

REGIONÁLNE KLIMATICKÉ SCENÁRE FREKVENCIE VÝSKYTU DNÍ SO ZRÁŽKAMI NA SLOVENSKU

MILAN ONDERKA^{1,2,*}, JOZEF PECHO^{1,3}, KATARÍNA MIKULOVÁ¹, VERONIKA LUKASOVÁ², SVETLANA VARŠOVÁ²

¹ Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

² Ústav vied o Zemi Slovenskej akadémie vied, v.v.i., Dúbravská cesta 9, 840 05 Bratislava

³ Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského, Mlynská dolina F-2, 842 48 Bratislava

We present scenarios of how frequency of days with precipitation may change over the territory of Slovakia by 2050 and 2080 in the article. Climatic scenarios were created from three regional climate models EURO-CORDEX for the pessimistic emission scenario RCP8.5. We analysed the occurrence of the number of precipitation days for class intervals: 5–9.9 mm, 10–19.9 mm, 20–29.9 mm, 30–39.9 mm, as well as for open intervals ≥ 5 mm, ≥ 10 mm, ≥ 20 mm, ≥ 30 mm, and ≥ 40 mm. To correct systematic errors in climate models, we used data (daily precipitation totals) from the national network of rain gauges. The RCM models were corrected in two steps: first in terms of excessive occurrence of so-called “drizzle days”, and then in terms of systematic underestimation of daily sums across the entire distribution function (bias correction). The occurrence of days with daily rainfall exceeding 40 mm for the horizons of 2050 and 2080 is presented in the form of maps. As our analyses revealed, the annual frequency of days with daily rainfall exceeding 40 mm is expected to increase by approximately 20% by the middle of the 21st century and by up to 60% by the end of the century compared to the present. The paper also includes tables with relative changes and absolute frequencies of wet days for 75 selected locations in Slovakia.

V článku prezentujeme scenáre možného vývoja výskytu dní s atmosférickými zrážkami na území Slovenska pre horizonty 2050 a 2080. Klimatické scenáre boli vytvorené z troch regionálnych klimatických modelov EURO-CORDEX pre pesimistický emisný scenár RCP8.5. Pre účely štatistického spracovania sme výskyt počtu zrážkových dní analyzovali jednak pre triedne intervaly: 5–9,9 mm, 10–19,9 mm, 20–29,9 mm, 30–39,9 mm, tak aj pre otvorené intervaly ≥ 5 mm, ≥ 10 mm, ≥ 20 mm, ≥ 30 mm a ≥ 40 mm. Na korekciu systematických chýb klimatických modelov sme použili údaje (denné úhrny atmosférických zrážok) zo siete zrážkomerov SHMÚ. Surové údaje z RCM modelov sme korigovali vo dvoch krokoch, najprv z pohľadu nadmerného výskytu tzv. dní s mrholením (v angličtine je tento efekt označovaný ako „drizzle day effect“), a následne z pohľadu systematického podhodnocovania denných úhrnov naprieč celou distribučnou funkciou („bias correction“). Výskyt dní s denným úhrnom nad 40 mm pre horizonty 2050 a 2080 je prezentovaný vo forme máp. Z pohľadu zmien výskytu početnosti dní v roku s denným úhrnom nad 40 mm by sa podľa našich analýz mal zvýšiť do polovice 21. storočia približne o 20 % a následne do konca storočia až o 60 % v porovnaní so súčasnosťou. Súčasťou práce je aj tabuľkové spracovanie relatívnych zmien a absolútnych početností dní s odstupňovaným denným úhrnom pre 75 vybraných lokalít na Slovensku.

Key words: regional climate models, rainfall, climatic index

ÚVOD

Poznatky o frekvencii výskytu, resp. početnosti dní s atmosférickými zrážkami nad zvolený prah, sú súčasťou širšieho klimatologického hodnotenia režimu atmosférických zrážok. V predloženej štúdii sa venujeme analýze vplyvu meniacej sa klímy na výskyt dní s denným úhrnom zrážok pre časové horizonty 2050 a 2080. Štatistika frekvencie výskytu dní s určitými úhrnmi zrážok má význam jednak pre poľnohospodárstvo, kde je potrebné vedieť, ako často dochádza k prirodzenému zavlaženiu poľnohospodárskej pôdy, ale aj pre vodné hospodárstvo a hydrológiu z pohľadu frekvencie výskytu zrážkových extrémov. Rozdeleniu počtu zrážkových dní podľa množstva zrážok na území Slovenska sa v minulosti venovali autorské kolektívy vedené Dr. Štefanom Petrovičom. Medzi najznámejšie práce tohto druhu možno uviesť štúdie Hydrometeorologického ústavu pod názvami *Klimatické a fenologické pomery Západoslovenského, Stredoslovenského a Východoslovenského kraja*, ktoré boli publikované v rokoch 1966, 1968, 1972. V týchto už historických štúdiách boli spracované pozorovania denných

úhrnov zrážok v staničnej sieti za obdobie 1931 až 1960. Výskyt prirodzeného zavlaženia možno vyjadriť pomocou počtu dní so zrážkami s odstupňovaním ich výdatnosti. V spomenutých prácach sa pri zisťovaní počtu dní so zrážkami analyzovali intervaly denných úhrnov zrážok: $\geq 0,1$ mm, $\geq 1,0$ mm, $\geq 5,0$ mm, $\geq 10,0$ mm. Kategória dní so zrážkami > 5 mm sa v spomenutých prácach považuje za denný úhrn zabezpečujúci výdatné zavlaženie poľnohospodárskej pôdy, t. j. keď zrážková činnosť dokáže plne kompenzovať evapotranspiráciu. Obdobné hodnotenia dní so zrážkami na lokálnej úrovni miest možno nájsť v ďalších starších prácach, ako je napr. Klíma a bioklíma Bratislavy (1979) a Klimatické pomery Hurbanova (1960) s vyhodnotením frekvencie dní so zrážkami kategorizovanými do intervalov 0,1 až 0,9 mm, 1,0 až 4,9 mm, 5,0 až 9,9 mm, 10,0 až 14,9 mm, 15 až 19,9 mm, 20,0 až 29,9 mm, a pre interval > 30 mm. Spracovaniu novších údajov získaných zo staničnej siete 115 klasických zrážkomerov sa venovala Stančíková (2023) v rámci diplomovej práce, v ktorej porovnávala dve obdobia 1981–2000 a 2001–2020 pre jednotlivé ročné obdobia

