

SOKOL, Z., ŘEZÁČOVÁ, D., 2023. Změna rozdělení srážek při růstu teploty vyjádřená v diagnostických a prognostických datech. In: TOLASZ, R., POLCAROVÁ, E. (Eds.), 2023. Sborník příspěvků z První konference projektu PERUN (TA ČR, SS02030040). Praha: ČHMÚ, 112–122, ISBN 978-80-7653-063-8. <https://doi.org/10.59984/978-80-7653-063-8.16>

Změna rozdělení srážek při růstu teploty vyjádřená v diagnostických a prognostických datech

(Change in precipitation distribution as temperature rises expressed in diagnostic and prognostic data)

Zbyněk Sokol, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., sokol@ufa.cz
Daniela Řezáčová, Ústav fyziky atmosféry AV ČR, v. v. i., rez@ufa.cz

Abstrakt: Shrnujeme hlavní výsledky, které ukazují, jak se mění rozdělení srážek s rostoucí teplotou. Hodnocení využívá hodinové úhrny z 97 srážkových stanic z území České republiky za roky 1997 až 2019. Hodnoty přízemní teploty, přízemního rosného bodu a výstupné kondenzační hladiny jsou užity pro vyjádření teplotní změny. Výsledky ukazují, jak se teplotní růst napětí nasycení (*CC scaling*) projevuje v rozložení hodnot srážek na studovaném území. Obecně se nárůst srážek v závislosti na sledovaných teplotách zřetelně projevuje u horních kvantilů avšak pouze pro určité intervaly teplot, což potvrzuje závěry i jiných prací. V práci jsou obdobně jako naměřená data zpracována data z reanalýz provedených modelem ALADIN-CLIMAT/CZ.

Klíčová slova: Clausiusova Clapeyronova rovnice – srážky – závislost intenzity srážek na teplotě

Abstract: We summarize the main results that show how the distribution of precipitation changes with increasing temperature. Hourly rainfall totals from 97 rain gauge stations in the Czech Republic for the years 1997 to 2019 are used for the evaluation. Ground temperature, ground dew point temperature and temperature at the lifting condensation level are used to express the temperature change. The results show how an increase in temperature and a corresponding increase in saturation humidity (*CC scaling*) affects the distribution of precipitation in the study area. In general, the increase in precipitation as a function of observed temperature is clearly evident for the upper quantile values, but only for certain temperature intervals. It confirms the findings of other studies. In this paper, data from reanalyses performed by the ALADIN-CLIMAT/CZ model are treated similarly to the measured data.

Keywords: Clausius Clapeyron equation – precipitation – dependence of precipitation intensity on temperature

1. Úvod

Nárůst silných srážek vyvolaný zvyšující se povrchovou teplotou bývá prezentován jako závažný důsledek zvýšení teploty a z toho vyplývajícího nárůstu absolutní vlhkosti nasycení popsané Clausiovým Clapeyronovým vztahem (viz např. IPCC 2007; IPCC 2021). Průměrné zvýšení tlaku nasycení s teplotou je podle Clausiusova Clapeyronova vztahu $7\% \cdot K^{-1}$. Tato hodnota se často označuje jako referenční hodnota CC. Nárůst není konstantní a klesá s vyššími teplotami; např. hodnota $7\% \cdot K^{-1}$ platí pro $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $6\% \cdot K^{-1}$ pro teploty kolem $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (viz např. Buerger et al. 2014).

Studie IPCC (2007) vychází z prací o zvýšení globální teploty a srážek, ale zdůrazňuje také význam změn v silných srážkách, které se vyznačují vysokými hodnotami srážkové vody (účinností srážek). Proto se zkoumá změna srážek s teplotou. Budeme ji vyjadřovat v % a označovat CC. Vypočtený gradient CC se porovnává s referenční hodnotou $CC = 7 \% \cdot K^{-1}$.

V poslední době vznikla řada studií, které používají různé postupy při statistickém zpracování změny srážek s teplotou. Změna byla sledována nejen jako funkce povrchové teploty, ale také s ohledem na význam vlhkosti, například jako funkce teploty přízemního rosného bodu a zkoušely se různé postupy, jak oslabit vliv srážek na přízemní teplotu. Byly také zkoumány rozdíly v charakteristikách konvektivních a stratiformních srážek. Odkazy na práce týkající se této problematiky lze nalézt v přehledové publikaci (Martínková a Kyselý 2020).

Změna rozdělení srážek s rostoucí teplotou je v řadě studií vyjádřena jako změna hodnoty vysokých kvantilů, typicky kvantilů nad 95 %, které charakterizují výskyt silných srážek. Pro danou pravděpodobnost změna kvantilu s teplotou odpovídá kombinované změně hodnoty a frekvence srážek (Myhre et al. 2019).

Cílem této práce je popsat vztah mezi teplotou a silnými srážkami s využitím hodinových úhrnů (1h) srážek ze stanic z ČR s dostatečně dlouhými řadami a porovnat je se vztahy, které vzniknou analýzou dat z reanalýz pomocí modelu ALADIN-CLIMAT/CZ (AC).

