

Porovnání reanalýzy PERUN/Reanalysis se staničními daty v pravidelné síti

Comparison of PERUN/Reanalysis with station data in the regular network

Romana Beranová

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4
✉ rber@ufa.cas.cz

Petr Zacharov

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4
✉ petas@ufa.cas.cz

Petr Štěpánek

Centrum výzkumu globální změny AV ČR
Bélidla 986/4a, 603 00 Brno;
Český hydrometeorologický ústav
Kroftova 2578/43, 616 67 Brno
✉ stepanek.p@czechglobe.cz

Radmila Brožková

Český hydrometeorologický ústav
Na Šabatce 2050/17, 143 06 Praha 4
✉ radmila.brozkova@chmi.cz

The regional PERUN/Reanalysis is based on the ALADIN forecast model. To validate this reanalysis on the territory of the Czech Republic, we used the *GriSt* technical series. We analysed the 30-year period 1990–2019, and we focused on air temperature, precipitation, wind speed, relative humidity and global radiation. The smallest mean error of daily temperatures (up to 0.5 °C) has been found for daily mean temperatures. In the reanalysis, daily minimum temperatures appear overestimated throughout the year, and daily maximum temperatures as underestimated. For winter season, the effect of altitude on the mean error of the maximum and minimum temperature is noticeable. Very good correlations have been found between average and maximum daily total precipitation in the reanalysis and *GriSt*. In both cases, the lowest correlations occur in summer period. Rainfall totals show an overestimation by an average of 33%, with higher values in spring and winter seasons. The errors increase significantly with altitude, but the relative errors do not change substantially with altitude. This reanalysis will serve as a reference set for regional climate model validation and for interpreting climate change scenario calculations.

KLÍČOVÁ SLOVA: model ALADIN – reanalýza klimatická – srážky – teplota – validace

KEYWORDS: ALADIN model – climate reanalysis – precipitation – temperature – validation

1. Úvod

Klimatické reanalýzy se často využívají k validaci klimatických modelů, pro zkoumání různých procesů v polích přizemních klimatických prvků, včetně extrémních jevů. Slouží také jako vstupní data pro hydrologické a další modely. Reanalýzy jsou vytvářeny prostřednictvím numerického předpovědního modelu, do kterého v pravidelných intervalech (6–12 hodin) vstupují všechna dostupná pozorovaná data v procesu tzv. asimilace. Do asimilace mohou vstupovat staniční i distanční měření, jako např. synoptická pozorování, data z radiosond, satelitů, bójí či zprávy z letadel a lodí. Simulovaná pole meteorologických prvků mají pravidelnou prostorovou síť a jsou vzájemně propojena jak horizontálně, tak vertikálně.

V současné době existuje několik globálních reanalýz s prostorovým rozlišením 30 až 50 km. Mezi nejznámější a nejvíce používané patří NCEP/NCAR, ERA-interim a ERA5 (Kalnay et al. 1996; Dee et al. 2011; Hersbach et al. 2020). V posledních letech se do popředí zájmu dostávají regionální reanalýzy s horizontálním rozlišením 10 km a méně a s časovým krokem kratším než jeden den. Tyto výpočty jsou možné díky výkonným superpočítačům, na kterých běží regionální předpovědní model s vysokým rozlišením. Regionální model má propracovaná detailní schémata a parametrizace procesů malého měřítka. Počáteční a okrajové podmínky jsou přebírány z některé globální reanalýzy a obvykle se asimiluje více prvků z více různých zdrojů než v řídící globální reanalýze.

Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) je zapojen do mezinárodního konsorcia, které vyvíjí a využívá model ALADIN pro předpověď počasí. Od roku 2000 začal ČHMÚ pracovat na vývoji regionálního klimatického modelu ALADIN-Climate/CZ s rozlišením 25 km (Huth et al. 2003; Huth et al. 2004; Skalák et al. 2008). Postupem času se rozlišení předpovědního modelu ALADIN zvyšovalo a dosáhlo současné hodnoty 2,3 km. V rámci projektu PERUN, který je zaměřen na výzkum klimatických extrémů, sucha a jejich důsledků v České republice, byla vytvořena reanalýza s vysokým rozlišením vycházející z předpovědního modelu ALADIN. V této studii provedeme srovnání této reanalýzy se staničními daty v pravidelné síti.

2. Data

2.1 Reanalýza PERUN/Reanalysis

Regionální reanalýza PERUN/Reanalysis je založena na numerickém předpovědním modelu ALADIN, který byl upraven pro klimatologické výpočty. Prostorové rozlišení modelu je přibližně $2,3 \times 2,3$ km, model má 87 vertikálních hladin. Okrajové podmínky jsou přebírány z globální reanalýzy ERA5. K dispozici máme 30leté období 1990–2019 pro více než sto meteorologických veličin na povrchu a v hladinách 1 000, 925, 850, 700, 500 a 200 hPa. Na rozdíl např. od reanalýzy ERA5 je výběr veličin menší, limitujícím faktorem byla kapacita úložiště, na kterou jsou při hodinovém kroku reanalýz a klimatických předpovědí kladeny extrémní nároky. Výpočetní doména modelu pokrývá téměř celou Evropu kromě Středomoří, Skandinávie a východní Evropy. Pro potřeby podrobné validace vybraných meteorologických prvků jsme se zaměřili pouze na oblast České republiky.

Během asimilačního cyklu využívá PERUN/Reanalysis metodu tzv. Digital Filter blending výškových polí (Brožková et al. 2006) s reanalýzou ERA5. Pro určení počáteční podmínky prognostických parametrů zemského povrchu jsou asimilována pozorování teploty a vlhkosti ve 2 m ze zpráv SYNOP. Na základě inkrementů analýzy těchto prvků jsou následně určeny inkrementy proměnných v půdě pomocí metody od Giarda a Bazileho (2000). Teplota povrchu moře je převzata z ERA5.

V dynamickém jádru modelu ALADIN se využívá rovnice pro nehydrostatickou, plně stlačitelnou atmosféru. Její numerické řešení je typu 2TL SISL (Two Time-Level Semi-Implicit Semi-Lagrangian), které pro krok sítě $2,3$ km umožňuje použít časový krok 90 s. Modelová fyzika odpovídá kanonické konfiguraci ALARO, která je popsána v publikaci Termonia et al. (2018). V této publikaci jsou také uvedena hlavní schémata parametrizací fyzikálních procesů. V našem konkrétním případě již nepoužíváme parametrizace gravitačních vln působících pod škálovou orografií, protože tento proces je z velké části rozlišen modelovou dynamikou. Naproti tomu schéma hluboké konvekce 3MT, zajišťující postupný přechod k rozlišené konvekci při zvyšování rozlišení modelu, je stále aktivní.

