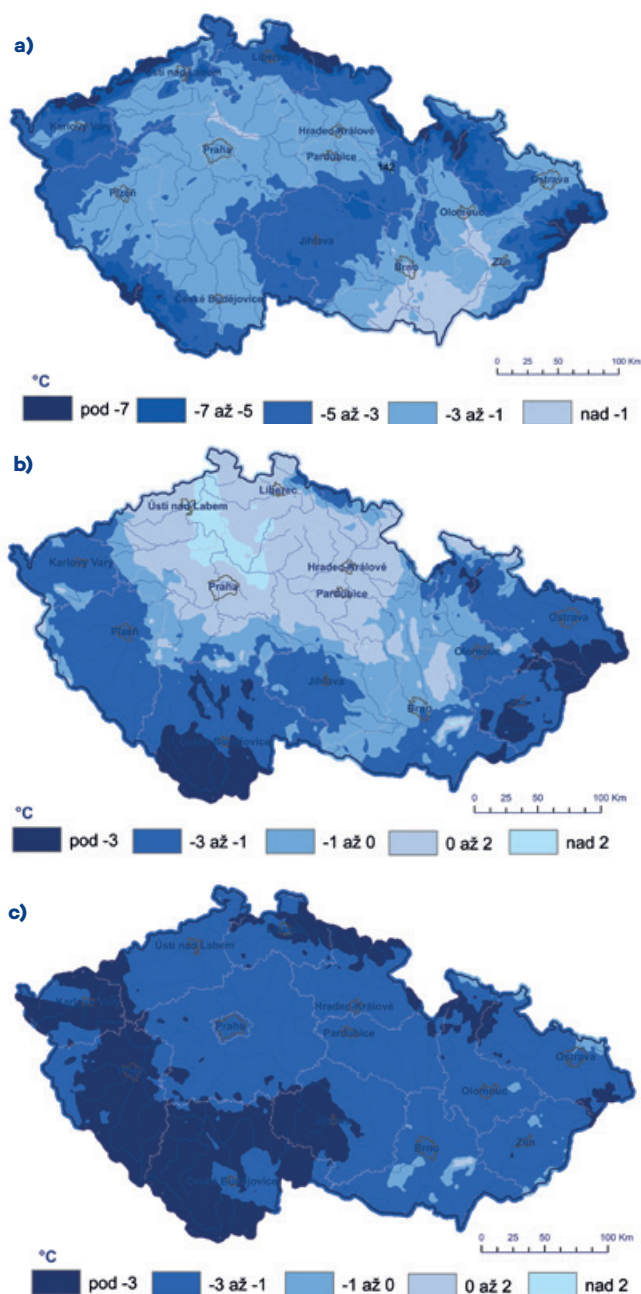
menány na severní Moravě a v části Středočeského kraje. V dubnu byly na většině území odchylky záporné.

Průměrná denní teplota půdy v hloubce 10 cm dne 31. 3. 2022 a 30. 4. 2022 je uvedena v obrázku 3. V březnu se průměrná denní teplota půdy v hloubce 10 cm pohybovala v rozmezí 4 až 10 °C, v dubnu 6 až 13 °C. Při srovnání s rokem 2021 byly v březnu a dubnu hodnoty průměrné denní teploty půdy v 10 cm v rozmezí 6 až 12 °C.

Kumulativní úhrn atmosférických srážek od 1. 1. 2022 do 31. 3. 2022 a 30. 4. 2022 a procentuální vyjádření normálu 1991–2020 je vykreslen na obrázku 4 a 5. Nejnížší kumulativní

úhrn srážek byl zaznamenán ve středních, západních a jižních Čechách, v části Poohří a Polabí, a dále na jižní Moravě, Olomoucku, Zlínsku a Ostravsku. Ve srovnání s normálem 1991–2020 dosahovaly hodnoty na většině na území méně než 60 % normálu a 60 až 80 % normálu, pouze v západních, severních a východních Čechách či na Šumavě se jednalo i o 120 % normálu.

Ve třetí dekádě března 2022 byly zaznamenány velké rozdíly mezi minimální a maximální teplotou vzduchu, na obr. 6 je zobrazena amplituda teploty vzduchu, 23. března (světový meteorologický den) byla na velké části území amplituda teploty vzduchu v rozmezí 22 až 27 °C a na Zlínsku i více než 27 °C.

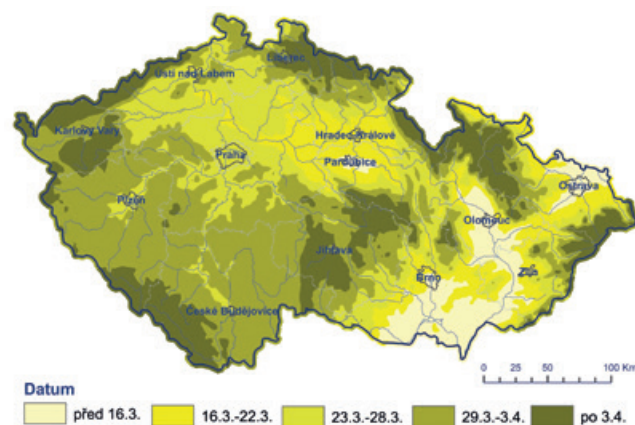


Obr. 8 Minimální teplota vzduchu ve výšce 2 m dne 3. 4. 2022 (a), 18. 4. 2022 (b) a 20. 4. 2022 (c).