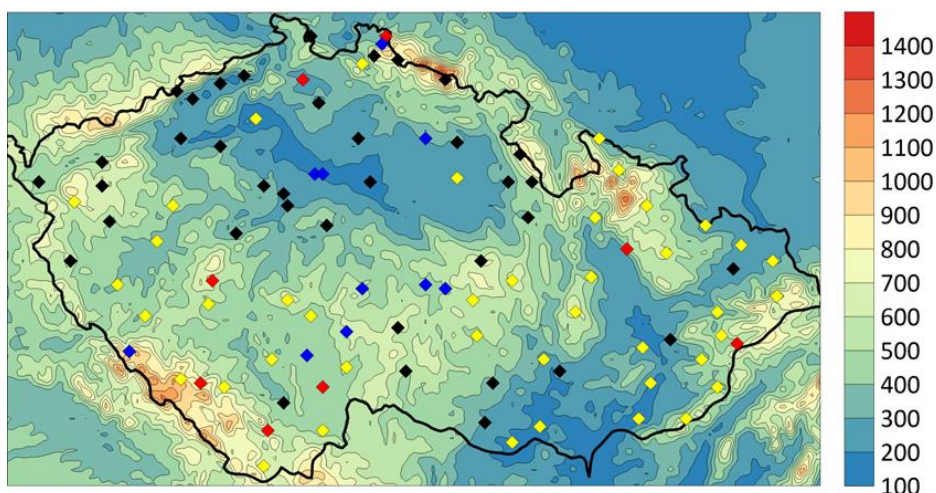
Příspěvek je uspořádán následovně: Dostupná vstupní data jsou popsána v následující části. V sekci 3 se zabýváme analýzou 1h měření srážek. V sekci 4 a 5 je popsána závislost 1h srážek na teplotě a teplotě rosného bodu ve výšce 2 m nad terénem a dále na teplotě ve výškové kondenzační hladině vlhkosti v přízemní atmosféře pro naměřené hodnoty srážek a srážek z reanalýz a následuje. Sekci 5 obsahuje závěr.

2. Data

Vstupní data se skládají ze dvou datových typů z teplé poloviny roku (duben–září). Diagnostická data jsou reprezentována měřením vybraných českých meteorologických stanic a modelová data jsou odvozena z reanalýz modelu AC.

Diagnostická data byla sestavena z klimatologické databáze ČHMÚ CLIDATA (Coufal a Tolasz 1997) z období 1997 až 2019. Hodnoty srážek za 1 hodinu byly analyzovány v závislosti na teplotě (T) a teplotě rosného bodu (T_d) ve výšce 2 m nad terénem a dále na teplotě ve výškové kondenzační hladině (T_{icl} , vypočteno podle Romps 2017).

Na základě dostupnosti dat byla použita data z 97 srážkoměrných stanic. Jednotlivá měření srážek byla v provozu v různých časech a po různou dobu (viz obr. 1). Pro analýzu bylo k dispozici celkem 44635 hodinových hodnot srážek. Analyzované hodinové hodnoty pocházejí ze dnů s denním úhrnem srážek alespoň 5 mm. Tato data navíc splňují podmínku, že měření teploty a vlhkosti jsou k dispozici v okruhu 10 km od srážkoměrné stanice a měření tlaku vzduchu v okruhu 150 km. Tato data byla potřeba pro výpočet T_d a T_{icl} . Hodnoty T a T_d se běžně používají při analýze CC. Přidali jsme hodnoty T_{icl} na základě předpokladu, že teplé základny oblaků jsou výhodnější pro vývoj srážek právě díky vyšší absolutní vlhkosti nasyceného vzduchu.



Obr. 1 Umístění stanic a orografie (barevná škála je v m). Barvy označují délku měření na stanicích (žlutá – 8 až 10 let, modrá – 11 až 15 let, černá – 16 až 20 let a červená – více než 20 let).

Fig. 1 Location of stations and orography (color scale is in m). Colours indicate the length of measurements at stations (yellow – 8 to 10 years, blue – 11 to 15 years, black – 16 to 20 years and red – more than 20 years).

Modelová data byla získána z reanalýz vypočtených modelem AC, který vychází z konfigurace modelu ALARO systému ALADIN (Termonia et al. 2018). Dynamika a parametrizační schémata modelu ALARO jsou uvedeny v odkazované publikaci. Modelová oblast pokrývá střední Evropu, horizontální krok sítě má délku 2.3 km a model má 87 vertikálních hladin, přičemž nejvyšší hladina je ve výšce přibližně 53 km nad zemí. Vertikální rozlišení u povrchu je přibližně 20 m. Model využívá plně elastické nehydrostatické dynamické jádro a fyzikální model vzniku a vývoje srážek 3MT (Gerard et al. 2009).