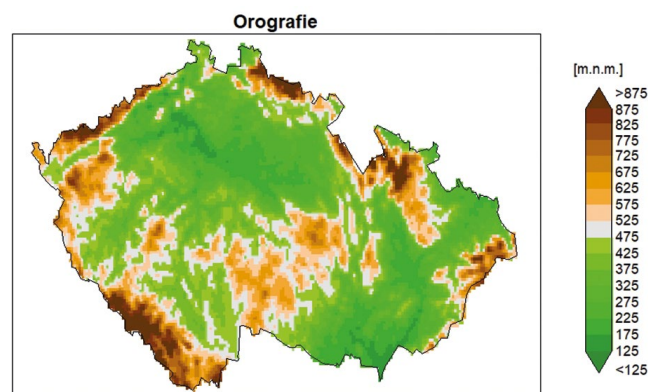
Samotná PERUN/Reanalysis je tvořena asimilačním cyklem s krokem 6 hodin. Poté je každý den vždy z analýzy v 00:00 UTC provedena předpověď modelu s délkou 30 hodin. Prvních šest hodin předpovědi se nepoužívá, aby se vyloučila doba přizpůsobení modelu na vstupní data. Následné předpovědi v rozsahu od +6 do +30 hodin poskytují stav atmosféry a povrchu s 1hodinovou frekvencí. Předmětem validace jsou právě tyto předpovědi.

2.2 Pozorovaná data

Pro validaci reanalýzy PERUN/Reanalysis na území České republiky používáme tzv. technické řady, které jsou odvozeny z původních staničních měření poskytovaných ČHMÚ. Nejprve jsme testovali kvalitu časových řad jednotlivých meteorologických prvků, poté byly datové řady homogenizovány použitím několika statistických testů (Štěpánek et al. 2013) a následně pomocí geostatistických metod byly doplněny chybějící hodnoty (Štěpánek et al. 2011). Globální

záření se na stanicích běžně neměří, a proto bylo vypočteno podle Ångströma (1924) z délky slunečního svitu.

Pro interpolaci staničních dat (technických řad) do pravidelné sítě jsme použili metodu regresního krigingu, ve které jsme jako prediktory využili různé charakteristiky terénu, například nadmořskou výšku a drsnost a dále zem. šířku a zem. délku. Pomocí metody regresního krigingu vznikly pro všechny meteorologické prvky v denním kroku mapy s prostorovým rozlišením 500 m. K vrstvě vytvořené interpolačním modelem byla přičtena rezidua, takže hodnoty v místech stanic odpovídají vstupním měřeným údajům. Z těchto map jsme následně získali hodnoty v uzlových bodech modelu ALADIN. Tyto časové řady pozorovaných prvků na území ČR označujeme jako *GriSt*. Na území České republiky je v síti modelu ALADIN 14 784 uzlových bodů. Orografie modelu ALADIN je znázorněna na obr. 1.



Obr. 1 Orografie v modelu ALADIN při rozlišení 2,3 km.

Fig. 1. Orography in the ALADIN model at a resolution scale of 2.3 km.

3. Metody

Pro ověření schopnosti reanalýzy PERUN/Reanalysis reprodukovat pozorované počasí a klima provádíme validaci pro třicetileté období 1990–2019. K tomuto účelu používáme několik základních meteorologických veličin a charakteristik. V rámci tohoto článku se zaměřujeme pouze na některé z těchto prvků. Konkrétně analyzujeme denní maximální, minimální a průměrnou teplotu vzduchu, úhrn srážek, rychlost větru, relativní vlhkost a globální záření.

Pro účely validace jsme data reanalýzy převedli na denní krok, i když samotná reanalýza je dostupná s hodinovým krokem. Denní minimální (maximální) teplota byla získána jako minimální (maximální) hodnota z hodinových minimálních (maximálních) teplot v časových termínech 22 h, 23 h a 24 h předchozího dne a 1–21 h daného dne. Denní průměrná teplota byla vypočtena jako průměr z průměrných hodinových teplot v termínech 7 h, 14 h a 2krát 21 h. Denní průměry rychlosti větru a relativní vlhkosti byly získány jako průměr z hodinových hodnot v 7, 14 a 21 h. Denní úhrny srážek a denní suma globálního záření byly vypočteny jako součet hodinových sum od 7 h daného dne do 7 h dne následujícího.

Pro ohodnocení shody mezi reanalýzou a pozorovanými daty používáme střední chybu, označovanou také jako bias. Střední chyba (*ME*) je určena jako průměrný rozdíl mezi denními hod-

notami reanalýzy a $GriSt$ ($x_{rea} - x_{GriSt}$). Dále počítáme střední absolutní chybu (MAE), která je průměrem absolutních hodnot rozdílů $|x_{rea} - x_{GriSt}|$. Pro srážky a globální záření používáme také střední relativní chyby jako:

$$MEr = \frac{x_{rea} - x_{GriSt}}{x_{GriSt}} \quad [1] \quad MAEr = \frac{|x_{rea} - x_{GriSt}|}{|x_{GriSt}|} \quad [2]$$

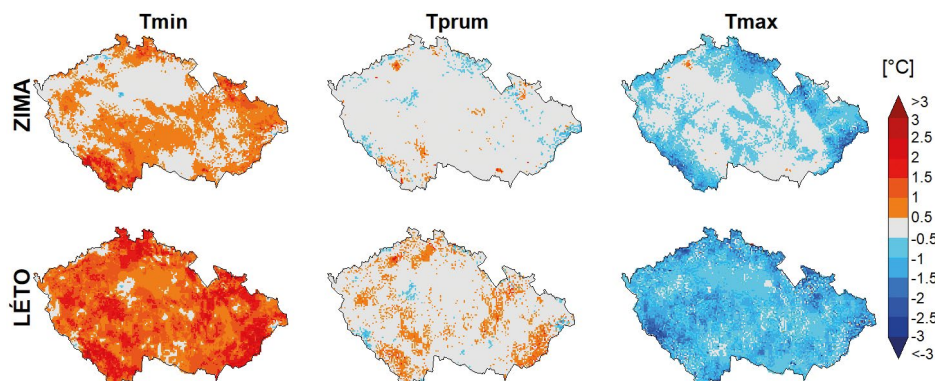
kde x_{rea} je hodnota zkoumané veličiny v reanalýze a x_{GriSt} v pozorováních. Z denních hodnot chyb počítáme měsíční a sezónní průměry, které následně zobrazujeme v mapách, grafech a tabulkových výstupech. Střední relativní chyby srážek jsou normovány měřením pro celý sledovaný časový úsek, aby se předešlo dělení zanedbatelnými či nulovými úhrny. Pro posouzení vzájemné korelace mezi denními daty z reanalýzy a $GriSt$ pro jednotlivé sezóny používáme Pearsonův korelační koeficient. Jako zimní období bereme měsíce prosinec, leden a únor, jako letní období červen, červenec, srpen atd.