a sumárne aj pre celý kalendárny rok. V čase písania tohto článku nám však nie sú známe ďalšie práce zo Slovenska pokrývajúce túto problematiku. Cieľom tejto štúdie je zhodnotiť možný vývoj ročných početností zrážok do konca 21. storočia s využitím regionálnych klimatických modelov EURO-CORDEX a vyhodnotiť zmeny v čase.

ÚDAJE A METÓDY

Pre účely štatistického spracovania sme výskyt počtu zrážkových dní analyzovali jednak pre triedne intervaly: 5–9,9 mm, 10–19,9 mm, 20–29,9 mm, 30–39,9 mm, tak aj pre otvorené intervaly ≥ 5 mm, ≥ 10 mm, ≥ 20 mm, ≥ 30 mm a ≥ 40 mm. Ako riadiaci globálny klimatický model definujúci hraničné podmienky sme použili GCM: MOHC-HadGEM2-ES (UK), v rámci ktorého sa využili výstupy regionálnych klimatických modelov pre Európsku doménu (EURO-CORDEX): SMHI-RCA4 (Švédsko), KNMI-RACMO22E (Holandsko), CLMcom-CLM-CCLM4-8-17 (EÚ) získaných z verejne dostupných databáz (<https://cds.climate.copernicus.eu>). Priestorové rozlíšenie EURO-CORDEX modelov je $0,12^\circ \times 0,12^\circ$. V prezentovanej práci sme použili RCP8.5 scenáre. Tento vysokoemisný scenár je často označovaný ako „business as usual“, čo naznačuje, stav keď spoločnosť nepodnikne koordinované kroky na zníženie emisií skleníkových plynov.

Korekcia systematických chýb RCM modelov (*drizzle-day and bias correction*)

Na potreby korekcie systematických chýb klimatických modelov sme použili denné úhrny atmosférických zrážok zo siete zrážkomerov SHMÚ pokrývajúce obdobie 1981 až 2021. Surové údaje z regionálnych klimatických modelov sme korigovali v dvoch krokoch, najprv z pohľadu nadmerného výskytu tzv. dní s mrholením (v angličtine „*drizzle days*“), čiže nezvyčajne vysokého počtu dní s úhrnov zvyčajne pod 1 mm, ktoré nadhodnocujú ročné úhrny, a následne z pohľadu systematického podhodnocovania denných úhrnov naprieč celou distribučnou funkciou (*bias correction*). Za účelom korekcie dní s mrholením sme zvolili metódu postupnej eliminácie dní so zrážkovým úhrnom pod určitú prahovú hodnotu denného úhrnu tak, aby sa výsledný počet dní so zrážkami približoval pozorovanému počtu zrážkových dní v staničnej sieti (najbližšiemu zrážkomeru k centroidu gridu modelu). Rovnaký postup je opísaný vo viacerých zahraničných prácach (napr. Volosciuk et al., 2017). Je zrejmé, že pre takúto formu korekcie je potrebné spracovať údaje zo staničnej siete súbežne s historickými behmi klimatických modelov. V predloženej práci sme ako počiatočnú prahovú hodnotu zvolili úhrn 1 mm, ktorú sme znižovali o hodnotu 0,01 mm postupne až k nule. Pre každú prahovú hodnotu sme porovnali ročný počet dní so zrážkami zaznamenanými najbližším zrážkomerom s počtom dní získaných regionálnym klimatickým modelom v konkrétnom gridovom bode. Prahová hodnota zodpovedajúca minimu rozdielu medzi počtom zrážkových dní pozorovaných na zrážkomernej stanici a simulovaných úhrnov regionálnych klimatických modelov bola považovaná za optimálnu prahovú

hodnotu. Simulované hodnoty zrážok pod optimálnym prahom boli vynulované. Takýmto postupom sme dokázali určiť minimálnu prahovú hodnotu pre každý gridový bod osobitne pre všetky tri spracované regionálne klimatické modely. Ako príklad optimálnych prahových hodnôt pre RCM CCLM4-8-17 uvádzame na Obr.1, kde je zrejмый vplyv nadmorskej výšky na prahovú hodnotu zrážok. V nížinách sa hodnota prahu pohybuje do približne 0,3 mm a v horských oblastiach Slovenska sa blíži až k hodnote 1 mm.

Väčšina prístupov používaných na korekciu biasu je založená na mapovaní kvantilov určených z kumulatívnej distribučnej funkcie modelovaných údajov tak, aby sa tieto svojou hodnotou čo najviac približovali kvantilom kumulatívnej distribučnej funkcie pozorovaných údajov v zrážkomernej sieti (Chadwick et al., 2023; Zhao et al., 2021; Abdelmoaty et al., 2021; Kim et al., 2020; Mehrotra & Sharma, 2019; Cannon et al., 2015; Nguyen et al., 2016; Teutschbein & Seibert, 2013; Johnson & Sharma, 2012; Mehrotra & Sharma, 2012; Haerter et al., 2011; Li et al., 2010; Wood et al., 2004). Jedna z možností korekcie biasu kvantilovým mapovaním (QM) je použitie vhodne zvoleného teoretického rozdelenia. Ďalšia možnosť kvantilového mapovania je na empiricky určených kvantilochoch, t.j. vo forme percentilov. Jednoduché kvantilové mapovanie (QM) môžeme matematicky zadefinovať nasledovne:

$$q_{m,p}(t) = F_{o,h}^{-1}\{F_{m,h}[x_{m,p}(t)]\}, \quad (1)$$

kde $x_{m,p}(t)$ sú modelované údaje v čase t pre projekcie, $F_{m,h}$ je kumulatívna distribučná funkcia regionálneho klimatického modelu, a $F_{o,h}^{-1}$ je inverzia ku kumulatívnej distribučnej funkcii pozorovaných historických denných úhrnov zrážok (Cannon et al., 2015). Nevýhodou QM je, že do veľkej miery predpokladá stacionaritu systematických chýb regionálnych klimatických modelov, t.j. štatistické charakteristiky chýb v historických behoch sú zachované aj v budúcich obdobiach. Práca autorov Maraun et al. (2012) poukazuje na skutočnosť, že predpoklad stacionarity systematických chýb regionálnych klimatických modelov je prinajmenšom otázný.

V prípade kvantilového delta-mapovania (*quantile delta mapping* – QDM) najprv zadefinujeme časovo závislú kumulatívnu distribučnú funkciu modelovaných projektovaných údajov $x_{m,p}(t)$, ktorú môžeme zapísať v matematickom tvare ako:

$$\tau_{m,p}(t) = F_{m,p}^{(t)}[x_{m,p}(t)], \quad \tau_{m,p}(t) \in \{0,1\}, \quad (2)$$

kde $\tau_{m,p}(t)$ je pravdepodobnosť neprekročenia v čase t . V ďalšom kroku definujeme relatívnu zmenu kvantilov medzi historickým a nejakým budúcim obdobím v čase t ako:

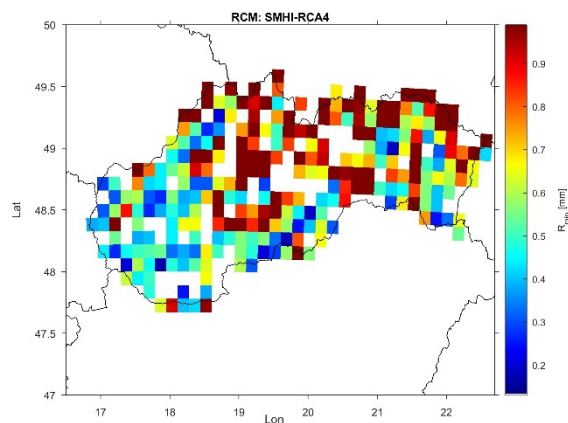
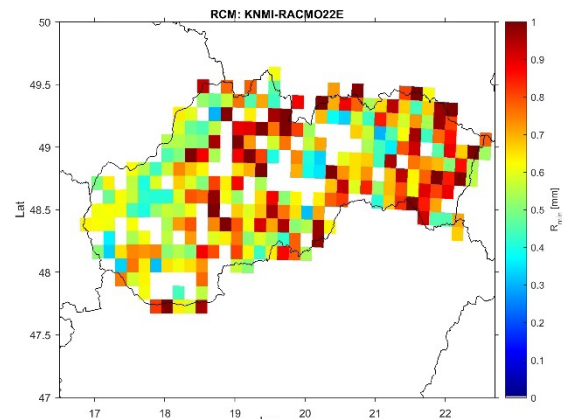
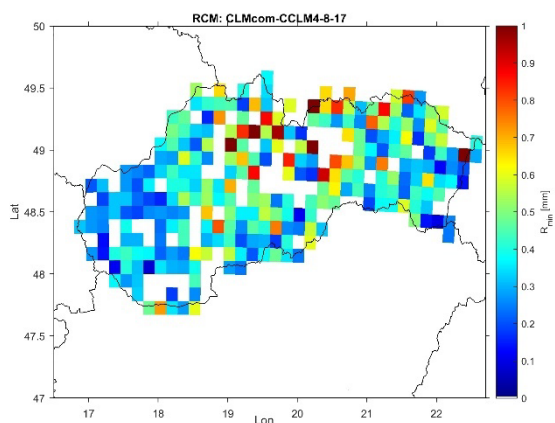
$$\Delta_m(t) = \frac{F_{m,p}^{(t)-1}[\tau_{m,p}(t)]}{F_{m,h}^{-1}[\tau_{m,p}(t)]} = \frac{x_{m,p}(t)}{F_{m,h}^{-1}[\tau_{m,p}(t)]}, \quad (3)$$

kde $\tau_{m,p}(t)$ môžeme ďalej korigovať inverznou kumulatívnu distribučnou funkciou, ktorú sme určili z pozorovaných údajov v historickom období $x_{o,h}$:

$$\hat{x}_{o:m,h,p}(t) = F_{o,h}^{-1}[\tau_{m,p}(t)]. \quad (4)$$

Obrázok 1. Prahová hodnota denných úhrnov (R_{min}) zrážok použitá na odstránenie efektu mrholenia („drizzle days“) pri jednotlivých regionálnych klimatických modeloch. Zobrazené hodnoty prahu sú počítané pre gridové body so vzdialenosťou < 10 km od najbližšej zrážkomernej stanice. Biele polia označujú miesta, kde v dosahu 10 km sa nevyskytla žiadna zrážkomerná stanica.

Figure 1. Thresholds of daily precipitation (R_{min}) used to eliminate the “drizzle” effect. The depicted thresholds were calculated for grid points within a distance of < 10 km from the nearest rain gauge. White spots indicate areas where there was no rain gauge available within a 10 km radius.



Nakoniec v poslednom kroku projekciu pre čas t po jej predošlej korekcii na historický bias vynásobíme relatívnou zmenou $\Delta_m(t)$:

$$\hat{x}_{m,p}(t) = \hat{x}_{o:m,h;p}(t)\Delta_m(t). \quad (5)$$

Relatívna zmena kvantilov $\Delta_m(t)$ sa vyznačuje jednou významnou vlastnosťou, a to že vnáša pomer relatívnej zmeny simulovaných (surových, nekorigovaných) údajov do korekcie modelovaných údajov medzi jednotlivé analyzované obdobia (Chadwick et al., 2023; Kim et al., 2020; Cannon et al., 2015).