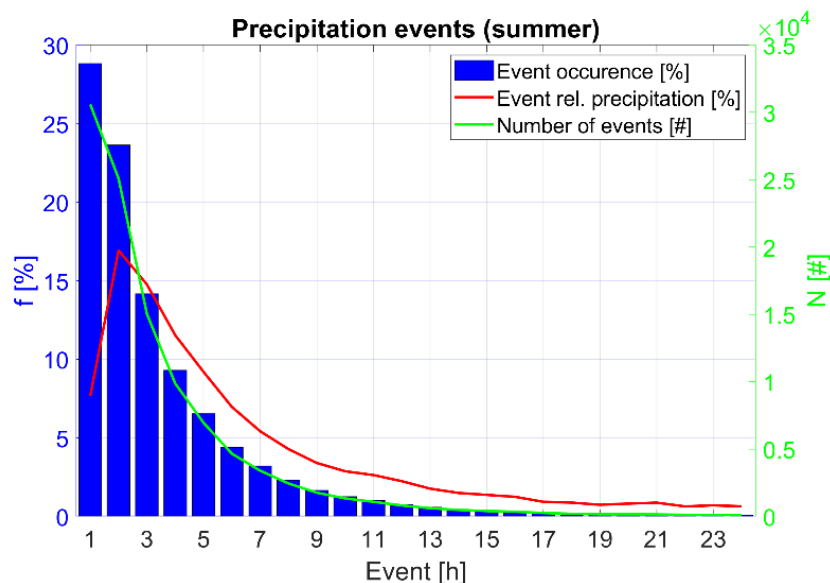
Jádrem reanalýzy je šestihodinový asimilační cyklus, kde je hlavní pozornost zaměřena na analýzu povrchových dat, která vychází z práce Giarda a Bazileho (2000). Při přípravě počátečních podmínek se využívá metoda Digital Filter Blending (Brožková et al. 2006), kdy jsou modelová data propojena s reanalýzou ERA5, která je rovněž použita pro boční okrajové podmínky a ty se připravují s časovým krokem 1 h. Při výpočtech se využívá reanalýza ERA5 z 00 h UTC a délka předpovědi je 30 h.

Při analýze byla využita modelová data odpovídající poloze stanic, tj. hodnoty z nejbližšího modelového uzlu, přičemž vzdálenost mezi stanicí a nejbližším uzlem je maximálně 1,3 km. Kromě toho byla použita pouze data splňující stejnou podmínku jako v případě staničních dat a to, že v daný den byly srážky minimálně 5 mm.

3. Analýza srážkových událostí

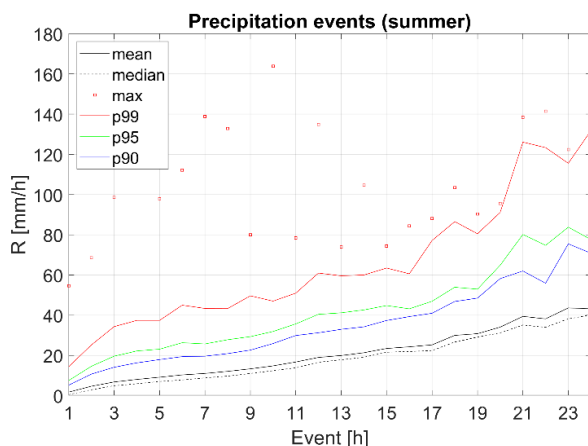
Účelem této sekce je prezentovat základní statistiky srážkových událostí. Definice události byla založena na poklesu srážek v hodině před a po události. Obr. 2 ukazuje charakteristiky izolovaných událostí, jejichž časové hranice jsou definovány poklesem srážek pod 0,2 mm/h. Základní statistické charakteristiky pro události různého trvání jsou uvedeny na obr. 3.

Obr. 2 potvrzuje klesající počet událostí s jejich délkou trvání. Kombinovaný vliv kratšího trvání a vyšší četnosti výskytu způsobuje, že nejvyšší maximální srážky jsou v kategorii trvání 2h. Obr. 3 ukazuje, že hodnoty charakteristik rozdělení srážek s výjimkou maxim rostou s dobou trvání události, a to i přes klesající počet událostí s delší dobou trvání. Nízký počet delších událostí však způsobuje „nehladký“ charakter závislostí v charakteristikách rozdělení. Zajímavý je výskyt vysokých maximálních srážek u kratších událostí, které pravděpodobně představují přívalové konvektivní přeháňky.



Obr. 2 Rozdělení n -hodinových srážkových událostí (horizontální osa) v souboru pozorovaných hodnot. Vodorovná osa – délka události [h]; levá svislá osa: relativní četnost f [%] hodnot délky události – modrý histogram, relativní množství vody [%] pro jednotlivé srážkové události – červená křivka; pravá svislá osa: absolutní četnost [#] jednotlivých srážkových událostí – zelená křivka.

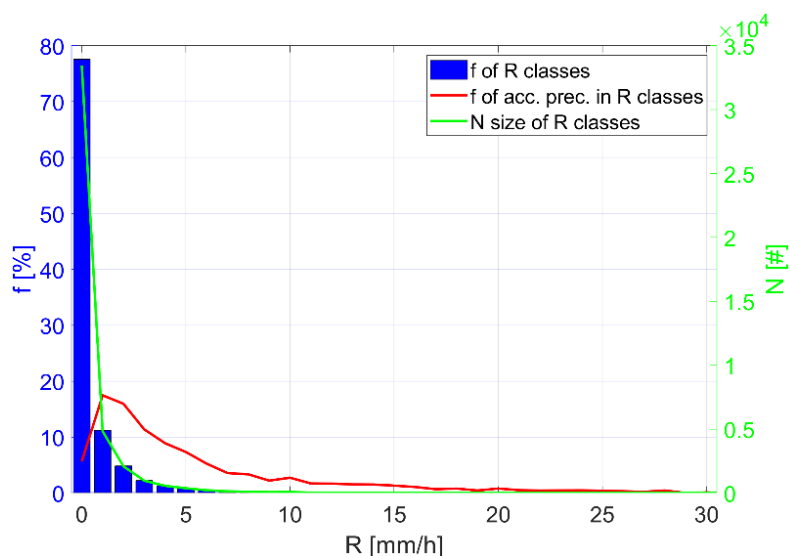
Fig. 2 Distribution of n -hour precipitation events (horizontal axis) in a set of observed values. Horizontal axis – event length [h]; left vertical axis: relative frequency f [%] of event length values – blue histogram, relative amount of water [%] for individual precipitation events – red curve; right vertical axis: absolute frequency [#] of individual precipitation events – green curve.