Při studiu vlivu nadmořské výšky na jednotlivé veličiny vycházíme z rozdělení výšek, které používá ČHMÚ a které je uvedeno například v Elektronickém meteorologickém slovníku České meteorologické společnosti v hesle popis výskytu jevů v předpovědi počasí pro ČR (eMS 2023). Nižší polohy jsou definovány jako oblasti s nadmořskou výškou do 400 m n. m., střední polohy zahrnují oblasti od 400 do 600 m n. m., vyšší polohy od 600 do 800 m n. m. a horské polohy zahrnují oblasti s nadmořskou výškou nad 800 m n. m.

4. Výsledky

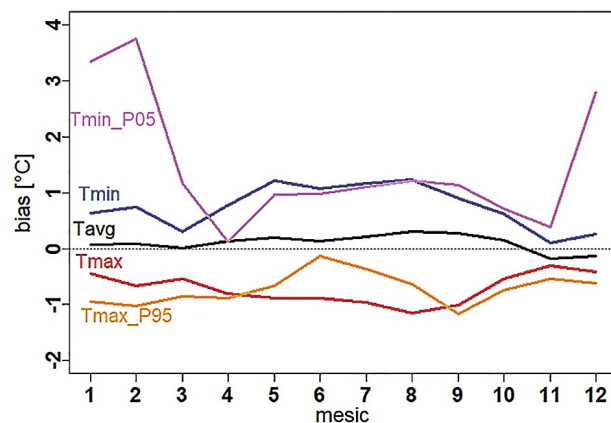
4.1 Teplota vzduchu

Na obr. 2 jsou zobrazeny mapy středních chyb mezi reanalýzou a pozorovanými hodnotami denní průměrné, minimální a maximální teploty. Na území České republiky jsou nejlépe simulovány denní průměrné teploty (obr. 2 uprostřed), jejichž střední chyba vůči pozorovaným hodnotám se pohybuje do 0,5 °C.



Obr. 2 Průměrná zimní (horní řádek) a letní (spodní řádek) střední chyba mezi teplotami z PERUN/Reanalysis a $GriSt$. Barevná škála ukazuje velikost chyby ve °C. Levý sloupec představuje denní minimální teplotu (T_{min}), prostřední denní průměrnou teplotu (T_{prum}) a pravý denní maximální teplotu (T_{max}).

Fig. 2. Average winter (top row) and summer (bottom row) mean error between temperatures from PERUN/Reanalysis and $GriSt$. The colour scale shows the magnitude of the error in °C. The left column represents daily minimum temperature (T_{min}), the middle daily average temperature (T_{prum}), and the right daily maximum temperature (T_{max}).



Obr. 3 Roční chod střední chyby mezi teplotami z PERUN/Reanalysis a $GriSt$.

Fig. 3. Annual cycle of mean error between temperatures from PERUN/Reanalysis and $GriSt$.

Rozdíly mezi reanalýzou a pozorovanými daty jsou mírně větší v letním období než v zimním. Na obr. 3 je zobrazen roční průběh střední chyby. Většina měsíců ukazuje mírné nadhodnocení průměrných teplot v reanalýze, s mírným podhodnocením v listopadu a prosinci (o -0,18 resp. -0,13 °C). Největší střední chybu jsme zjistili v červenci (0,42 °C) a nejmenší v březnu (0,01 °C). Korelační koeficienty mezi reanalýzou a pozorovanými daty jsou vysoké, na jaře a na podzim dosahují hodnoty 0,99 (tab. 1). Střední absolutní chyba je největší v zimě, kdy dosahuje hodnoty 1 °C.

Denní minimální teplota v reanalýze je na většině území a v průběhu celého roku nadhodnocena. Toto nadhodnocení je větší v létě než v zimě. Největší střední chyba se vyskytuje v srpnu, kdy reanalýza v průměru nadhodnocuje o 1,2 °C. Naopak nejmenší střední chyba je v listopadu s hodnotou 0,1 °C. Rozdíl mezi létem a zimou je vidět také v korelačním koeficientu, který má v létě hodnotu 0,89 a v zimě 0,94.

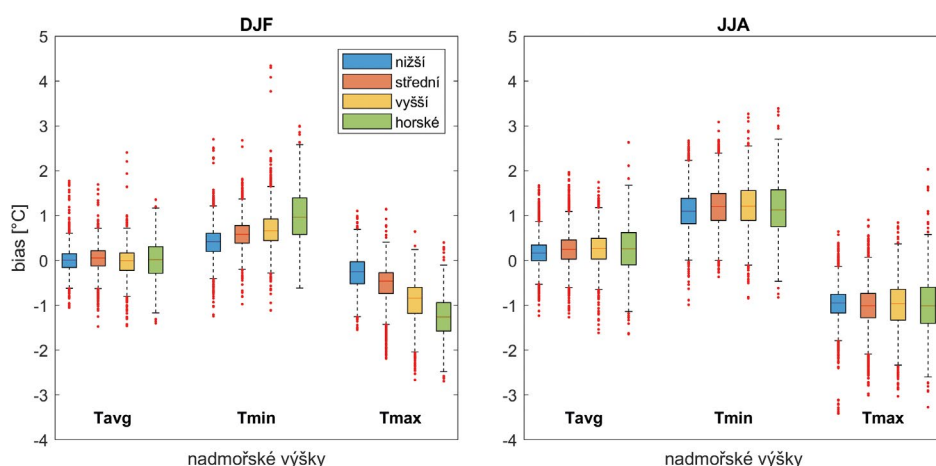
Denní maximální teplota v reanalýze je na většině území a ve všech měsících podhodnocena. Největší podhodnocení jsme zaznamenali v srpnu s průměrnou hodnotou -1,2 °C a nejmenší v listopadu s hodnotou -0,3 °C (obr. 3). Střední absolutní chyba je největší v létě, kdy dosahuje hodnoty 0,5 °C. Korelační koeficient mezi reanalýzou a pozorovanými daty je vysoký ve všech sezónách a má hodnotu od 0,95 do 0,98.

