

Zmeny v skupenskom zastúpení atmosférických zrážok v zime na území Slovenska

Ladislav Markovič

Slovenský hydrometeorologický ústav Bratislava, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

Cieľom práce bolo vytvoriť prehľadnú analýzu pomeru dní so snežením/zrážkami (SD/PD) v zimnej sezóne (december, január, február) s dôrazom na jeho zmenu v rámci výberových období 1951-1990 a 1991-2017 a možný budúci vývoj v závislosti od nadmorskej výšky a priemernej sezónnej teploty vzduchu. Využitý bol výberový súbor 71 klimatologických staníc SHMÚ nachádzajúcich sa na území Slovenska a uskutočňujúcich meteorologické merania teploty vzduchu a pozorovania charakteru (skupenstva) atmosférických zrážok v zimných sezónach 1951/1952 – 2017/2018.

Kľúčové slová: atmosférické zrážky, Klimatická zmena, zimná sezóna, dni so snežením, dni so zrážkami.

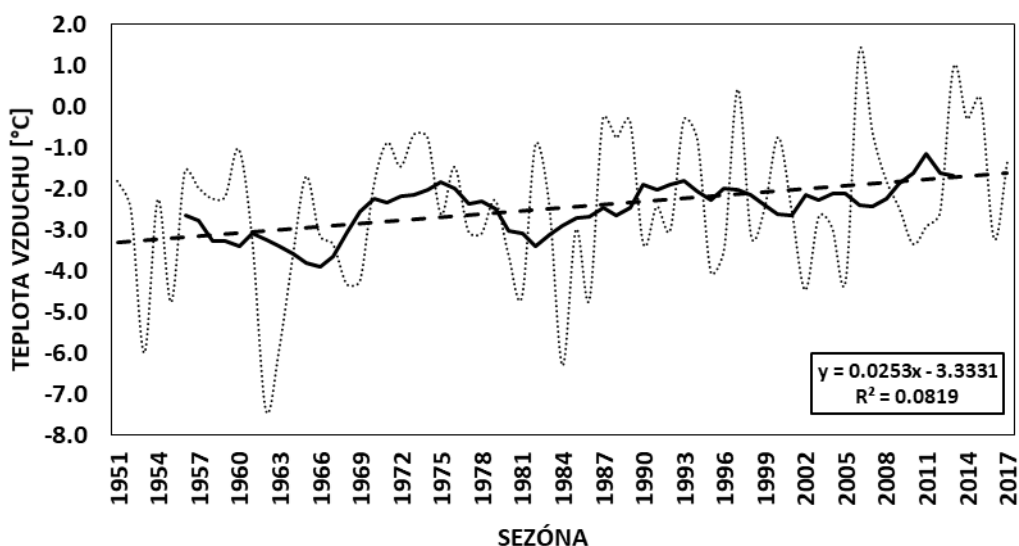
1 Úvod

Atmosférické zrážky padajúce v podobe snehu a s nimi spojená následná akumulácia snehovej pokrývky na zemskom povrchu, ako aj pomer tuhých a tekutých zrážkach pozorovaný v zime, klimatologicky definovanej ako obdobie mesiacov (december – február, DJF), predstavuje problematiku, ktorá je z hydrologického hľadiska veľmi dôležitá. Je to preto, že tuhé (snehové) zrážky a snehová pokrývka sa významným spôsobom podieľajú v priebehu zimy a na začiatku jari na regulácii zásob povrchovej a podzemnej vody slúžiacej ako zdroj pitnej a úžitkovej vody pre obyvateľstvo, poľnohospodárstvo a priemysel. Okrem pozitívneho vplyvu na hydrologický režim vodných tokov a podzemných vôd, prítomnosť snehovej pokrývky na zemskom povrchu má celý rad ďalších priaznivých účinkov. Predovšetkým chráni pôdu pred stratou tepla v nočných a ranných hodinách, chráni pôdnu biosféru a plodiny pred nepriaznivým účinkom holomrazov a významne dotuje pôdu vlhkosťou (zlepšuje pôdnu bilanciu vody). V neposlednom rade je snehová pokrývka významná z hľadiska zimného turistického ruchu. Z klimatologického hľadiska výskyt sneženia a snehovej pokrývky významne ovplyvňuje energetickú bilanciu krajiny a regionálny a globálny kolobeh vody, ako súčasť globálneho klimatického systému (Groisman et al., 1994; Hu and Feng, 2002).