Obr. 3 Pro různé délky trvání srážkových událostí (horizontální osa) jsou zobrazeny charakteristiky srážek R : průměry, mediány, maxima a kvantily 90 %, 95 % a 99 %. Viz legenda.

Fig. 3 Precipitation characteristics R [mm/h] are shown for different duration of precipitation events (horizontal axis): averages, medians, maxima and quantiles of 90%, 95% and 99%. See legend.

Rozdělení 1h srážek z hlediska intenzity je zobrazeno na obr. 4. Je zřejmé, že nízké srážkové úhrny jsou nesrovnatelně četnější než vysoké a zároveň přinášejí mnohem větší množství srážek. V souboru hodnot 1h na obr. 4 je průměrná hodnota srážek 0,54 mm/h, maximální hodnota 42,70 mm/h a percentily 90, 95 99 a 99,5 % nabývají hodnot 1, 60, 2, 90, 7, 65 a 10, 90 mm/h.



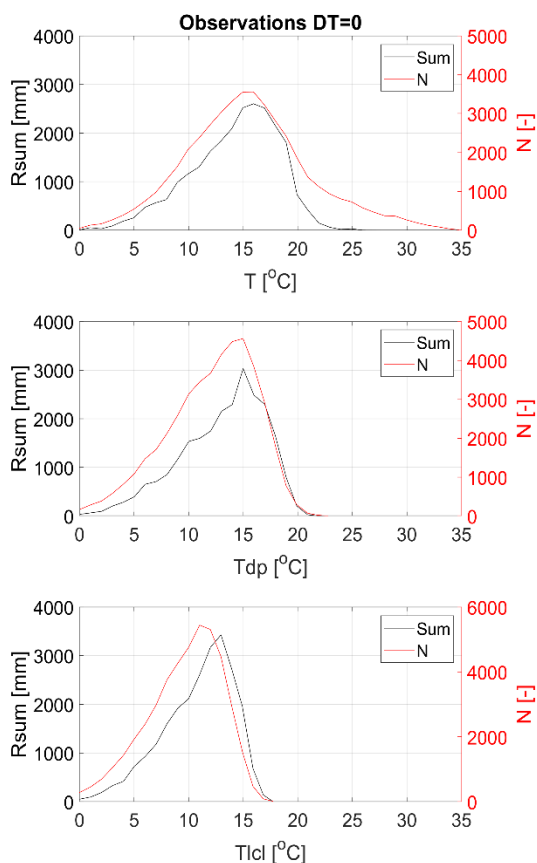
Obr. 4 Rozdělení 1h srážek v souboru pozorovaných hodnot. Vodorovná osa: hodnoty 1h srážek R [mm/h]; levá svislá osa: relativní četnost [%] hodnot v každé kategorii R – modrý histogram, relativní četnost [%] vodního množství v každé kategorii – červená křivka, pravá svislá osa: absolutní četnost [#] hodnot v každé kategorii – zelená křivka. Všechny hodnoty nad 30 mm/h jsou zahrnuty v poslední kategorii.

Fig. 4 Distribution of 1h precipitation in the set of observed values. Horizontal axis shows 1h precipitation values R [mm/h]. Left vertical axis shows relative frequency [%] of values in each R category by blue histogram and relative frequency [%] of water amount in each category as a red curve. Right vertical axis depicts absolute frequency [#] of values in each category as a green curve. All values above 30 mm/h are summarized in the last category.

4. Závislost 1h naměřených srážek na teplotě a vlhkosti v přízemní atmosféře

V této sekci jsou závislosti 1h srážek na charakteristikách teploty a vlhkosti ukázány na obr. 5, 6 a 7. Obr. 5 ukazuje celkový úhrn srážek R_{sum} a celkový počet hodinových úhrnů N v závislosti na hodnotách T , T_d a $Tlcl$, které byly stanoveny na konci hodiny měření srážek ($dt = 0$).

Obrázek 5 ukazuje rozdíly v intervalu hodnot T , T_d a $Tlcl$. Zatímco přízemní teplota dosahuje až k 35 °C, teplota přízemního rosného nedosahuje 25 °C a nejvyšší hodnoty teploty výstupné kondenzační hladiny jsou pod 20 °C. Maximum dosahují obě hodnoty R_{sum} a N kolem 15 °C, v důsledku větší výšky dosažené adiabatickým výstupem s odpovídajícím ochlazením je maximum $Tlcl$ mezi 10 °C and 15 °C.