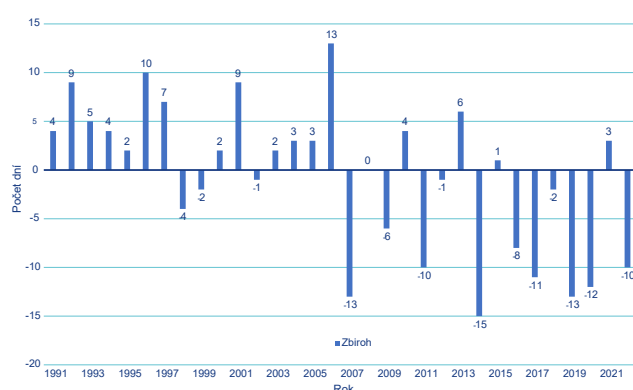
V březnu byla v některých dnech (např. 13. 3. 2022) zaznamenána i extrémně nízká relativní vlhkost vzduchu ve 14 hodin SEČ, hodnoty představuje mapa na obr. 7.

Začátkem dubna, v době, kdy kvetly meruňky, broskvoně a mandloně, nás trápily mrazy, a bohužel se vyskytovaly i ve třetí dekádě dubna (obr. 8), kdy začaly kvést další ovocné stromy (např. třešně).

Vegetace se v průběhu března začala pomalu probouzet, její nástup byl zpočátku (ve druhé polovině března) urychlen proti průměru (např. blatouch bahenní vykvetl v Benešově u Prahy o 17 dní dříve než obvykle), ale v dubnu se vývoj vegetace zpomalil kvůli chladnějšímu průběhu počasí a výskytu nočních teplot vzduchu pod bodem mrazu. Díky těmto skutečnostem jsme si mohli déle užívat květy bylin jarního aspektu (např. bledulí, dymnivek, křivatců, orsejů, sasanečků a dalších), zlatice kvetly té-



Obr. 9 Počátek kvetení sasanky hajní v roce 2022.



Obr. 10 Počátek kvetení slivoně trnky (odchylky od průměru 1991–2020) v období 1991–2022 na stanici Zbiroh (490 m n. m.).



Obr. 11 Květy javoru mléče.

měř 2 měsíce v různých výškových pásmech a sněženky odkvetly až začátkem dubna. Postupně se začaly olisťovat bezy, vrby, kaštiny, lísky, hlohy, střemchy, javory, břízy a další dřeviny. Z pylových alergenů rozkvetl v první dekádě dubna javor mléč a habr obecný, bříza bělokorá začala kvést ve druhé polovině dubna. Časový průběh počátku kvetení sasanky hajní představuje obr. 9. Počátek kvetení slivoně trnky (odchylky od průměru 1991–2020) na stanici Zbiroh jsou uvedeny na obr. 10.

A další informace o vývoji vegetace a počasí v roce 2022 vám přineseme v následujícím čísle.

Lenka Hájková

INFORMACE – RECENZE

Zemřel RNDr. Jan Munzar, CSc.

Když jsem se v loňském roce zeptal přítele Jendy Munzara, tehdy již hodně uzavřeného do sebe a unaveného životem, jestli by neměl námitky proti připomenutí svých 80. narozenin na stránkách Meteorologických zpráv, odpověděl mi, že nestojí o žádný předsmrtný nekrolog. Zamrazilo mě. A rok se sešel s rokem a doktor Munzar umírá čtyři dny po svých 81. narozeninách. Stalo se tak 10. dubna 2022, kdy pobýval v Odborném léčebném ústavu v Jevíčku na pooperační léčebné rehabilitaci. Operaci si vyžádala zlomenina krčku stehenní kosti, kterou si způsobil nešťastným pádem na zem ve svém bytě.

Odchodem dr. Munzara česká meteorologická obec ztratila významného klimatologa, předního historika meteorologie a úspěšného popularizátora vědy a jeho rodina věrného a spolehlivého manžela a obětavého otce dcery, která neměla štěstí, aby se narodila zdravá. O jeho životě a pracovních výsledcích jsme již referovali v tomto časopise u příležitosti jeho šedesátých narozenin (Krška 2001), proto nyní alespoň stručně zopakuje některé osobní údaje.



RNDr. Jan Munzar, kandidát geografických věd, se narodil 6. dubna 1941 v Praze. Od chlapeckých let ho provázel zájem o historii, a kdyby měl „lepší“ kádrový profil, jak se kdysi nazýval jeden z prostředků občanské diskriminace, byl by po maturitě studoval dějepis na Filozofické fakultě Univerzity Karlovy. Ale to nešlo. Rozhodl se proto pro Matematicko-fyzikální fakultu, kde byly poměry normálnější, a na ní si vybral studijní obor meteorologie a klimatologie, který úspěšně absolvoval v roce 1963. Celou dobu zaměstnání strávil na pracovištích Akademie věd. Nejprve působil v pražském Ústavu fyziky atmosféry ČSAV, po přesídlení do Brna z rodinných důvodů od roku 1969 pracoval v Geografickém ústavu ČSAV a nakonec po jeho zrušení od roku 1993 v brněnské pobočce ostravského Ústavu geoniky Akademie věd České republiky. V něm zasluženě získal dobré postavení. Byl členem jeho vědecké rady a předsedou redakční rady mezinárodního časopisu *Moravian Geographical Reports*, který ústav vydává, a mnohokrát ústav zastupoval na konferencích a pracovních setkáních u nás i v zahraničí.