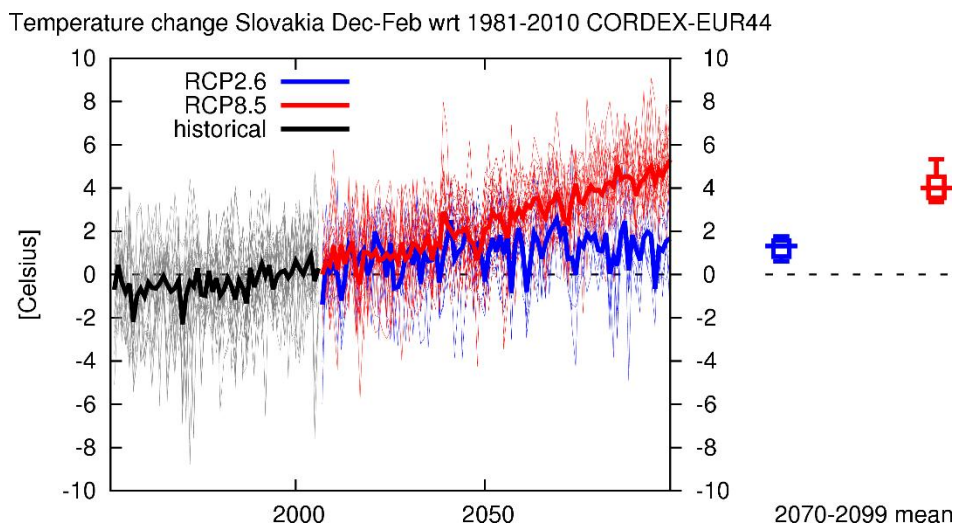
Prebiehajúca Klimatická zmena, prejavujúca sa najmä nárastom priemernej teploty vzduchu v zimných mesiacoch (DJF) (IPCC WGI AR5, 2013; Pecho a Turňa, 2018; Melo et al., 2013), má preukázateľný vplyv nielen na zvýšení variability výšky snehovej pokrývky (Lapin et al. 2007), na zmenu počtu dní s celkovou snehovou pokrývkou (Faško et al., 2018), ale aj na zmenou procesu (dynamiku) topenia sa snehovej pokrývky. Dlhodobý trend nárastu priemernej teploty vzduchu zimnej sezóny (DJF) vplyva aj na množstvo atmosférických zrážok vypadávajúcich v podobe snehu, čo sa prejavuje najmä zmenou pomeru tuhých a tekutých zrážok, (Pecho et al., 2009) resp. zmenou pomeru počtu dní so snežením (SD – snow days) a dní s tekutými zrážkami (PD – precipitation days) SD/PD. Zmena v skupenskom zastúpení atmosférických zrážok v priebehu zimy významne ovplyvňuje aj proces jarného topenia snehovej pokrývky (Huntington et al., 2004; Knowles et al., 2005; Feng, S., and Q. Hu., 2007; Serqet, et al., 2011), pričom najmä v situáciách s častejším výskytom tekutých zrážok v období vrcholenia výšky snehovej pokrývky (v horských oblastiach v období marec – apríl) (Faško et al., 2009; Pecho et al., 2010; Faško et al., 2013;) môže tento stav viesť k častejším a veľmi vážnym zimným a jarným povodniam z topenia snehu, a to aj v budúcnosti, vzhľadom na očakávaný vývoj charakteristík snehovej pokrývky (Pecho et al., 2017). Na území Slovenska dlhodobo pozorujeme pokles množstva atmosférických zrážok v podobe

snehu a zároveň aj relatívne veľkú fluktuáciu výskytu sneženia a trvalej snehovej pokrývky medzi jednotlivými zimnými sezónami. Na našom území je zreteľne pozorovaný vzťah medzi výskytom sneženia, snehovou pokrývkou, teplotou vzduchu a celkovým úhrnom atmosférických zrážok. (Faško et al., 2018). Vlastnosťami snehovej pokrývky a zmenami SD/PD na území Slovenska, a špecifickejšie v jeho horských oblastiach, sa v minulosti zaoberalo viacero autorov, ktorí vo väčšine prípadov dospeli k záveru, že na väčšine územia pozorujeme klesajúci trend pomeru SD/PD, ktorý je výraznejší pre nižšie položené časti územia Slovenska.