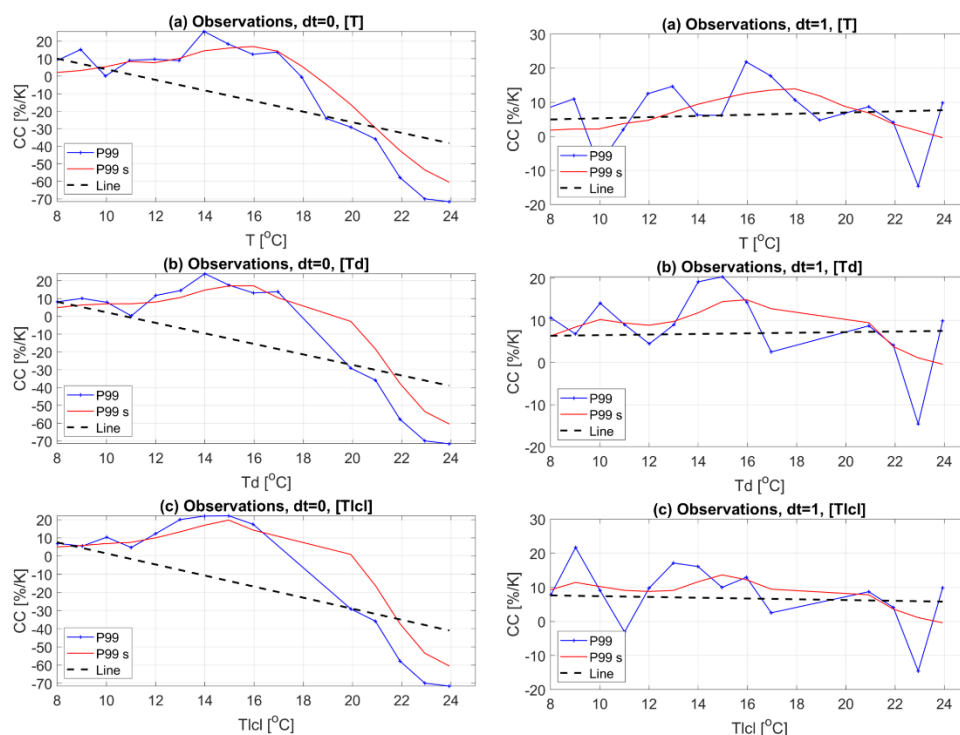
Obr. 5 Celková srážka R_{sum} [mm] a celkový počet 1h úhrnů N [-] v závislosti na hodnotě přízemní teploty T [°C], teploty přízemního rosného bodu T_d [°C] a teploty výstupné kondenzační hladiny T_{lcl} [°C].

Fig. 5 Total precipitation R_{sum} [mm] and the number of 1h totals N [-] depending on ground temperature T [°C], ground dew point temperature T_d [°C] and output condensation level temperature T_{lcl} [°C].

Obrázek 6 ukazuje závislost CC pro srážkové úhrny přesahující 99% kvantil na T , T_d a T_{lcl} . Levý sloupec s označením $dt = 0$ využívá naměřené hodnoty T , T_d a T_{lcl} na konci 1h srážkového intervalu (obdobně jako obr. 5). Pravý sloupec $dt = 1$ používá srážky, které jsou naměřeny v hodině následující po naměření/vypočtení hodnot T , T_d a T_{lcl} . Křivka $P99$ ukazuje přímo vypočtené hodnoty 99% kvantilu a $P99$ s je shladená křivka $P99$ běžícím průměrem s využitím 5 bodů. Přerušovaná přímka ukazuje trend za celý zobrazený interval. Mezi pravým a levým sloupcem je patrný rozdíl, který je nepochybně způsoben tím, že v levém sloupci srážky způsobují v některých případech ochlazení vzduchu a změnu relativní vlhkosti, což ovlivňuje T , T_d a T_{lcl} . V případech s $dt = 1$ může obdobné ovlivnění také nastat, ale nastává méně často, protože v čase měření nemusí vypadávat srážky. Pro všechny zobrazené závislosti je patrné, že CC do určité teploty narůstá, ale pak klesá. Tato vlastnost je typická i pro jiné studie. Konkrétní hodnota, kdy dochází ke zlomu trendu CC, se však výrazně v jednotlivých studiích liší a pravděpodobně závisí na lokalitě. Je však třeba upozornit na to, že pro vysoké hodnoty T , T_d a T_{lcl} je k dispozici menší počet dat, a proto získané vztahy nejsou robustní.