V tomto kroku sme použili metódu delta kvantilového mapovania za účelom korekcie modelovaných úhrnov s použitím empirickej distribučnej funkcie reálne nameraných údajov v najbližšej zrážkomernej stanici.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Pre jednotlivé skorigované regionálne klimatické modely denných úhrnov zrážok sme vyhodnotili ročné početnosti denných úhrnov zrážok ≥ 5 mm, ≥ 10 mm, ≥ 20 mm, ≥ 30 mm a ≥ 40 mm pre obdobia 2006–2035, 2036–2065, 2066–2095. Ako príklad uvádzame priemernú ročnú početnosť dní so zrážkami nad 5 mm po korekcii biasu pomocou kvantilového delta mapovania (Obr. 2). Z obrázku je zrejma celkovo veľká priestorová variabilita výskytu dní s úhrnom atmosférických zrážok nad 5 mm medzi jednotlivými modelmi. Obdobná priestorová variabilita bola pozorovaná aj v prípade priemerného ročného výskytu dní s denným úhrnom zrážok nad 10 mm, 20 mm, 30 a 40 mm.

Z tohto dôvodu sme vytvorili ansámbl modelov (založený na spriemerovaní početností denných úhrnov získaných z jednotlivých modelov). Ako príklad takéhoto ansámbu v priestore uvádzame na Obr. 3 mapy priemerných ročných početností denných úhrnov zrážok ≥ 40 mm, ktoré boli interpolované metódou lineárnej triangulácie. Ide o tridsať-ročné obdobia centované na 2020, 2050 a 2080. Pre horizont 2050 boli použité roky 2036–2065 a pre horizont 2080 sa použili roky 2066–2095. Obr. 3 zobrazuje súčasný stav (obdobie 2006–2035), zatiaľ čo Obr. 4 a Obr. 5 zobrazujú projektované početnosti dní s úhrnom zrážok ≥ 40 mm pre dve zvolené obdobia v budúcnosti. Už na prvý pohľad je zrejma závislosť početností s nadmorskou výškou. V rámci obdobia 2006–2035 sa v oblasti juhozápadu Slovenska vyskytujú dni s dennými úhrnmi zrážok ≥ 40 mm okolo 0,5 dňa, t.j. takýto deň sa vyskytuje v priemere raz za dva roky. V prípade vyšších polôh možno pozorovať nárast početnosti výskytu takýchto dní. Ako zaujímavý príklad zvýšenej početnosti dní s úhrnom zrážok ≥ 40 mm možno uviesť krajné územia východu Slovenska, kde sa priemerná početnosť pohybuje medzi 1,5 až 1,8 dňa za rok. V Tab. 1 prezentujeme súhrnné zhodnotenie priemerných ročných početností dní s úhrnom zrážok ≥ 5 , 10, 20 a 40 mm v 75 lokalitách Slovenska pre jednotlivé horizonty 2020, 2050 a 2080.

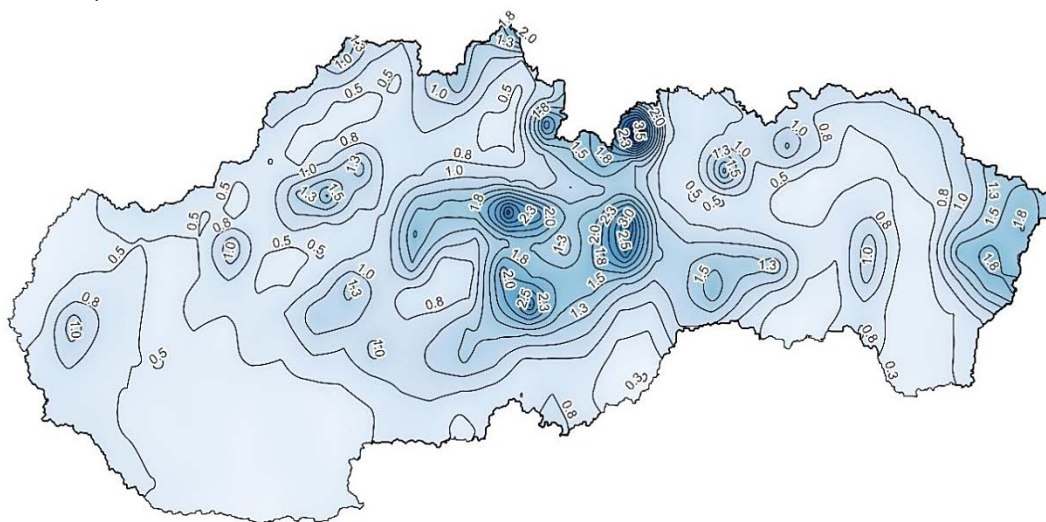
Percentuálne vyjadrenie zmien výskytu početností dní s určeným rozsahom denných úhrnov zrážok poskytuje Obr. 6. Početnosť dní s výskytom denných úhrnov nad 40 mm by sa podľa našich analýz mala zvýšiť do polovice 21. storočia približne o 20 % a následne do konca storočia až o 60 % v porovnaní so súčasnosťou.

Tabuľka 1. Ročné početnosti dní s úhrnom atmosférických zrážok nad 5, 10, 20 a 40 mm v horizontoch 2006–2035, 2036–2065 a 2066–2095.

Table 1. Annual frequencies of wet-days with precipitation total above 5, 10, 20 and 40 mm in horizons 2006–2035, 2036–2065 and 2066–2095.