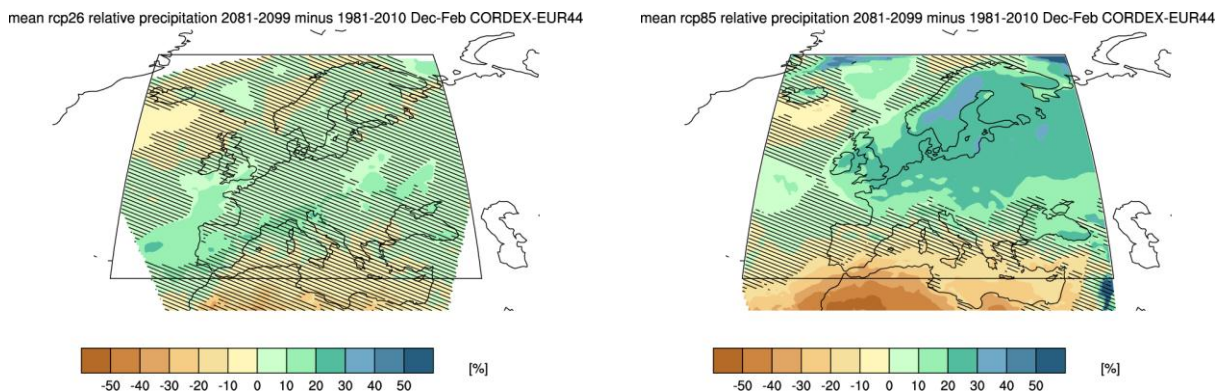
Cieľom tejto práce bolo poskytnúť podrobnejší pohľad na zmenu charakteru zimných zrážok na území Slovenska, nadväzujúc tak na predchádzajúce spracovania, ktoré sa už v minulosti venovali tejto problematike (Lapin et al., 2007; Nikolova, et al., 2013). Za hlavný indikátor bol zvolený pomer dní so snežením (SD – snow days) a dní s tekutými zrážkami (PD – precipitation days) SD/PD. Táto relatívne jednoduchá charakteristika dokáže poskytnúť pohľad na zmeny charakteru zrážok v zimnom období (DJF), pričom efektívne eliminuje prípadné nepresnosti a procesné chyby, ktoré sa môžu na niektorých staniciach vyskytnúť pri meraniach výšky celkovej snehovej pokrývky a vodnej hodnoty snehovej pokrývky (Serquet et al., 2011). Podnetom na spracovanie analýzy skupenských zmien atmosférických zrážok v zimnom období bola aj skutočnosť, že v zimnom období pozorujeme, aj napriek veľkej medziročnej premenlivosti, vzostupný trend priemernej sezónnej teploty vzduchu, čo sa prejavilo aj na staniciach zahrnutých v našej analýze (Obr.1). Na základe klimatického modelovania s využitím ansámbľu regionálnych klimatických modelov CORDEX môžeme navyše pre územie Slovenska vo vybranom období predpokladať ďalší nárast teploty vzduchu a množstva zimných zrážok pre vybrané RCP scenáre (RCP2.6 a RCP8.5) (Obr. 2; Obr. 3). V našom spracovaní sme sa tak zamerali nielen na analýzu časového vývoja zmeny pomeru SD/PD, ale aj vzťahu medzi SD/PD v závislosti od zmeny priemernej sezónnej teploty vzduchu. S využitím metodiky použitej v predchádzajúcich spracovaniach pre SD/PD pre oblasť Švajčiarska (Serquet et al., 2011) sme sa v rámci výberového súboru pokúsili vypracovať aj jednoduchú modelovú prognózu predpokladanej zmeny SD/PD pri predpokladanom oteplení zimnej sezóny o 1 K.