Doktor Munzar tíhl ke klimatologii, avšak rozsah jeho vědeckého zájmu byl mnohem širší: sahal od otázek antropogenního vlivu na podnebí měst a průmyslových oblastí přes rekonstrukce historického podnebí, životopisy osobností a hodnocení jejich přínosu pro meteorologické poznání, terminologické problémy až po hydrometeorologii. Je autorem více než 200 publikací, jež vyšly v češtině, angličtině a němčině. Všechny jeho práce prozrazují velmi pečlivého badatele a dobrého stylistu, který přesně ví, o čem a pro koho píše. Proto byl také výborným popularizátorem meteorologie, jeho vystoupení v rozhlasu, televizi a v novinách byla poutavá i zábavná, a přitom odborně na výši. Jeho knižní publikace *Meteorologie* skoro detektivní a *Malý průvodce meteorologií* získaly několik ocenění a knížka *Medardova kápe aneb Pranostiky očima meteorologa* kvůli velkému zájmu čtenářů vyšla ve třech vydáních. Zvěčnělý má také velký podíl na sestavení Meteorologického slovníku výklado-

vého a terminologického z roku 1993, jemuž se věnoval sedm roků ve svém volném čase. A snad ze všech jeho prací je zřejmé, že v nich šťastně spojil své univerzitní vzdělání se zájmem o historii, který ho po celý život neopustil. V posledních desetiletích četné jeho práce vznikaly v rámci výzkumných úkolů nebo za podpory dlouhodobého koncepčního rozvoje Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i., nebo čistě z jeho soukromého zájmu.

Psaní a publikování bylo hlavním Munzarovým koníčkem. Bylo založeno na usilovném a podrobném studiu archivních a jiných podkladových materiálů a opíralo se o jeho hluboké vzdělání a široký rozhled. Jeho písemný projev byl mnohem lepší než jeho projev ústní. Doktor Munzar měl smysl pro kolektivní práci a věděl, že neví všechno. Proto zval ke spolupráci i autory z příbuzných i vzdálených oborů, kteří jím navržená témata rozšiřovali a příspěvky obohacovali o další poznatky a zajímavosti. O jednom z jeho spolupracovníků je třeba se zmínit zvlášť. Je jím RNDr. Stanislav Ondráček, jeho podstatně mladší kolega z Ústavu geoniky (nar. 1953), s nímž sdílel společnou pracovní více než 40 roků. Vzděláním fyzický geograf, nenápadný, ale velmi schopný a výkonný badatel, se v ústavu zaměřoval hlavně na hydrologickou problematiku. To se Munzarovi velmi hodilo v období po nešťastných záplavách, které naše území zasáhly v letech 1997 a 2002. Společně se soustředili na výzkum mimořádným hydrologických a hydrometeorologických situací, které se udály v minulosti nebo nedávno, a ke spolupráci přibrali i odborníky ze sousedních zemí. Tak vzniklo až nepřehledné množství článků a referátů, uveřejněných ve větším počtu různých časopisů a sborníků, které uvádíme níže.

Pochybuji o tom, že ještě někdo napíše o povodních více studií a úvah než dr. Munzar s dr. Ondráčkem. Munzar se totiž nezdráhal publikovat o jednom a též přírodním fenoménu i několik článků v různých obměnách, pokud předpokládal různé okruhy čtenářů, nikdy však tak nečinil kvůli penězům. Psal až do poměrně vysokého věku, ve stáří, kdy pociťoval úbytek sil, se mohl spolehnout na pomoc z Ondráčkovy strany. Ze soupisu prací nebo příspěvků, jejichž byl autorem, nebo na nichž se podílel jako spoluautor, vidíme, že jeho pozornost ve dvou posledních desetiletích života se upínala téměř výhradně na povodně v různých povodích, případně na extrémní srážkové úhrny a jejich následky, zatímco v předchozích letech byla skladba jeho prací výrazně pestřejší. Soupis jeho spisů byl uveřejněn v tomto periodiku u příležitosti jeho 60. narozenin (Krška 2001), a proto na závěr tohoto nekrologu uvádíme jen práce z pozdějšího období.

RNDr. Jan Munzar byl bezesporu největší český historik meteorologie a také slušný, čestný a přátelský člověk. Jako na takového budeme na něj vzpomínat.

Literatura:

KRŠKA, K., 2001. Šedesáté narozeniny RNDr. Jana Munzara, CSc. *Meteorologické zprávy*, roč. 54, č. 2, str. 61–64. ISSN 0026-1173

Výběr z publikací RNDr. Jana Munzara, CSc., který navazuje na soupis z roku 2001. (Zkratka „spol.“ uvádí jména spoluautorů práce.)