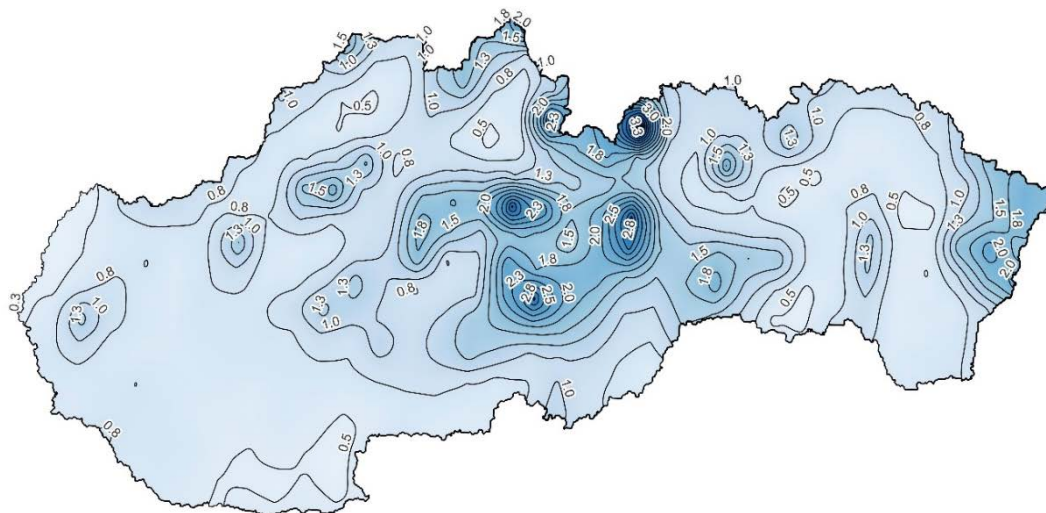
		2006 - 2035	2036 - 2065	2066 - 2095	2006 - 2035	2036 - 2065	2066 - 2095	2006 - 2035	2036 - 2065	2066 - 2095	2006 - 2035	2036 - 2065	2066 - 2095
ID	Názov lokality	>5 mm			>10 mm			>20 mm			>40 mm		
11898	Banská Bystrica	53,2	51,9	51,9	29,1	28,3	29,7	9,6	9,7	11,0	1,0	1,2	1,7
11901	Banská Štiavnica	47,4	46,2	45,7	25,6	25,1	26,2	8,1	8,1	9,4	0,9	1,0	1,6
11962	Bardejov	45,0	44,4	44,7	20,0	19,9	21,7	5,5	5,8	6,7	0,7	0,8	1,0
11862	Beluša	43,3	43,0	44,0	19,5	19,6	22,4	5,0	5,2	6,8	0,5	0,7	1,0
11927	Boľkovce	34,0	33,0	32,3	17,8	17,3	18,0	5,2	5,5	6,1	0,6	0,8	0,9
11813	Bratislava, Koliba	34,3	34,1	35,6	16,4	16,7	18,4	5,0	5,1	6,7	0,6	0,7	1,0
11816	Bratislava, letisko	33,4	33,3	34,6	15,8	16,3	17,9	4,7	5,0	6,4	0,6	0,7	1,0
11810	Bratislava, Mlynská dolina	33,9	33,6	35,3	16,1	16,4	18,1	4,9	5,0	6,7	0,6	0,6	1,0
11917	Brezno	55,8	54,3	53,7	30,9	30,2	31,0	11,0	11,2	12,2	1,5	1,6	2,3
11902	Bzovík	44,8	43,8	43,2	24,1	23,7	24,7	7,9	7,8	9,0	0,9	0,9	1,5
11916	Chopok	68,3	66,9	66,8	39,5	38,6	39,8	14,6	14,9	16,2	2,4	2,5	3,2
11841	Dolný Hričov	45,6	45,8	46,5	19,4	20,0	22,3	4,8	5,1	6,4	0,5	0,5	0,7
11905	Dolné Plachtince	36,6	35,5	35,3	18,9	18,6	19,3	5,9	6,1	6,7	0,6	0,6	1,1
11880	Dudince	35,6	34,8	34,7	17,6	17,3	18,6	5,0	5,0	6,2	0,5	0,6	1,0
11966	Čaklov	42,4	41,4	41,5	21,5	21,2	22,2	6,4	6,8	7,5	0,7	0,8	1,1
11881	Želiezovce	33,5	33,1	33,2	15,8	15,9	17,3	4,5	4,4	5,8	0,3	0,5	0,9
11951	Červený Kláštor	48,5	48,5	48,7	21,3	21,2	22,7	5,7	5,9	7,0	0,7	1,0	1,2
11900	Žiar nad Hronom	49,2	47,6	47,5	26,6	26,1	27,3	8,8	8,9	10,4	0,9	1,0	1,6
11820	Žihárec	33,4	33,0	33,9	15,8	15,9	17,5	4,5	5,0	5,7	0,4	0,6	0,9
11849	Žikava	46,9	46,2	46,9	24,9	25,0	26,5	7,6	7,6	9,6	0,8	0,9	1,6
11865	Žilina	49,6	49,7	50,6	22,6	23,0	25,2	5,8	6,3	7,7	0,6	0,6	0,8
11933	Štrbské Pleso	71,4	69,9	70,3	38,8	38,0	38,5	12,1	12,9	13,3	1,7	1,8	2,4
11952	Gánovce	42,0	40,8	40,3	20,6	20,5	20,7	6,8	7,1	7,8	0,9	1,1	1,4
11800	Holíč	32,6	32,2	33,9	13,8	14,2	16,0	3,8	3,8	5,2	0,4	0,4	1,0
11858	Hurbanovo	33,3	32,8	33,9	15,7	16,0	17,5	4,4	4,7	6,0	0,3	0,5	0,9
11963	Jakubovany	37,2	36,1	36,2	16,3	16,2	16,9	4,4	4,6	5,6	0,4	0,6	0,8
11819	Jaslovské Bohunice	33,3	33,0	34,0	15,7	16,1	17,7	4,7	4,7	5,7	0,4	0,6	0,8
11993	Kamenica nad Cirochou	49,9	49,4	50,0	26,6	26,7	27,9	8,8	8,8	10,0	1,2	1,2	1,4
11968	Košice, letisko	33,9	32,9	33,1	15,6	15,7	16,7	4,4	4,8	5,5	0,4	0,5	0,6
11960	Košice, mesto	36,1	34,8	35,0	16,9	16,9	17,9	4,9	5,3	6,0	0,5	0,6	0,7
11958	Kojšovská hoľa	51,5	50,0	49,5	29,0	28,5	29,1	10,1	10,7	11,7	1,3	1,4	1,8
11817	Kráľová pri Senci	31,8	31,4	32,3	14,7	15,2	16,6	4,2	4,6	5,4	0,5	0,7	0,9
11879	Kremnické Bane	55,3	54,1	54,4	30,3	29,7	31,3	9,9	10,0	11,5	1,1	1,3	1,8
11918	Liesek	60,2	60,2	61,7	28,4	28,5	30,3	7,2	7,9	8,7	0,9	1,2	1,3
11874	Liptovský Hrádok	62,2	61,1	60,9	32,2	31,6	33,0	9,4	9,9	10,9	0,9	1,1	1,7
11908	Liptovská Osada	67,2	65,7	66,3	37,1	36,0	37,8	11,3	12,2	13,4	1,5	1,6	2,3