Dále jsme zkoumali možnou závislost střední chyby mezi reanalýzou a pozorovanými daty na nadmořské výšce. Pro tento účel jsou jednotlivé body modelu rozděleny do čtyř kategorií na základě nadmořské výšky. Výsledky jsou zobrazeny pomocí boxplotů na obr. 4. Vliv nadmořské výšky na střední chybu (bias) je patrný v zimním období pro maximální teplotu a méně výrazně pro mi-

Tab. 1 Korelační koeficient a střední absolutní chyby mezi denními daty z reanalýzy a GriSt. Uvedena je průměrná hodnota přes všechny body sítě.

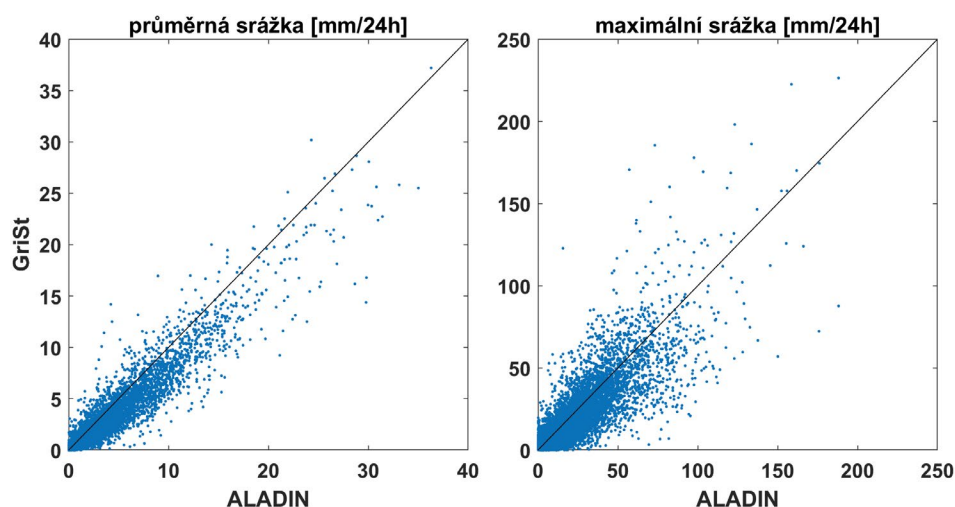
Table 1. Correlation coefficient and mean absolute errors between daily reanalysis data and GriSt. The average value over all grid points is given.

	Korelační koeficient				Střední absolutní chyba			
	jaro	léto	podzim	zima	jaro	léto	podzim	zima
T_{prum}	0,99	0,96	0,99	0,97	0,8 °C	0,9 °C	0,8 °C	1,0 °C
T_{min}	0,95	0,89	0,96	0,94	1,4 °C	1,5 °C	1,2 °C	1,5 °C
T_{max}	0,98	0,96	0,98	0,95	1,3 °C	1,5 °C	1,2 °C	1,2 °C
vítr	0,82	0,73	0,83	0,83	1,0 m·s ⁻¹	1,0 m·s ⁻¹	1,1 m·s ⁻¹	1,2 m·s ⁻¹
vlhkost	0,85	0,84	0,82	0,69	6,0 p.b.	6,2 p.b.	4,7 p.b.	5,8 p.b.
záření	0,91	0,89	0,93	0,82	682 W·m ⁻²	658 W·m ⁻²	459 W·m ⁻²	449 W·m ⁻²



Obr. 4 Boxplot středních chyb mezi teplotami z PERUN/Reanalysis a GriSt rozdělených podle nadmořské výšky pro zimu (DJF, vlevo) a léto (JJA, vpravo). Boxplot reprezentuje median (střední červená čára) a dolní a horní kvartil. Vousy grafu jsou dlouhé 1,5krát mezikvartilová šířka, červené body nad/pod touto hranicí jsou vykresleny jako odlehle hodnoty.

Fig. 4. Boxplot of mean errors between temperatures from PERUN/Reanalysis and GriSt divided by altitude for winter (DJF, left) and summer (JJA, right). On each box, the central mark indicates the median, and the bottom and top edges of the box indicate the 25th and 75th percentiles, respectively. The vertical lines extend to the most extreme data points (75th percentile + interquartile range, or 25th percentile – interquartile range) not considering outliers, with outliers plotted individually as red dots.



Obr. 5 Scatterplot průměrných denních úhrnů a maximálních denních úhrnů srážek z PERUN/Reanalysis vůči GriSt.

Fig. 5. Scatter plot of average daily totals and maximum daily precipitation totals from PERUN/Reanalysis against GriSt.

nimální teplotu. Naopak v létě tato závislost není pozorována. Střední chyba pro denní průměrnou teplotu není závislá na nadmořské výšce v žádném ročním období.

Dalším zkoumaným faktorem je schopnost reanalýzy zachytit extrémní teploty. Zaměřili jsme se na 5 % nejnižších denních minimálních teplot (P05 T_{min}) a na 5 % nejvyšších denních maximálních teplot (P95 T_{max}). Roční chod střední chyby těchto extrémů je zachycen na obr. 3 fialovou a oranžovou barvou křivek. Reanalýza má sklon nadhodnocovat teplotu velmi chladných dnů (P05 T_{min}). V zimním období je toto nadhodnocení velmi výrazné, na velké části území je střední chyba vyšší než 3 °C. Největší střední chyba je v únoru, kdy průměr přes všechny body sítě dosahuje hodnoty 3,8 °C, naopak nejnižší chyba je v dubnu (0,1 °C). V ostatních sezonách je střední chyba velmi chladných dnů srovnatelná s průměrem minimálních teplot.

Velmi horké dny (P95 T_{max}) reanalýza podhodnocuje. V zimě je podhodnocení výraznější než v létě, ale je srovnatelné s biasem pro průměrné hodnoty T_{max} . V letních měsících je střední chyba pro velmi horké dny dokonce nižší (v absolutní hodnotě) než pro průměrné T_{max} . Největší střední chyba je zaznamenána v měsíci říjnu (–1,2 °C) a nejmenší v červenci (0,1 °C).

Rozdíly mezi teplotami v reanalýze a staničními daty lze částečně vysvětlit nedostatečnou asimilací povrchových dat a nedostatečným promícháváním vzduchu mezi vrstvami modelu. Tyto nedostatky mají vliv zejména na biasy denních minimálních a maximálních teplot.