- [76] Povodně ve střední Evropě po mimořádně tuhé zimě 1829/30. *Moravian Geographical Reports*, 2000, Vol. 8, Nr. 2, s. 45–58. ISSN 1210-8812.
- [77] Letní povodně ve střední Evropě v roce 1813 – analogie povodní v roce 1997. *Moravian Geographical Reports*, 2001, Vol. 9, Nr. 2, s. 29–41. ISSN 1210-8812.
- [78] Paradoxy přírodních katastrof (s příklady z České republiky) (spol. S. Ondráček). *Moravian Geographical Reports*, 2001, Vol. 9, Nr. 2, s. 41–48. ISSN 1210-8812.
- [79] Povodně, krajina a lidé v povodí řeky Moravy (spol. A. Vaishar (eds.)). Brno: Regiograph, 2001. ISBN 80-86377-05-9.
- [80] Contribution of the Wrocław (Breslau) meteorological network from the years 1717–1730 to a better knowledge of weather conditions in Central Europe. In: *Man and climate in the 20th century International conference Wrocław*, 13–15 June 2002, abstract book, s. 68–69. Wrocław.
- [81] Czech Republic –August 2002: another flood disaster of century after five years (spol. S. Ondráček a P. Klusáček). *Moravian Geographical Reports*, 2002, Vol. 10, Nr. 2, s. 53–62. ISSN 1210-8812.
- [82] Environmental history of Central Europe in the first half of the 18th century (according to the so called Wrocław Collection). *Moravian Geographical Reports*, 2002, Vol. 10, Nr. 2, s. 37–45.
- [83] Krajina, lidé a povodně v povodí řeky Moravy (spol. A. Vaishar, M. Hrádek, E. Kallabová, K. Kirchner, A. Klímová, P. Klusáček, B. Kolibová, J. Lacina, S. Ondráček, Š. Štítežská). Brno: Regiograph, 2002. ISBN 80-86377-08-3.
- [84] The flood in Carlsbad (Bohemia) on 9 May 1582: its causes, damages and response. Proceedings of the International Workshop held at Barcelona, Spain, October 2002. 4 s.
- [85] Tornadoes within the Czech Republic: from early medieval chronicles to the „internet society“ (spol. M. Setvák a M. Šálek). *Atmospheric Research* 67–68, 2003.
- [86] Extreme precipitation and disastrous floods in central Europe in July 1903 and their impacts (spol. S. Ondráček). In: *Vaishar, A., Zapletalová, J., Munzar, J. (eds.): Regional geography and its applications*. Brno: Regiograph, 2003, S. 128–134. ISBN 80-86377-09-1.
- [87] Velké povodně na Ostravsku v letech 1902 a 1903 (spol. S. Ondráček). In: *Broža, V., Vaška, J., Jakubíková, A. (eds.): Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery*.
- [88] „Extrémní hydrologické jevy v povodích“. Praha: ČVUT, 2004, s. 41–46. ISBN 80-01-03161-6.
- [89] Velké povodně na Ostravsku – zapomenutý přírodní fenomén (spol. S. Ondráček). In: *Wahla, A. (ed.): Geografie a proměny poznání geografické reality*. Ostrava: Ostravská univerzita – Přírodovědecká fakulta, 2004, s. 416–418. ISBN 89-7042-788-4.
- [90] Historické povodně v Čechách v díle drážďanského hydrometeorologa Christiana Gottlieba Pötzsche. Na okraj 200. výročí jeho úmrtí (spol. S. Ondráček). In: *Broža, V., Jakubíková, A. (eds.): Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 2005 „Extrémní hydrologické jevy v povodích“*. Praha: ČVUT a Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost, 2005, s. 61–66. ISBN 80-01-03325-2.
- [91] The catastrophic flood in February/March 1784 – a natural disaster of European scope (spol. L. Elleder a M. Deutsch). *Moravian Geographical Reports*, 2005, Vol. 13, Nr. 1, s. 8–25. ISSN 1210-8812.
- [92] Velké povodně na Odře v 19. a počátkem 20. století a jejich impakty (spol. S. Ondráček). In: *Hydrologické dni 2005*. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, 2005, s. 564–569. ISBN 80-88907-53-5.
- [93] Velké povodně na území České republiky – ztráta historické paměti (spol. S. Ondráček). *Historická geografie*. 2005, roč. 33, s. 97–118. ISSN 0323-0988.
- [94] Examples of great cross-border floods in the Odra River basin since the 14th century and their impacts (spol. S. Ondráček). *Dokumentacja Geograficzna*, 2006, č. 32, s. 206–10. ISBN 83-87954-72-1.
- [95] Extrémní hydrologické jevy v krajině (spol. E. Kallabová). In: *ZO ČSOP Veronica (ed.): Venkovská krajina*. Slavičín, 2006, s. 95–98. ISBN 80-239-7166-2.
- [96] Historical floods in central Europe and their documentation by means of floodmarks and other epigraphical monuments (spol. M. Deutsch, L. Elleder, S. Ondráček, E. Kallabová a M. Hrádek). *Moravian Geographical Reports*, 2006, Vol. 14, Nr. 3, s. 26–44. ISSN 1210-8812.
- [97] Josef Stepling a vichřice ve střední Evropě v únoru 1756. *Meteorologické zprávy*, 2006, roč. 59, č. 3, s. 86–90. ISSN 0026-1173.
- [98] Joseph Stepling and windstorms in Europe from 17–19 February 1756. In: *Emeis, S., Lüdecke, C. (eds.) From Beaufort to Bjerknes and Beyond*. Augsburg: ERV Dr. Erwin Rauner Verlag, 2006, s. 35–44. Algoritmus, Heft 52. ISBN 3-936905-13-4.