11910	Lom nad Rimavicou	57,2	55,4	54,5	34,1	32,9	33,8	13,3	13,4	14,4	2,2	2,4	3,0
11930	Lomnický štít	68,8	68,3	68,2	39,3	39,3	39,5	15,1	15,5	16,2	2,9	3,1	3,4
11812	Malý Javorník	39,2	39,3	40,8	19,6	20,1	21,6	6,2	6,3	7,7	0,8	0,8	1,2
11977	Medzilaborce	53,7	53,2	54,1	26,0	26,1	27,7	7,3	7,8	8,6	0,8	0,9	1,2
11982	Michalovce	36,3	35,3	35,7	17,4	17,7	18,5	5,0	5,1	5,8	0,5	0,6	0,7
11856	Mochovce	38,5	37,5	38,5	19,7	19,6	21,0	5,7	5,8	7,3	0,5	0,7	1,1
11833	Modra, Piesok	43,5	43,6	44,7	22,4	22,9	24,2	7,4	7,6	8,8	0,9	1,0	1,4
11855	Nitra, Veľké Janíkovce	36,2	35,6	36,5	17,6	17,4	19,1	4,9	5,1	6,4	0,5	0,7	1,0
11868	Oravská Lesná	70,8	70,2	71,3	37,4	37,3	39,3	10,7	11,6	13,1	1,4	1,6	1,8
11890	Oravské Veselé	66,2	66,5	67,2	32,2	32,6	34,5	8,4	9,2	10,6	0,9	1,2	1,3
11984	Orechová	48,4	47,5	47,8	27,2	27,0	28,6	9,3	9,9	11,2	1,4	1,5	1,8
11992	Osadné	60,1	59,8	60,5	31,1	31,3	33,1	9,3	10,0	10,8	1,3	1,5	1,7
11826	Piešťany	36,6	36,1	37,2	17,3	17,5	19,1	5,1	5,4	6,4	0,5	0,7	1,0
11961	Plaveč	47,5	46,8	46,9	20,7	20,6	22,0	6,1	6,3	7,3	0,8	0,9	1,3
11876	Podbanské	76,6	75,2	76,0	42,3	41,7	43,0	13,1	14,0	14,8	1,6	1,8	2,5
11850	Podhájska	35,7	35,0	35,6	17,5	17,5	19,3	5,2	5,4	6,4	0,4	0,6	1,0
11950	Podolíneec	42,9	42,5	43,1	18,2	17,8	18,9	4,8	5,1	6,0	0,6	0,8	1,0
11934	Poprad	48,8	47,7	47,3	24,7	24,5	24,6	8,0	8,4	9,0	1,1	1,2	1,6
11955	Prešov, vojsko	37,4	36,7	36,8	17,5	17,4	18,0	4,8	5,1	6,0	0,5	0,6	0,8
11867	Prievidza	47,3	46,6	47,6	23,0	23,3	25,2	6,6	6,7	8,3	0,6	0,7	1,2
11941	Ratková	41,3	40,2	38,9	23,4	22,4	22,8	8,2	8,5	9,2	1,0	1,3	1,7
11942	Rimavská Sobota	34,6	34,1	33,1	17,9	18,0	18,0	5,4	5,8	6,3	0,6	0,9	1,0
11944	Rožňava	44,8	43,8	43,2	25,3	24,9	25,4	9,1	9,7	10,6	1,2	1,5	1,7
11970	Silica	42,7	41,9	41,5	23,6	23,5	23,8	8,3	8,6	9,4	1,0	1,3	1,5
11931	Skalná Pleso	65,2	64,7	64,5	36,3	36,3	36,5	13,5	14,0	14,6	2,5	2,7	3,0
11903	Sliac	42,9	41,9	41,7	22,1	21,5	22,8	6,7	7,0	7,8	0,6	0,8	1,2
11979	Somotor	32,7	32,4	32,5	14,8	15,5	16,3	4,3	4,5	5,2	0,4	0,6	0,6
11949	Spišské Vlachy	38,1	36,9	36,6	18,2	18,2	18,7	5,5	5,8	6,8	0,7	0,7	1,1
11957	Stará Lesná	52,4	51,6	51,4	26,0	25,9	26,2	8,3	8,8	9,3	1,3	1,5	1,8
11811	Stupava	35,7	35,6	37,6	17,2	17,4	19,2	5,0	5,1	6,5	0,6	0,7	1,0
11936	Tatranská Javorina	72,7	72,2	72,6	42,0	42,1	42,6	16,2	16,6	17,5	3,2	3,4	3,7
11938	Telgárt	59,7	58,8	57,3	36,7	35,8	36,0	14,7	14,9	15,6	2,8	3,0	3,5
11882	Tesárske Mlyňany	39,0	38,2	39,0	19,7	19,8	21,2	5,7	5,8	7,5	0,5	0,7	1,1
11976	Tisinec	42,1	42,0	42,6	19,4	19,3	20,8	5,1	5,4	6,2	0,5	0,6	0,8
11978	Trebišov – Milhostov	34,9	34,0	34,2	16,6	16,9	17,6	4,6	4,8	5,5	0,4	0,6	0,7
11897	Turčianske Teplice	54,1	53,3	54,2	27,6	27,7	29,5	8,4	8,6	10,1	0,8	0,9	1,4
11904	Víglaš, Pstrúša	46,3	45,2	44,4	25,4	24,6	25,7	8,1	8,4	9,2	1,0	1,2	1,5
11846	Veľké Ripňany	37,3	37,0	38,0	17,9	18,2	19,6	5,2	5,4	6,5	0,6	0,7	1,1
11995	Vysoká nad Uhom	39,2	38,3	39,1	19,9	20,2	21,4	6,0	6,2	7,4	0,7	0,8	0,9