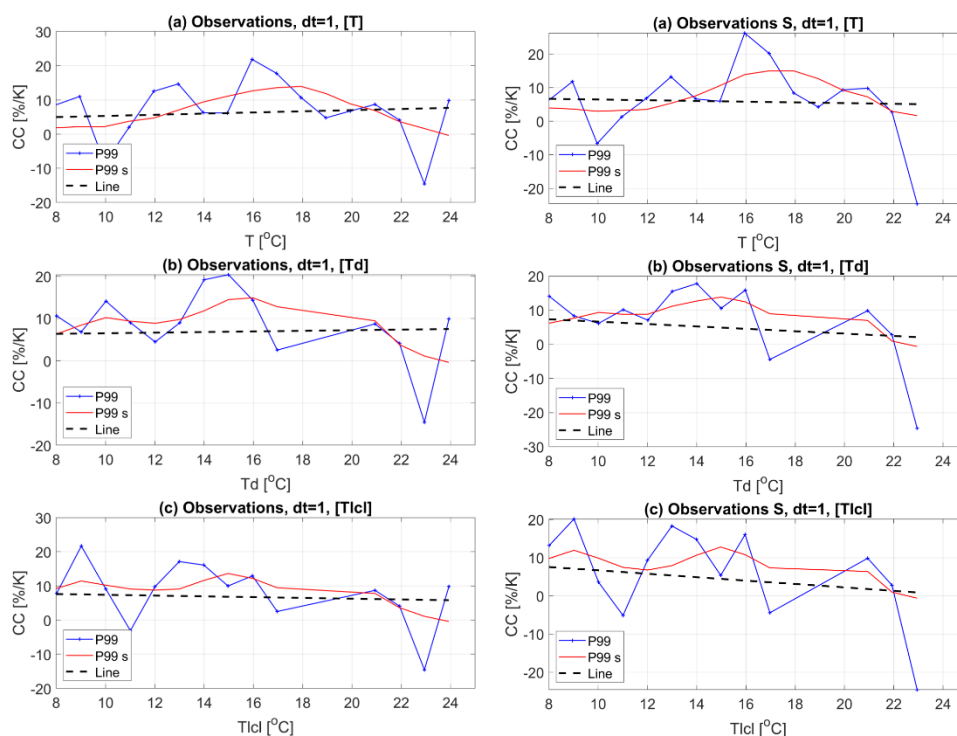
Hodnoty CC ve svých maximech významně překračují $CC = 7 \text{ \%} \cdot \text{K}^{-1}$ a někde se blíží i k $CC = 20 \text{ \%} \cdot \text{K}^{-1}$, což se shoduje s jinými pracemi. Tento fakt svědčí o tom, že procesy, které vedou k přízemním srážkám, jsou komplikované a je obtížné či nemožné odhadovat srážky s využitím jednoduchým parametrů, např. teploty rosného bodu při zemi.

Obrázek 7 porovnává, jak se mění závislost CC pro srážkové úhrny přesahující 99% kvantil na T , Td a $Tlcl$ pro naměřené hodnoty srážek v závislosti na výběru srážkových dat. Levý sloupec je totožný s pravým sloupcem na obr. 6. Pravý sloupec uvažuje pouze ty srážkové úhrny, kdy v hodině předcházející měření T , Td a $Tlcl$ napršelo méně než 0,2 mm, tj. nepršelo a srážková událost začíná až po měření T . Mezi sloupci je zřetelná podobnost bez ohledu, která veličina je zobrazena na horizontální ose a to především v centrální části grafu. Z toho lze usuzovat, že intenzivní 1h srážky mají krátké trvání a zpravidla předcházející hodinu jsou srážky menší nebo žádné.



Obr. 6 Závislost CC na T , Td a $Tlcl$ pro naměřené hodnoty 1h srážek. Levý sloupec s označením $dt = 0$ využívá naměřené hodnoty T , Td a $Tlcl$ na konci 1h hodinového srážkového intervalu. Pravý sloupec $dt = 1$ používá srážky, které jsou naměřeny v hodině následující po naměření hodnot T , Td a $Tlcl$.

Fig. 6 Dependence of CC on T , Td and $Tlcl$ for measured values of 1h precipitation. The left column marked $dt = 0$ uses the measured values of T , Td and $Tlcl$ at the end of the 1h hourly precipitation interval. The right column $dt = 1$ uses precipitation that is measured in the hour following the measurement of T , Td and $Tlcl$.



Obr. 7 Závislost CC na T , T_d a T_{lcl} pro naměřené hodnoty srážek. Oba sloupce využívají naměřené hodnoty T , T_d a T_{lcl} na začátku 1h srážkového intervalu. Pravý sloupec s označením S vybírá pouze data, kdy v hodině předcházející měření T , T_d a T_{lcl} srážky byly menší než 0,2 mm.

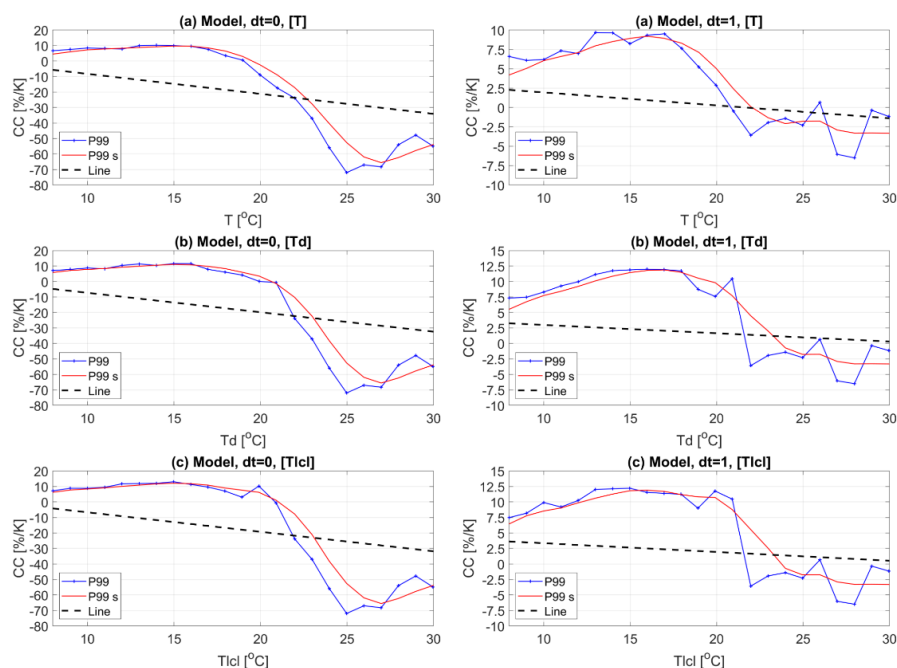
Fig. 7 Dependence of CC on T , T_d and T_{lcl} for measured precipitation values. Both columns use the measured values of T , T_d and T_{lcl} at the beginning of the 1h precipitation interval. The right column marked S selects only the dates when less than 0.2 mm of precipitation fell in the hour preceding the measurement T , T_d and T_{lcl} .