4.2 Srážky

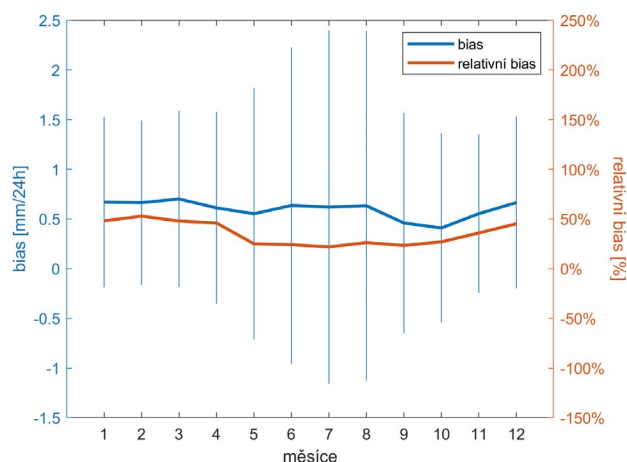
Velká prostorová proměnlivost srážek a složité srážkotvorné mikrofyzikální procesy v oblačnosti činí pro numerické modely předpověď srážek velmi problematickou. Jejich předpověď bývá zatížena v první řadě prostorovou chybou, která pramení z ovlivnění srážek orografií. Bývá ovšem

často ovlivněna i systematickou chybou způsobenou nepřesným modelovým popisem srážkotvorných procesů či případně nedostatečnými počátečními podmínkami, hlavně tedy popisem oblačnosti. Při hodnocení srážek z třicetiletého období 1990–2019 jsme zjistili velmi dobré korelace mezi průměrnými i maximálními denními úhrny v reanalýze a staničními měřeními *GriSt* (obr. 5, tab. 2). V obou případech jsou nejniž-

Tab. 2 Korelační koeficient denních úhrnů srážek a maximálních denních úhrnů srážek, střední a střední relativní chyby mezi daty z reanalýzy a *GriSt*. Uvedena je průměrná hodnota přes všechny body sítě.

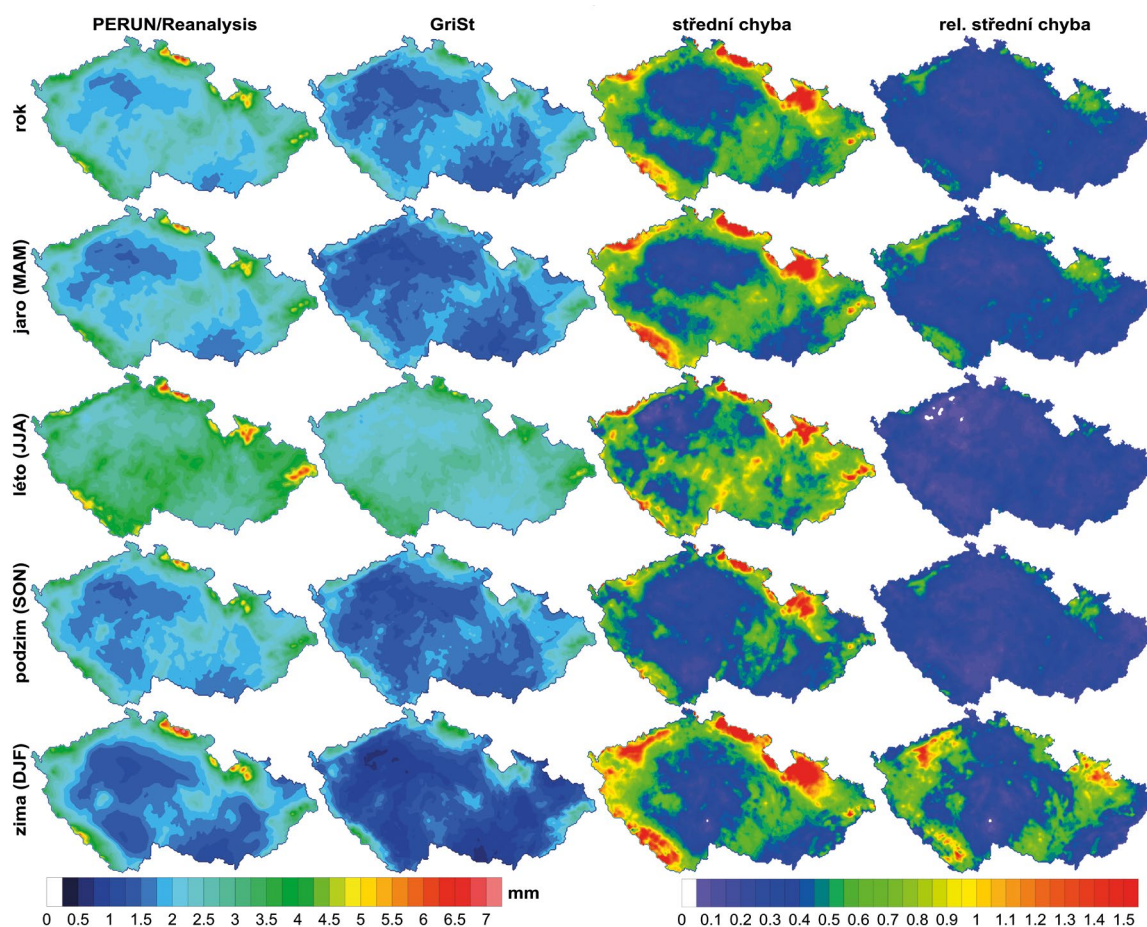
Table 2. Correlation coefficient of daily precipitation totals and maximum daily precipitation totals, mean and mean relative errors between reanalysis data and *GriSt*. The average value over all grid points is given.