Obrázok 1: Vývoj priemernej sezónnej teploty vzduchu v zime (DJF) vo výberovom súbore 16 klimatologických staníc s kompletným radom meraní v zimných sezónach 1951/1952 – 2017/2018 s vyobrazeným lineárnym trendom (prerušovaná čiara) a 10 ročným kľavým priemerom (hrubá čierna krivka).



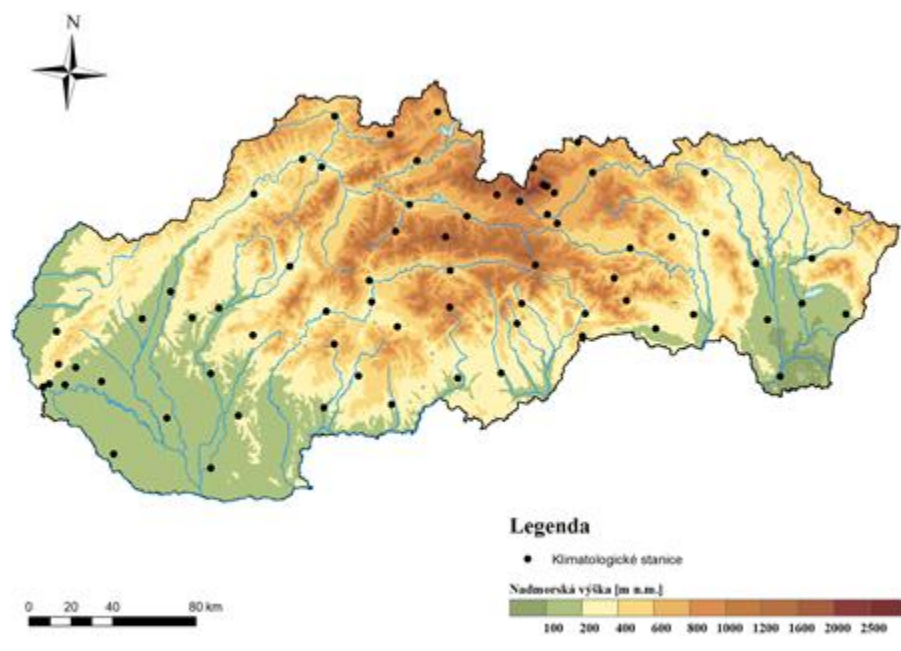
Obrázok 2: Predpokladané zmeny priemernej mesačnej teploty vzduchu v zime (DJF) na území Slovenska na základe výstupov regionálnych klimatických modelov (RCMs) v rámci ensomblu CORDEX podľa dvoch zvolených RCP scenárov, RCP2.6 a RCP8.5 (7 členov pre RCP2.6, 18 členom pre RCP8.5) do roku 2100 [Zdroj: KNMI – Climate Explorer].



Obrázok 3: Predpokladané zmeny sezónneho úhrnu atmosférických zrážok (podľa priemeru hodnoty RR) v zime (DJF) v rámci Európy na základe výstupov regionálnych klimatických modelov (RCMs) v rámci ensomblu CORDEX podľa dvoch zvolených RCP scenárov (RCP2.6 a RCP8.5) pre obdobie 2081-2100 [Zdroj: KNMI – Climate Explorer].

2 Údaje a metodika

Zmena priemernej sezónnej zimnej teploty vzduchu a pomeru SD/PD bola analyzovaná na 71 klimatologických staniciach SHMÚ distribuovaných v rozmedzí nadmorských výšok 97 – 2635 m a rozmiestnených viac-menej rovnomerne v rámci územia Slovenska na ploche 49 036 km² (Obr.4).



Obrázok 4: Priestorová distribúcia vybraných klimatologických staníc v rámci územia Slovenska.