- [99] Historical floods in central Europe and their documentation by means of floodmarks and other epigraphical monuments (spol. M. Deutsch, L. Elleder, S. Ondráček, E. Kallabová a M. Hrádek). *Moravian Geographical Reports*, 2006, Vol. 14, Nr. 3, s. 26–44. ISSN 1210-8812.
- [100] Katastrofální povodeň v povodí Odry v srpnu 1880, její příčiny, průběh a následky (spol. S. Ondráček a T. Řehánek). In: *Jakubíková, A., Broža, V. (eds.): Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery „Extrémní hydrologické jevy v povodích“*. Praha: Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost, 2006, s. 61–70. ISBN 80-01-03603-0.
- [101] Příklady materiálních památek historických povodní středoevropského prostoru (spol. E. Kallabová, S. Ondráček a M. Hrádek). In: *Trem, V., Chromý, P. (eds.) 150 let Geografie na UK v Praze* (Sborník abstraktů z mezinárodní geografické konference.) Praha: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta 2006, s. 12. ISBN 80-86561-96-8.
- [102] Velké historické povodně v jižních Čechách a jejich impakty (spol. S. Ondráček). In: *Kraft, S., Mičková, K., Vančura, M., Veselá, H. (eds.): Česká geografie v Evropském prostoru* (Sborník abstraktů referátů z XXI. sjezdu České geografické společnosti). České Budějovice: Jihočeská univerzita, Pedagogická fakulta, 2006, s. 206. ISBN 80-7040-879-0.
- [103] Newly identified historical tornadoes in the Czech Republic from 16th to the 20th centuries (spol. M. Lacinová a M. Franc). *Atmospheric Research*, 2007, Vol. 83, s. 488–492. ISSN 0169-8095.
- [104] „Nová“ historická tornáda a tromby v českých zemích (spol. M. Lacinová). *Meteorologické zprávy*, 2007, roč. 60, č. 5, s. 153–156. ISSN 0026-1173.
- [105] Povodně v českých zemích (spol. J. Kozák, P. Státníková, J. Munzar, J. Janata a V. Hančil). Praha: Professional Publishing, 2007. ISBN 978-80-86946-39-9.
- [106] Povodně v povodí Moravy v srpnu 1880 – obdoba přírodní katastrofy v roce 1997? (spol. S. Ondráček a T. Řehánek). *Historická geografie*, 2007, č. 3–4, s. 149–161. ISSN 0323-0988.
- [107] Precipitation extremes and disastrous floods in Central Europe in July 1897 (spol. S. Ondráček, M. Deutsch a V. Kakos). In: *Kejna, M., Przybylak, R. (eds.): Book of abstracts from the scientific international conference „The climate of Poland in historical times in relation to the climate of Europe“*. Torun: Nicolaus Copernicus University, 2007, s. 50.
- [108] Přírodní extrémy a katastrofy na Ostravsku a jejich environmentální dopady na příkladu historických povodní (spol. S. Ondráček). In: *Kožušníková, A. (ed.): Documenta geonica. Geonics*, 2007, č. 2, s. 143–150. ISBN 978-80-86407-18-0.
- [109] The first two „Czech“ manuals for weather observation from 1st half of the 19th century. *Moravian Geographical Reports* 2007, Vol. 15, Nr. 4, s. 44–49. ISSN 1210-8812.
- [110] The flood in August 1880 – one of the most severe natural disasters of the 19th century in the Ostrava region (Czech Republic) (spol. S. Ondráček a T. Řehánek). *Moravian Geographical Reports*, 2007, Vol. 15, Nr. 3, s. 25–33. ISSN 1210-8812.
- [111] Středoevropský srážkový rekord a povodně ve střední Evropě koncem července 1897 (spol. S. Ondráček a L. Elleder). In: *Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 2007 „Extrémní hydrologické jevy v povodích“*. Praha: ČVUT, 2007, s. 51–60. ISBN 978-80-01-03960-1.
- [112] Disastrous floods in Central Europe at the end of July 1897 and the lessons learnt (spol. S. Ondráček, L. Elleder a K. Sawicki). *Moravian Geographical Reports*, 2008, Vol. 16, Nr. 3, s. 27–40. ISSN 1210-8812.
- [113] Dokumentace povodní na českých řekách v 18. a v 19. století na základě nejstarších hydrologických měření (spol. S. Ondráček a L. Elleder). In: *Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 2008 „Extrémní hydrologické situace v povodích“*. Praha: ČVUT, 2008, s. 127–134. ISBN 978-80-02-02113-1.
- [114] Examples of extreme cross-border floods in the Elbe River basin in the 18th and 19th centuries and the lessons learnt (spol. S. Ondráček a M. Deutsch). In: *Haberlandt, U., Riemer, B., Billib, M. (eds.): Hochwasser, Wassermangel, Gewässerverschmutzung – Problemlösung mit modernen hydrologischen Methoden*. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 2008, H. 23.08. ISBN 978-3-940173-96-6.
- [115] From the history of Czech-German cooperation in hydrology and flood alarms in the Elbe R. Basin (as related to the flood disaster of March 1845). In: *Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 2008 „Extrémní hydrologické jevy v povodích“*. Praha: ČVUT a Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost, 2008, s. 135–142. ISBN 978-80-02-02113-1.