	Korelace průměrů	Korelace maxim	MAE [mm]	MAE rel.	ME [mm]	ME rel.
rok	0,95	0,85	1,45	0,79	0,60	0,33
jaro	0,95	0,82	1,36	0,81	0,62	0,37
léto	0,94	0,82	2,30	0,88	0,63	0,24
podzim	0,96	0,86	1,11	0,67	0,47	0,28
zima	0,96	0,85	1,00	0,73	0,67	0,48



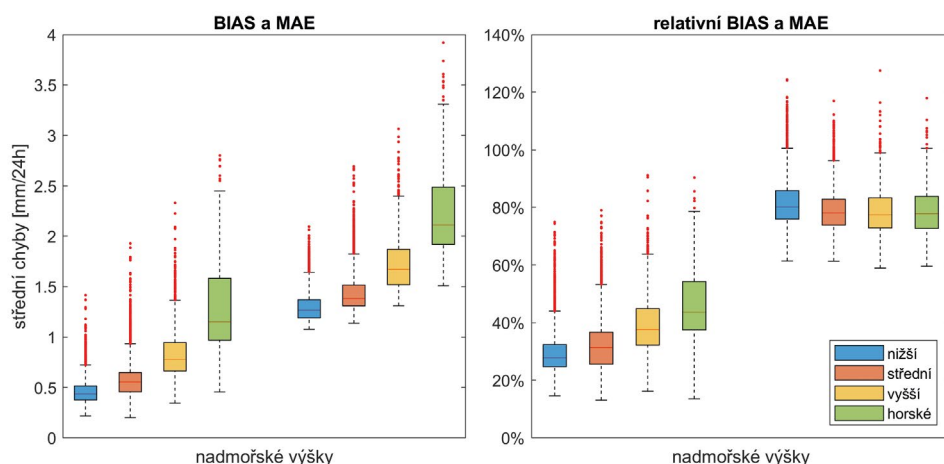
Obr. 7 Roční chod střední chyby (modře) a střední relativní chyby (červeně) mezi denními úhrny srážek z PERUN/Reanalysis a *GriSt*. Střední chyba (modře) je doplněna rozpětím směrodatné odchylky.

Fig. 7. Annual cycle of mean error (blue) and mean relative error (red) between daily precipitation totals from PERUN/Reanalysis and *GriSt*. The mean error (in blue) is supplemented by the standard deviation range.



Obr. 6 Průměrné denní úhrny srážek z PERUN/Reanalysis (první sloupec) a ze staničních měření *GriSt* (druhý sloupec) doplněné o střední chybu (třetí sloupec) a střední relativní chybu (čtvrtý sloupec). Řádky představují průměrné hodnoty pro všechny dny v roce (první řádek) a následně pro jednotlivé sezóny (druhý až pátý řádek). Hodnoty v prvních 3 sloupcích jsou uvedeny v mm, střední relativní chyba je poměr dle rovnice [1].

Fig. 6. Mean daily precipitation totals from PERUN/Reanalysis (first column) and *GriSt* station measurements (second column) supplemented with mean error (third column) and mean relative error (fourth column). The lines represent average values for all days of the year (first line) and then for individual seasons (second to fifth line). The values in the first 3 columns are given in mm, the mean relative error is the ratio according to equation [1].



Obr. 8 Boxplot středních a středních relativních chyb denních úhrnů srážek mezi PERUN/Reanalysis a GriSt rozdělených podle nadmořské výšky. Popis grafu viz obrázek 4.

Fig. 8. Boxplot of the mean and mean relative errors of daily precipitation totals between PERUN/Reanalysis and GriSt divided by elevation. See figure 4 for explanation.

ší korelace v létě, pro průměrné úhrny dosahují hodnoty 0,94 a pro maximální úhrny 0,82.

Na obr. 6 je znázorněno prostorové rozložení srážek v reanalýze a v pozorováních a také jejich střední chyby. Nejvyšší průměrné hodnoty srážek jsou dosaženy v létě, nejvyšší lokální úhrny jsou dosahovány ve vyšších a horských polohách. Průměrná relativní střední chyba za celý rok ukazuje přecenění srážek v reanalýze o 33 %. Na jaře a v zimě je nadhodnocení o něco vyšší než v létě a na podzim. To pravděpodobně může souviset s podceněním měřených sněhových srážek v zimním období. V zimě může podcenění měřených srážek automatickými srážkoměry činit až 50 % (vypařování vody při rozpouštění sněhu, vyfoukávání sněhu ze srážkoměru atd.), v létě je chyba menší, ale opět se jedná o podhodnocení, kdy používané člunkové srážkoměry s rozlišením 0,1 mm se při vysokých srážkových intenzitách nestíhají překlápět. Střední chyba nevykazuje při rozdělení na jednotlivé měsíce zřetelný roční chod, pouze větší rozptýlení hodnot v letních měsících (obr. 7), což je způsobeno vyšší variabilitou letních především konvektivních srážek.

V ploše se v průměru nejvyšší relativní chyby vyskytují v oblasti Doupovských hor, Blanského lesa, Krkonoš, Jeseníků a Dražanské vysočiny a to opět převážně v zimě, minimální chyby jsou v létě. Nejnižších hodnot dosahují v létě oblasti Českého středohoří a Polabí. Na obr. 8 jsou znázorněny boxploty středních chyb v závislosti na nadmořské výšce. I když významně narůstá střední chyba i střední absolutní chyba s nadmořskou výškou, relativní chyby se s výškou výrazně nemění. Reanalýza tak srážky přeceňuje relativně stejně na celém území České republiky (viz také obr. 6), protože s výškou rostou i srážkové úhrny.

Nadhodnocení je způsobeno hlavně častějším výskytem předpovězených malých srážek. To může být způsobeno jednak přeceněním malých úhrnů srážek v modelu, nebo chybami při měření malých úhrnů způsobených např. výparem, nebo či omezenou citlivostí člunkového srážkoměru na měření velmi nízkých úhrnů srážek. Vyšší chyby na jaře a v zimě mohou být způsobeny především problematickým měřením sněhových srážek, které může vést k podcenění celkového měřeného úhrnu.