Figure 3. Annual occurrence of wet-days per year with rainfall amount ≥ 40 mm for the period 2006–2035 (calculated from a model ensemble).



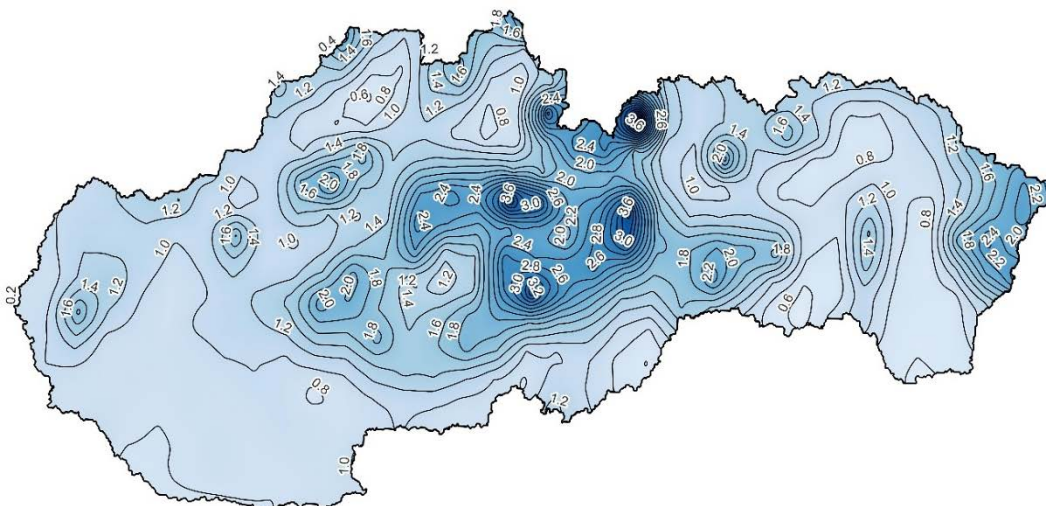
Obrázok 4. Mapa ročnej početnosti výskytu zrážkových dní s denným úhrnom ≥ 40 mm pre obdobie 2036–2065 (počítané z ansámbľu modelov).

Figure 4. Number of wet-days per year with rainfall amount ≥ 40 mm for the period 2036–2065 (calculated from a model ensemble).



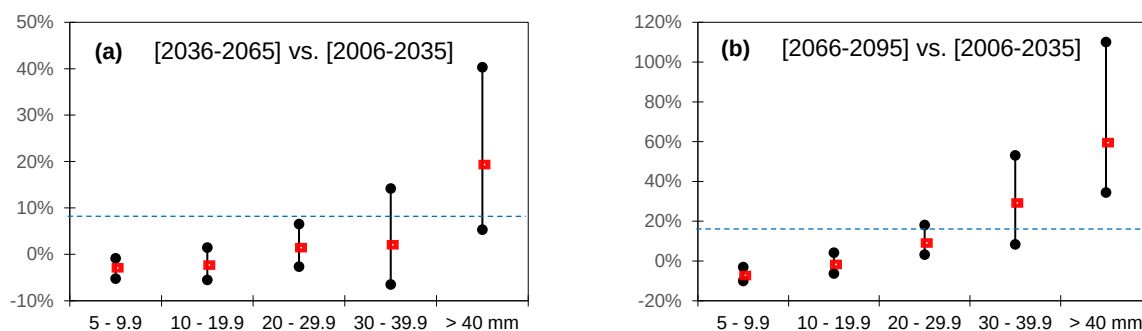
Obrázok 5. Mapa ročnej početnosti výskytu zrážkových dní s denným úhrnom ≥ 40 mm pre obdobie 2066–2095 (počítané z ansámbľu modelov).

Figure 5. Number of wet-days per year with rainfall amount ≥ 40 mm for the period 2066–2095 (calculated from a model ensemble).



Obrázok 6. Zmeny vo výskyte priemerného počtu zrážkových dní v roku s piatimi kategóriami podľa denných úhrnov medzi analyzovanými obdobiami (a) [2036–2065] vs. [2006–2035] a (b) [2066–2095] vs. [2006–2035].

Figure 6. Changes in the occurrence of days with five classes of daily rainfall totals between two analysed periods: (a) [2036–2065] vs. [2006–2035] and (b) [2066–2095] vs. [2006–2035].