- [116] Historické povodně v České republice na příkladech z řeky Dyje (spol. E. Kallabová, I. Smollová a V. Ira (eds.)) Změny regionálních struktur České republiky a Slovenské republiky. Brno, Olomouc: Ústav geoniky AV ČR, Univerzita Palackého v Olomouci, 2008, s. 32–37. ISBN 978-80-86407-33-3.
- [117] Cisterciácké cestovní deníky z let 1768–1771 jako pramen informací o počasí a jeho extréměch ve střední Evropě (spol. P. Zahradník). *Folia Historica Bohemia* 24, 2009, č. 1, s. 249.
- [118] Historické povodně: jejich vliv na zánik sídel, změny hranic a podíl člověka na škodách jimi způsobených (spol. S. Ondráček a E. Kallabová). *Historická geografie*, 2009, roč. 35, č. 1, s. 359–378. ISSN 0323-0988.
- [119] Povodně, krajina a lidé na řece Moravě (na příkladech ze 17. až 19. století) (spol. S. Ondráček). In: *Říční krajina 6. Sborník příspěvků z 6. ročníku konference*. Olomouc: UP Olomouc, 2009, s. 112–116. ISBN 978-80-244-2358-6.
- [120] Examples of the great cross-border floods in Central Europe and lessons learnt (case studies of floods from September and November 1890 on the occasion of their 12th anniversary) (spol. M. Deutsch, S. Ondráček a E. Kallabová). *Moravian Geographical Reports*, 2010, Vol. 18, Nr. 4, s. 21–29. ISSN 1210-8812.
- [121] Examples of the great cross-border floods in Central Europe and lessons learnt (case studies: September and November 1890 on the occasion of their 120 anniversary) (spol. M. Deutsch, S. Ondráček a E. Kallabová). *Geophysical Research Abstracts*, 2010, 12, 1. ISSN 1607-7962.
- [122] Historický srážkový rekord v Jizerských horách z roku 1897 dosud nepřekonán (spol. S. Ondráček). *Sborník Severočeského muzea, Přírodní vědy*. 2010, roč. 28, č. 1, s. 3–15. ISBN 80-903595-2-3.
- [123] Precipitation extremes and disastrous floods in Central Europe in July 1897 (spol. S. Ondráček). In: *Przybylak, R., Majorowicz, J., Brzdil, R., Kejna, M. (eds.): The Polish climate in the European context: An historical overview*. Dordrecht-Heidelberg- London-New York: Springer, 2010, s. 389–396. ISBN 978-90-481-3166-2.
- [124] Přívalová povodeň na jižní Moravě 9. června 1970 – přírodní katastrofa, která si vyžádala 35 lidských životů (spol. S. Ondráček). In: *Extrémní hydrologické jevy v povodích. Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 2010*. Praha: ČVUT Praha, 2010, s. 73–80. ISBN 978-80-02-02260-2.
- [125] Utajovaná přívalová povodeň na jižní Moravě 9. června 1970. K 40. výročí přírodní katastrofy, která si vyžádala 35 lidských životů (spol. S. Ondráček). *Vesmír* 2010, roč. 89, č. 6, s. 376–379. ISSN 0042-4544.
- [126] Central European one-day precipitation records (spol. S. Ondráček a I. Auer). *Moravian Geographical Reports*, 2011, Vol. 19, Nr. 1, s. 32–40. ISSN 1210-8812.
- [127] Jednodenní srážkové úhrny 300 mm a více ve střední Evropě (spol. S. Ondráček, I. Auer, A. Dancewicz a S. Szalai). *Meteorologické zprávy*, 2011, roč. 64, č. 4, s. 107–112. ISSN 0026-1173.
- [128] Nejstarší český povodňový tisk o dvou katastrofách v roce 1591. *Vesmír* 2011, roč. 90, č. 5, s. 300–303. ISSN 0042-4544.
- [129] Počasí v Čechách ve 30. a 40. letech 18. století v denících Tobiáše Antonína Seemana (spol. V. Prchal). *Theatrum historie*, 2011, roč. 6, č. 9, s. 161–174. ISSN 1802-2502.
- [130] Povodně – přirozený jev, který ale pokaždé překvapí (spol. S. Ondráček). In: *Říční krajina 7*. Olomouc: UP Olomouc, 2011, s. 129–133. ISBN 978-80-904685-7-3.
- [131] Starý tisk o povodňové katastrofě v Šumperku v létě 1591. *Severní Morava. Vlastivědný sborník*. 2011, roč. 55 (97), s. 43–45. ISSN 0231-6323.
- [132] Voda v průmyslové krajině českých zemí v 19. a v první polovině 20. století (spol. S. Ondráček). *Historická geografie*, 2011, roč. 37, č. 2, s. 231–242. ISSN 0323-0988.
- [133] Historické povodně a jejich dokumentace (spol. S. Ondráček). *Geografické rozhledy* 2012, roč. 21, č. 5, s. 30–32. ISSN 1210-3004.
- [134] Katastrofální povodně na Moravě na příkladech z 2. poloviny 16. století (spol. M. Kokojanová). *Střední Morava. Vlastivědná revue*. 2012, roč. 18, č. 1, s. 4–15. ISSN 1211-7889.