4.3 Rychlost větru, relativní vlhkost a globální záření

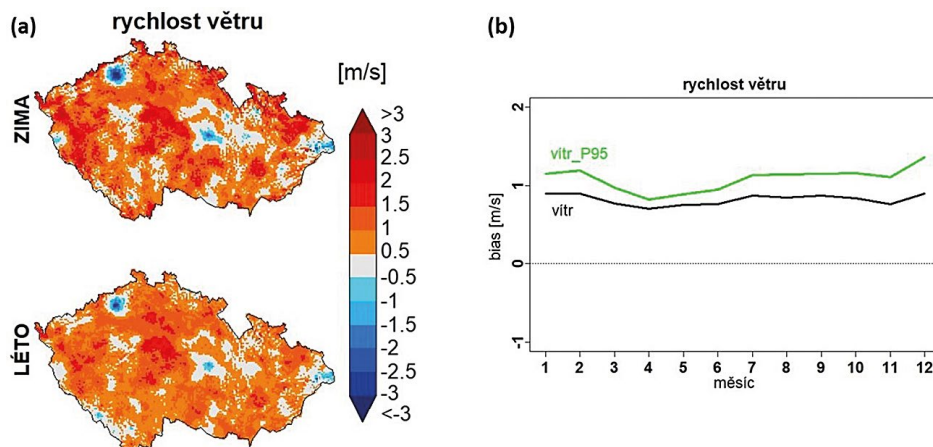
Na obr. 9 je zobrazeno geografické rozložení střední chyby mezi rychlostí větru z PERUN/Reanalysis a GriSt. Reanalýza dává na většině území větší hodnoty než pozorování. Střední chyba je v průběhu roku téměř stejná a pohybuje se kolem $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Zajímavé jsou oblasti, kde reanalýza dává menší hodnoty než pozorování. Největší rozdíl je na severozápadě republiky v okolí měřicí stanice Milešovka. Jak je známo, tak Milešovka je velmi větrná stanice a při přepočtu do pravidelné sítě GriSt se to projeví vyšší rychlostí větru v okolí této stanice. Zároveň je nutno brát v potaz, že nadmořská výška

gridových bodů modelu ALADIN je v okolí Milešovky o cca 350 m nižší, než je skutečná výška stanice. Podobná situace vznikla i na Vysočině v okolí stanice Svratouch, i když zde se nadmořská výška stanice a okolních gridových bodů liší jen o 70 m. Střední chybu jsme spočítali i pro extrémní rychlosti větru (5 % dní s nejvyšší rychlostí větru, P95). Ve všech sezónách je jen o málo větší než chyba průměrné rychlosti větru.

Střední chyba relativní vlhkosti se nejčastěji pohybuje v rozmezí od -10 do 10 procentních bodů a má výrazný roční chod (obr. 10). Zatímco v zimě je relativní vlhkost reanalýzou nadhodnocována, tak v letním období dochází na většině území k podhodnocení. Výjimkou je několik oblastí na hranici republiky, na jihu Moravy a v okolí Prahy, kde je vlhkost nadhodnocena. Obecně je vlhkost hůře zachycena v zimě, kdy je korelace mezi časovými řadami 0,69.

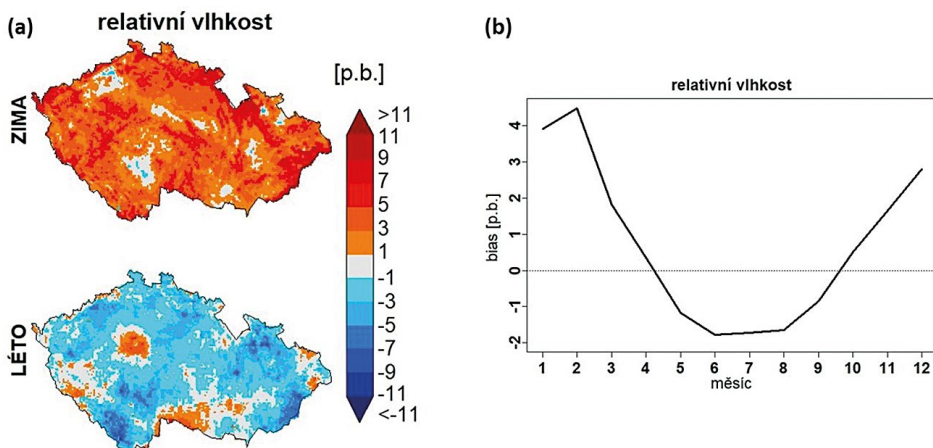
Globální záření je nejhůře simulováno v zimním období, korelace mezi PERUN/Reanalysis a GriSt dosahuje hodnoty 0,82 (tab. 1). Střední absolutní chyba dosahuje v zimě hodnoty $450 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a v létě $660 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Vzhledem k tomu, že globální záření má výrazný roční chod (v letním období je dvojnásobná délka slunečního svitu než v zimě), tak střední absolutní chyba může být poměrně zavádějící. Proto pro porovnání hodnot v PERUN/Reanalysis a GriSt spíše používáme střední relativní chybu. Globální záření je během celého roku nadhodnocováno. Relativní chyba je v letním období v průměru 7 %, v zimě 56 % (obr. 11).

Biasy v rychlosti větru a globálního záření nemusí být způsobeny pouze nedostatky modelu (např. nedostatečnou asimilací dat), ale i možnými systematickými chybami ve staničních měřeních. Například u měření rychlosti větru může celoročně docházet k měření nižších hodnot vlivem rostoucí vegetace v okolí stanice nebo vlivem tření na ložiscích anemometrů. Podobně vlivem vegetace může v zimním období docházet k zastínění slunoměrů.



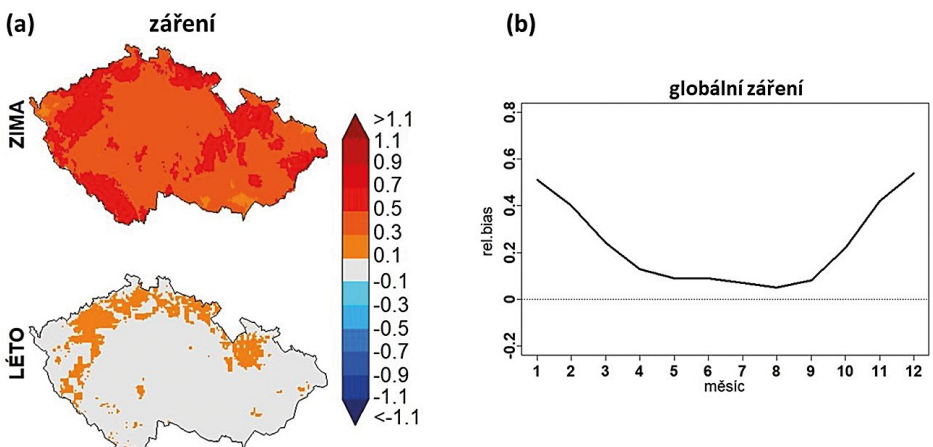
Obr. 9 (a) Průměrná zimní (horní řádek) a letní (spodní řádek) střední chyba mezi rychlostí větru z PERUN/Reanalysis a GriSt. (b) Roční chod střední chyby.

Fig. 9. (a) Average winter (top row) and summer (bottom row) mean error between wind speed from PERUN/Reanalysis and GriSt. (b) Annual cycle of the mean error.



Obr. 10 (a) Průměrná zimní (horní řádek) a letní (spodní řádek) střední chyba mezi relativní vlhkostí z PERUN/Reanalysis a GriSt. (b) Roční chod střední chyby.