ZÁVERY

V článku sme vyhodnotili možné scenáre vývoja výskytu dní so zvolenými intervalmi zrážkových úhrnov až do konca 21. storočia. Tieto scenáre boli vytvorené na základe troch regionálnych klimatických modelov (EURO-CORDEX), ktorých systematické chyby (bias) sme korigovali pomocou delta kvantilového mapovania s použitím referenčných údajov zo zrážkomernej siete SHMÚ za obdobie 1981–2021. Z pohľadu zmien výskytu početností dní v roku s denným úhrnom nad 40 mm by sa podľa našich analýz do polovice 21. storočia mal počet takýchto dní zvýšiť približne o 20 % a následne do konca storočia až o približne 60 % v porovnaní so súčasnosťou. Takýto nárast dní s vysokými úhrnmi si pravdepodobne vyžiada aj adekvátne prispôbenie vodohospodárskej infraštruktúry (manažment povodňového rizika). Hoci sú naše odhady možného vývoja nateraz len predbežné, keďže sa zakladajú len na obmedzenom počte regionálnych klimatických modelov [EURO-CORDEX: SMHI-RCA4 (Švédsko), KNMI-RACMO22E (Holandsko), CLMcom-CLM-CCLM4-8-17 (EÚ)], naše výsledky sú v súlade so širšie prijatým konsenzom v oblasti vplyvu zmeny klímy na režim zrážok v strednej Európe. Bičárová et al. (2013) sa zaoberali výskytom extrémnych úhrnov zrážkami v teplej časti roka (MJJASO) vo Vysokých Tatrách (konkrétne v lokalitách Lomnický štít, Skalnaté Pleso, Poprad, Tatranská Lomnica) kde zhodnotili päť dekád od 1961 do 2010. Na Lomnickom štíte a na Skalnatom Plese sa ukázal významný nárast v kategórii denných úhrnov od 40 do 60 mm, čo podporuje aj naše závery spočívajúce v tom, že sme identifikovali trend zvyšovania počtu dní so zrážkami nad 40 mm za deň. V budúcnosti bude potrebné aktualizovať a rozšíriť ansámbl o ďalšie klimatické modely, prípadne sa zamerať už na modely novej generácie CMIP6.

PodĎakovanie

PodĎakovanie patrí projektu Clim4Cast (číslo projektu CE0100059) „Central European Alliance for Increasing Climate Change Resilience to Combined Consequences of Drought, Heatwave, and Fire Weather through Regionally-Tuned Forecasting“.

LITERATÚRA

Abdelmoaty, H.M.–Papalexiou, S.M.–Rajulapati, C.R.–Agha-Kouchak, A., 2021, Biases beyond the mean in CMIP6 extreme precipitation: A global investigation, *Earth's Future*, 9, e2021EF002196, <https://doi.org/10.1029/2021EF002196>.

Bičárová, S.–Čepčėková, E.–Hlavatá, H., 2013, Extreme precipitation and occurrence of wet and dry periods in mountain climate zones. In *Hydrological risks-floods and droughts*. Technical University of Košice, Faculty of civil engineering, Institute of environmental engineering. Ed: M. Zelenáková, 16–31. ISBN 978-80-553-1492-1.

Cannon, A.J.–Sobie, S.R.–Murdock, T.Q., 2015, Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *Journal of Climate*, 28, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>.

Chadwick, C.–Gironás, J.–González-Leiva, F.–Aedo S., 2023, Bias adjustment to preserve changes in variability: the unbiased mapping of GCM changes, *Hydrological Sciences Journal*, 68 (8), 1184–1201, <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2201450>.

Haerter, J.O.–Hagemann, S.–Moseley, C.–Piani, C., (2011), Climate model bias correction and the role of timescales, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(3), 1065–1079, <https://doi.org/10.5194/hess1510652011>.

Johnson, F.–Sharma, A., 2012, A nesting model for bias correction of variability at multiple time scales in general circulation model precipitation simulations, *Water Resources Research*, 48(1), <https://doi.org/10.1029/2011wr010464>.

Kim, S.–Joo, K.–Kim, H.–Shin, J.–Y.–Heo, J.–H., 2020, Regional quantile delta mapping method using regional frequency analysis for regional climate model precipitation, *Journal of Hydrology*, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125685>.

Maraun, D., 2012, Nonstationarities of regional climate model biases in European seasonal mean temperature and precipitation sums. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06706, doi:10.1029/2012GL051210.

Mehrotra, R.–Sharma, A., 2012, An improved standardization procedure to remove systematic low frequency variability biases in GCM simulations, *Water Resources Research*, 48(12), <https://doi.org/10.1029/2012wr012446>.

Onderka, M.–Pecho, J., 2021, Sensitivity of selected summer-time rainfall characteristics to pre-event atmospheric and near-surface conditions, *Atmospheric Research*, 259, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105671>.

Petrovič, Š., kol., 1960, Klimatické pomery Hurbanova, Hydrometeorologický ústav – Praha, 280 s.

Petrovič, Š., kol., 1966, Klimatické a fenologické pomery Východoslovenského kraja, Hydrometeorologický ústav – Praha, 276 s.

Petrovič, Š., kol., 1968, Klimatické a fenologické pomery Západodoslovenského kraja, Hydrometeorologický ústav – Praha, 343 s.

Petrovič, Š., kol., 1972, Klimatické a fenologické pomery Stredoslovenského kraja, Hydrometeorologický ústav – Bratislava, 432 s.

Stančíková, L., 2023, Zmeny vo výskyte atmosférických zrážok a ich skupenstva na Slovensku, Diplomová práca, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, 133 s.

Teutschbein, C.–Seibert, J., 2013, Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(12), 5061–5077, <https://doi.org/10.5194/hess-17-5061-2013>.

Volosciuk, C.–Maraun, D.–Vrac, M.–Widmann, M., 2017, A combined statistical bias correction and stochastic downscaling method for precipitation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 1693–1719, <https://doi.org/10.5194/hess-21-1693-2017>.

Wood, A.W.–Leung, L.R.–Sridhar, V.–Lettenmaier, D.P., 2004, Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, *Climatic Change*, 62(1), 189–216, <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013685.99609.9e>.