5. Závislost modelových 1h srážek na teplotě a vlhkosti v přízemní atmosféře

V této sekci jsou zpracována srážková a teplotní data stejně jako v Sekci 4 ale pro hodnoty získané z reanalýz, které budeme označovat jako modelové hodnoty. Vypočtené základní závislosti 1h srážek na charakteristikách teploty a vlhkosti jsou zobrazeny na obr. 8 a 9, které odpovídají obr. 6 a 7, kde se použila naměřená data. Modelových dat je daleko více, a proto jsou zobrazeny hodnoty teplot až do 30 °C.

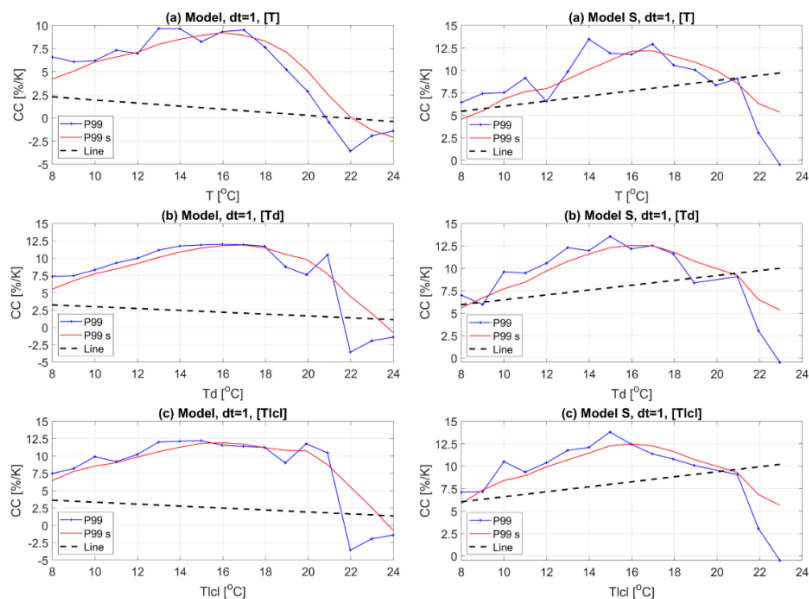
Levý sloupec na obr. 8, který ukazuje závislost CC na T , T_d a T_{lcl} pro srážkové úhrny odpovídající 99% kvantilu dává trochu nižší hodnoty CC, ale je kvalitativně velmi podobný levému sloupci na obr. 6 pro naměřené hodnoty. Významnější je rozdíl mezi modelovými a naměřenými hodnotami pro $dt = 1$ (pravý sloupec na obr. 6 a 8). Model dává nižší hodnoty CC a křivka CC je zřetelně hladší než u naměřených hodnot, což je zřejmě dáno větším počtem vstupních modelových dat. Za pozornost stojí, že modelová data obdobně jako data naměřená mají zlomový bod, po kterém CC klesá se vzrůstající teplotou, a tyto zlomové body docela dobře sobě odpovídají pro oba typy dat.

Obr. 9 ukazuje, že podmínka S (v hodině, na jejímž konci se měřila teplota, srážky byly menší než 0,2 mm) pro $dt = 1$ nemá zásadní vliv na tvar křivky CC. Zřetelně se však projevuje v závislosti na hodnotách T (obr. 9), což lze vysvětlit tím, že srážky v minulé hodině ovlivňují modelovou teplotu a tento vliv je větší než v případě hodnot měřených.



Obr. 8 Závislost CC na T , T_d a T_{lcl} pro modelové hodnoty. Levý sloupec s označením $dt = 0$ využívá modelové hodnoty T , T_d a T_{lcl} na konci 1h srážkového intervalu. Pravý sloupec $dt = 1$ používá srážky, které odpovídají hodině následující po termínu s vypočtenými hodnotami T , T_d a T_{lcl} .

Fig. 8 Dependence of CC on T , T_d and T_{lcl} for model values. The left column marked $dt = 0$ uses the model values T , T_d and T_{lcl} at the end of the 1h precipitation interval. The right column $dt = 1$ uses precipitation that correspond to the hour following the term with calculated values of T , T_d and T_{lcl} .



Obr. 9 Závislost CC na T , T_d a T_{lcl} pro modelové hodnoty srážek. Oba sloupce využívají modelové hodnoty T , T_d a T_{lcl} na začátku 1h srážkového intervalu. Pravý sloupec s označením S vybírá pouze data, kdy v hodině předcházející vypočteným hodnotám T , T_d a T_{lcl} napršelo méně než 0,2 mm.