Fig. 10. (a) Average winter (top row) and summer (bottom row) mean error between relative humidity from PERUN/Reanalysis and GriSt. (b) Annual cycle of the mean error.



Obr. 11 (a) Průměrná zimní (horní řádek) a letní (spodní řádek) střední relativní chyba mezi globálním zářením z PERUN/Reanalysis a GriSt. (b) Roční chod střední relativní chyby.

Fig. 11. (a) Average winter (top row) and summer (bottom row) mean relative error between global radiation from PERUN/Reanalysis and GriSt. (b) Annual cycle of the mean relative error.

5. Závěr

Regionální reanalýza PERUN/Reanalysis je založena na numerickém předpovědním modelu ALADIN, který byl upraven pro klimatologické výpočty. Pro validaci této reanalýzy na území České republiky jsme využili technické řady GriSt, které vznikly interpolací původních staničních měření do pravidelné sítě modelu ALADIN. Analyzovali jsme 30leté období 1990–2019. Při validaci jsme se soustředili zejména na teplotu vzduchu (minimální, maximální a průměrnou) a srážky. Základní validaci jsme provedli také pro rychlost větru, relativní vlhkost a globální záření.

Reanalýza a pozorované hodnoty denních teplot vykazují určité rozdíly. Nejmenší střední chyba (do 0,5 °C) byla zjištěna pro denní průměrné teploty. Denní minimální teploty jsou v reanalýze nadhodnoceny po celý rok a denní maximální teploty jsou naopak podhodnoceny. V zimním období je patrný vliv nadmořské výšky na střední chybu maximální a minimální teploty. V letním období tato závislost nebyla pozorována.

Při hodnocení srážek byly zjištěny velmi dobré korelace mezi průměrnými i maximálními denními úhrny v reanalýze a staničními měřeními GriSt. V obou případech jsou nejnižší korelace v létě. Úhrny srážek jsou v průběhu celého roku v reanalýze nadhodnoceny. Relativní střední chyba ukazuje nadhodnocení srážek v průměru o 33 %, s vyššími hodnotami na jaře a v zimě. Střední chyba i střední absolutní chyba výrazně roste s nadmořskou výškou, ale relativní chyby se s výškou zásadně nemění.

Výsledky validace ukazují, že sice existují rozdíly mezi PERUN/Reanalysis a pozorovanými daty GriSt, ale tyto rozdíly nejsou velké a částečně mohou být způsobeny systematickými chybami měření na stanicích. Díky vysokému prostorové rozlišení představuje tato regionální reanalýza cenný zdroj dat, který lze použít k dalšímu studiu klimatických charakteristik v České republice.

Poděkování:

Tento příspěvek vznikl v rámci řešení projektu „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku, PERUN“ (SS02030040), který je podporován Technologickou agenturou ČR. Projekt je řešen ve spolupráci Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ), Ústavu výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i. (ÚVGZ), Výzkumného ústavu vodohospodářského, v. v. i. (VÚV), České geologické služby (ČGS), Ústavu fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i. (ÚFA), Matematickofyzikální fakulty (MFF UK) a Přírodovědecké fakulty (PřF UK) Univerzity Karlovy a PROGEO, s. r. o. (PROGEO).

Literatura:

- ÅNGSTRÖM, A., 1924. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. **50**, s. 121–125. ISSN 0035-9009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/qj.49705021008>.
- BROŽKOVÁ, R., DERKOVÁ, M., BELLUŠ, M., FARDA, F., 2006. Atmospheric forcing by ALADIN/MFSTEP and MFSTEP oriented tunings. *Ocean Science Discussions*, Vol. **3**, s. 319–342. ISSN 1812-0822. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/os-2-113-2006>.
- DEE, D. P., UPPALA, S. M., SIMMONS, A. J., BERRISFORD P., POLI, P. et al., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. **137**, s. 553–597. ISSN 0035-9009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
- eMS, 2023. Elektronický meteorologický slovník (eMS) ČMeS [online]. Česká meteorologická společnost [cit 07.08.2023]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz>.
- GIARD, D., BAZILE, E., 2000. Implementation of a New Assimilation Scheme for Soil and Surface Variables in a Global NWP Model. *Monthly Weather Review*, roč. **128**, č. 4, s. 997–1015. ISSN 0027-0644. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128%3C0997:IOANAS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128%3C0997:IOANAS%3E2.0.CO;2).
- HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A. et al., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. **146**, s. 1999–2049. ISSN 0035-9009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- HUTH, R., METELKA, L., HALENKA, T., MLÁDEK, R., HUTHOVÁ, Z. et al., 2003. Regionální klimatické modelování v České republice – projekt ALADIN-Climate. *Meteorologické zprávy*, roč. **56**, č. 4, s. 97–103. ISSN 0026-1173.
- HUTH, R., KYSELÝ, J., POKORNÁ, L., FARDA, A., MLÁDEK, R. et al., 2004. Měsíční integrace modelu ALADIN v klimatickém modu: vliv některých parametrů. *Meteorologické zprávy*, roč. **57**, č. 2, s. 41–46. ISSN 0026-1173.
- KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D. et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. **77**, s. 437–471. ISSN 0003-0007. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2).
- SKALÁK, P., ŠTĚPÁNEK, P., FARDA, A., 2008. Validation of ALADIN-Climate/CZ for present climate (1961–1990) over the Czech Republic. *Időjárás*, Vol. **112**, s. 191–201. ISSN 0324-6329.
- ŠTĚPÁNEK, P., ZAHRADNÍČEK, P., HUTH, R., 2011. Interpolation techniques use for data quality control and calculation of technical series: an example of a Central European daily time series. *Időjárás*, Vol. **115**, s. 87–98. ISSN 0324-6329.
- ŠTĚPÁNEK, P., ZAHRADNÍČEK, P., FARDA, A., 2013. Experiences with data quality control and homogenization of daily records of various meteorological elements in the Czech Republic in the period 1961–2010. *Időjárás*, Vol. **117**, s. 123–141. ISSN 0324-6329.
- TERMONIA, P., FISCHER, C., BAZILE, E., BOUYSSSEL, F., BROŽKOVÁ, R. et al., 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geoscientific Model Development*, Vol. **11**, s. 257–281. ISSN 1991-9603. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>.

Lektoři (Reviewers):

RNDr. Radim Tolasz, Ph.D., doc. Mgr. Peter Huszár, Ph.D.