- [135] Povodeň jako jedna z možných přírodních katastrof v České republice (spol. S. Ondráček). *Studie a texty Evangelické teologické fakulty*. 2012, roč. 20, č. 1, s. 3–17. ISSN 1802-6818.
- [136] Případová studie: katastrofální povodně v červenci 1997 (spol. K. Kirchner). In: Machar, I., Drobilová, I. (eds.): *Ochrana přírody a krajiny v České republice: vybrané aktuální problémy a možnosti jejich řešení*. 2. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, s. 206–212. ISBN 978-80-244-3041-6.
- [137] Velké povodně v Karlových Varech v minulosti a řešení protipovodňové ochrany tohoto světově známého lázeňského města (spol. S. Ondráček). In: *Petřavská, K., Pithart, D. (eds.): Říční krajina 8*. Praha: Koalice pro řeky, UK, 2012, s. 97–102. ISBN 978-80-87651-02-5.
- [138] A note on extreme European rainfall events (spol. S. Ondráček). *Weather*, 2013, 68, Nr. 8, s. 199–200. ISSN 0043-1656.
- [139] Instrukce pro povodňovou službu návštěvní na řece Moravě a v Dolních Rakousích (k 100. výročí návodu k vydávání výstrah před povodněmi) (spol. S. Ondráček). In: *Fošumpaur, P., Kopecká, P. (eds.): Sborník příspěvků ze Semináře Adolfa Patery 2013 „Extrémní hydrologické jevy v povodích“*. Praha: ČVUT, 2013, s. 177–185. ISBN 978-80-02-02501-6.
- [140] Katastrofální zimní povodeň v českých zemích a střední Evropě v roce 1862 (k jejímu 150. výročí) (spol. S. Ondráček a M. Hrádek). In: *Smelik, L., Jandora, J. (eds.): Sborník příspěvků z Workshopu Adolfa Patery 2012 „Extrémní hydrologické poměry v povodích“*. Brno: VUT, 2013, s. 178–185. ISBN 978-80-02-02423-1.
- [141] Velké přeshraniční povodně na Odře (spol. S. Ondráček). *Geografické rozhledy*, 2013, roč. 22, č. 5, s. 10–11. ISSN 1210-3004.
- [142] Vybrané kapitoly z historie povodní a hydrologické služby na území ČR (spol. S. Ondráček). *Meteorologické zprávy*, 2013, roč. 66, č. 3, s. 95–96. ISSN 0026-1173.
- [143] Ohlédnutí za jedním z největších hydrometeorologických extrémů 19. století (spol. S. Ondráček). *Meteorologické zprávy*, 2014, roč. 67, č. 1, s. 30–32. ISSN 0026-1173.
- [144] Přívalová povodeň v létě 1714 na Českomoravské vrchovině – rekonstrukce katastrofy po 300 letech (spol. L. Elleder, J. Šírová, S. Ondráček, J. Krejčí, M. Lopaur a Z. Dragoun). *Meteorologické zprávy*, 2014, roč. 67, č. 6, s. 161–173. ISSN 0026-1173.
- [145] Přívalové povodně v českých zemích na příkladech z 16 až 21. století (spol. S. Ondráček). In: *Extrémní hydrologické jevy v povodích 2014*. Praha: ČVUT, 2014, s. 113–121. ISBN 978-80-02-02574-0.
- [146] Dvě nejničivější přívalové povodně v Čechách za posledních 300 let (v létě 1714 a na jaře 1872) a jejich sociální důsledky (spol. S. Ondráček a L. Elleder). In: *Zapletalová, J. (ed.): Přírodní rizika a jejich sociální důsledky*. Brno: Ústav geoniky AV ČR, 2015, s. 51–55. ISBN 978-80-86407-58-6.
- [147] Povodně v českých zemích v 16.–18. století ve světle starých tisků (spol. S. Ondráček a L. Kysučan). *Knihy a dějiny*, 2015, roč. 22, s. 23–39. ISSN 1210-8510.
- [148] O hrozném a velikém suchu, zadržení dešťů a odtud následujícím nedostatkem vody (K 400. výročí velké přírodní katastrofy v českých zemích a ve střední Evropě) (spol. S. Ondráček). *Historická geografie*, 2016, roč. 42, č. 2, s. 209–220. ISSN 0323-0988.
- [149] The earliest instructions for weather observations in Bohemia from the 1st half of the 19th century (A historical note) (spol. S. Ondráček). *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, 2016, 158. Jg., s. 334–344. ISSN 0029-9138.
- [150] Vodní mlýny, hamry, pily, valchy a papírny za přívalové povodně v létě 1714 (spol. L. Elleder, J. Šírová, S. Ondráček, M. Lopaur, Z. Dragoun). In: *Chmelenský, J. (ed.): Sborník referátů ze semináře Vodní mlýny*. Vol. 5. Vysoké Mýto: Regionální muzeum ve Vysokém Mýtě, 2016, s. 266–286. ISBN 978-80-904401-7-3.
- [151] K 200. výročí prvního návodu pro pozorování počasí v Čechách a 260. výročí narození jeho autora, profesora A. M. Davida. *Meteorologické zprávy*, 2017, roč. 70, č. 6, s. 190–193.