Fig. 9 Dependence of CC on T , T_d and T_{lcl} for model precipitation values. Both columns use the model values T , T_d and T_{lcl} at the beginning of the 1h precipitation interval. The right column marked S selects only dates when less than 0.2 mm of rain fell in the hour preceding the calculated values of T , T_d and T_{lcl} .

6. Závěr

Získané výsledky lze vyjádřit následujícími body:

- Obecně existuje nárůst frekvence vysokých hodinových srážkových úhrnů, ale je omezen pouze na určitý interval teplot bez ohledu na to, kterou teplotu používáme T , T_d nebo T_{lcl} . Pro vyšší teploty nastává naopak pokles. Maximální hodnoty nárůstu vysokých srážek reprezentovaných 99% kvantilem jsou okolo $15 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Získané výsledky jsou srovnatelné s výsledky jiných studií. Je potřeba poznamenat, že publikované výsledky se navzájem výrazně liší a jsou silně závislé na typu užitých dat a na lokalitě, odkud data pocházejí.
- Je zřetelný rozdíl ve vypočtených závislostech podle toho, v jakém časovém vztahu jsou měření teploty a hodinového srážkového úhrnu. V případě, že se teplota měří na konci srážkového intervalu, srážky ovlivňují (snižují) naměřené hodnoty teploty na rozdíl od případu, kdy se srážky měří až v hodině následující po měření teploty. Tato zkušenost je známa. Je však zajímavé, že když jsme v druhém případě z analýzy vyloučili data, kdy v hodině, na jejímž konci se měřila teplota, tj. srážková událost začala v čase analyzované srážky, nedostali jsme příliš rozdílné výsledky. To lze vysvětlit tím, že intenzivní srážky netrvají dlouho a vyskytly se právě v analyzované hodině. Proto není zásadní, zda v předchozí hodině vypadávaly srážky.
- Stejně zpracované hodnoty srážek a teplot pro modelová data získaná reanalýzou dat dávají kvalitativně obdobné výsledky jako data naměřená. Tento výsledek lze chápat jako nepřímé potvrzení, že fyzikální procesy v modelu odrážejí realitu.
- Za nejcennější výsledek této studie lze považovat to, že analýza naměřených i modelových hodnot se shoduje v tom, že pro hodnoty vysokých kvantilů (95 % a více) hodinových srážek s teplotou (T , T_d nebo T_{lcl}) celkově stoupají. Ale existuje zlomový bod, po kterém dochází ke zřetelnému poklesu srážek. Nelze tedy s odkazem na Clausiusův Clapeyronův vztah tvrdit, že se vzrůstající teplotou budou vždy narůstat silné srážky.

Poděkování

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

Literatura

BROŽKOVÁ, R., DERKOVÁ, M., BELLUŠ, M., FARDA, A., 2006. Atmospheric forcing by ALADIN/MFSTEP and MFSTEP oriented tunings. *Ocean Sci.*, **2**, 113–121.

<https://doi.org/10.5194/os-2-113-2006>

BUERGER, G., HEISTERMANN, M., BRONSTERT, A., 2014. Towards subdaily rainfall disaggregation via Clausius–Clapeyron. *Journal of hydrometeorology*, **15**(3), 1303–1311.

<https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0161.1>

COUFAL, L., TOLASZ, R., 1997. A Climate Data Processing, Control, Information and Archiving System (tentative proposal). At: World Climate Programme – Data and Monitoring, **34**, Annex 14, WMO-TD Preliminary, Geneva 1997.

GERARD, L., PIRIOU, J.-M., BROŽKOVÁ, R., GELEYN, J.-F., BANCIU, D., 2009. Cloud and precipitation parameterization in a meso-gamma scale operational weather prediction model. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 3960–3977. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2750.1>

GIARD, D., BAZILE, E., 2000. Implementation of a New Assimilation Scheme for Soil and Surface Variables in a Global NWP Model. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 997–1015.

[https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128<0997:IOANAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128<0997:IOANAS>2.0.CO;2)

ROMPS, D. M., 2017. Exact expression for the lifting condensation level. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **74**, 3891–3900. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-17-0102.1>

MARTÍNKOVÁ, M., KYSELÝ, J., 2020. Overview of Observed Clausius-Clapeyron Scaling of Extreme Precipitation in Midlatitudes. *Atmosphere*, **11**(8), 786.

<https://doi.org/10.3390/atmos11080786>

MYHRE, G., ALTERSKJÆR, K., STJERN, C. W., HODNEBROG, O., MARELLE, L., SAMSET, B. H., SILLMANN, J., SCHALLER, N., FISCHER, E., SCHULZ, M., STOHL, A., 2019. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, **9**, 16063. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4>

TERMONIA, P., FISCHER, C., BAZILE, E., BOUYSSSEL, F., BROŽKOVÁ, R., BÉNARD, P., BOCHENEK, B., DEGRAUWE, D., DERKOVÁ, M., EL KHATIB, R., HAMDİ, R., MAŠEK, J., POTTIER, P., PRISTOV, N., SEITY, Y., SMOLÍKOVÁ, P., ŠPANEL, O., TUDOR, M., WANG, Y., WITTMANN, C., JOLY, A., 2018. The ALADIN System and its canonical model configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. *Geosci. Model Dev.*, **11**, 257–281.

<https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018>

IPCC, 2007. Dostupné z: <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.

<https://doi.org/10.1017/9781009157896>