Děkuji paní Haně Stehlíkové a panu RNDr. Stanislavu Ondráčkovi za pomoc při sestavování této bibliografie.

Karel Krška

Meteorologické zprávy

Meteorological
Bulletin

Odborný recenzovaný časopis se zaměřením na meteorologii, klimatologii, kvalitu ovzduší a hydrologii. Dvuměsíčník

Reviewed journal specialized in meteorology, climatology, air quality and hydrology. Bi-monthly

Vydavatel (redakce) – Publishers

Český hydrometeorologický ústav, Na Šabatce 2050/17,
143 06 Praha 4-Komořany

Czech Hydrometeorological Institute, Na Šabatce 2050/17,
143 06 Praha 4-Komořany, Czech Republic

e-mail: mz@chmi.cz, casmz.chmi.cz

Vedoucí redaktor – Chief Editor

R. Tolasz, Český hydrometeorologický ústav, Ostrava, Česká republika

Redaktor – Assistant Editor

H. Stehlíková, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

Redakční rada – Editorial Board

J. Bednář, Univerzita Karlova, Praha, Česká republika

R. Brožková, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

R. Čekal, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

Z. Horký, Praha, Česká republika

F. Hudec, Univerzita obrany, Brno, Česká republika

I. Hůnová, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

P. Huszár, Univerzita Karlova, Praha, Česká republika

M. Kašpar, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česká republika

K. Krška, Brno, Česká republika

M. Lapin, Univerzita Komenského, Bratislava, Slovenská republika

F. Neuwirth, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, Austria

L. Němec, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

V. Pastirčák, Bratislava, Slovenská republika

E. Plavcová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česká republika

D. Řezáčová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česká republika

M. Setvák, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

J. Strachota, Praha, Česká republika

J. Sulan, Český hydrometeorologický ústav, Plzeň, Česká republika

F. Šopko, Český hydrometeorologický ústav, Praha, Česká republika

A. Vizina, Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, v. v. i., Praha, Česká republika

H. Vondráčková, Praha, Česká republika

V. Voženílek, Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, Česká republika

Abstracting and Indexing:

Meteorological and Geostrophysical Abstracts

Tisk:

COLORA PrintHouse s. r. o., Husova 373/29, 757 01 Valašské Meziříčí

ISSN 0026-1173

Registrační číslo MK ČR E 5107

© Meteorologické zprávy, Český hydrometeorologický ústav

Výběr z novinek

Specializované knihovny ČHMÚ

Než stromům dojde dech

Jak se stromy učí zvládat změnu klimatu a proč nás les zachrání, když mu to dovolíme
Peter Wohlleben; překlad: Dagmar Heeg
Kazda, 2021
ISBN 978-80-7670-050-5

Poklady přírody České republiky = Natural treasures of the Czech Republic

Zdeněk Patzelt, Karolina Šůlová, překlad: Alan Leath
Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky, 2020
ISBN 978-80-7620-057-9

Aplikovaná ekologie

Jan Frouz, Jaroslava Frouzová
Karolinum, 2021
ISBN 978-80-246-4577-3

Guidelines on Seasonal Hydrological Prediction

Jan Daňhelka, Naredra Tuteja, Andy Wood
World Meteorological Organization, 2021
ISBN 978-92-63-11274-3

An Introduction to Data Analysis in R

Alfonso Zamora Saiz, Carlos Quesada González, Lluís Hurtado Gil, Diego Mondéjar Ruiz
Springer, 2020
ISBN 978-3-030-48996-0

Springer Handbook of Atmospheric Measurements

Editor: Thomas Foken
Springer, 2021
ISBN 978-3-030-52170-7

Feature engineering and selection

A Practical Approach for Predictive Models
Max Kuhn, Kjell Johnson
CRC Press, 2020
ISBN 978-1-138-07922-9

Adresa:

Specializovaná knihovna ČHMÚ
Na Šabatce 2050/17
143 06 Praha 4-Komořany
Tel.: 24403 2723

Výpůjční doba:

pondělí–čtvrtek: 9:00–11:30; 12:00–15:30
pátek: 8:00–11:30; 12:00–14:00

<http://biblio.chmi.cz/>