Údaje zahrnuté vo výberovom súbore museli spĺňať nasledujúce podmienky:

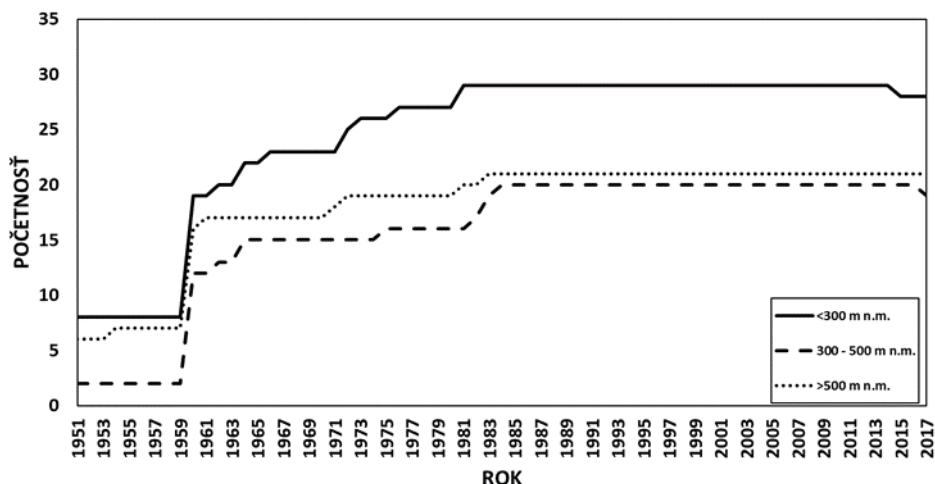
- zdrojové stanice vykonávali denné merania teploty vzduchu a atmosférických zrážok v období 1951 – 2018 a mali dostupný aspoň 30 ročný súbor údajov (Tab.2; Obr.5),
- ak sa v danom mesiaci vyskytol chýbajúci údaj o priemernej dennej teplote vzduchu, dennom úhrne zrážok alebo výške novej snehovej pokrývky, bol príslušný mesiac vylúčený z analýzy,
- ak klimatologická stanica nedisponovala údajmi o priemernej mesačnej teplote vzduchu, mesačnom počte SD alebo PD, pre všetky mesiace zimnej sezóny, tj, december, január a február, celá zimná sezóna bola vylúčená z analýzy.

Pomer dní so snežením a dní so zrážkami SD/PD (snow days/precipitation days) bol vypočítaný metodikou použitou v spracovaní Serquet et al. (2011). Na každej stanici zahrnutej v spracovaní bol vypočítaný počet SD a počet PD v mesiacoch december, január a február (DJF), ktoré z klimatologického hľadiska tvoria zimnú sezónu. Za deň so zrážkami bol považovaný taký deň, v rámci ktorého bola zaznamenaná denná suma (úhrn od 7:00h do 7:00h) atmosférických zrážok ≥ 1 mm. Za deň so snežením bol považovaný taký deň, pre ktorý bola v rannom meracom termíne (7:00 hod nasledujúceho dňa) nameraná výška novej snehovej pokrývky ≥ 1 cm nezávisle od výšky denného úhrnu atmosférických zrážok. Aby bola dodržaná logická skutočnosť, že SD sú podmnožinou PD, čiže počet PD $\geq$ SD, za dni so zrážkami boli automaticky považované aj všetky SD. V ďalšom kroku sme pristúpili k výpočtu pomeru SD/PD v zimnej sezóne (DJF) pre všetky stanice zahrnuté v spracovaní. Pre lepšie vyjadrenie závislosti pomeru SD/PD od nadmorskej výšky a vývoja pomeru SD/PD v období zimných sezón 1951 - 2017 boli stanice zaradené do troch skupín podľa ich nadmorskej výšky: < 300 m n.m., $301 - 500$ m n.m. a > 501 m n.m. (Obr.6). Získané hodnoty boli korelované s nadmorskou výškou a priemernou sezónnou teplotou vzduchu. Pre každú stanicu boli vypočítané trendy pomeru SD/PD v podobe lineárnej regresie pre obdobie pozorovania, ktoré bolo zaradené do spracovania.

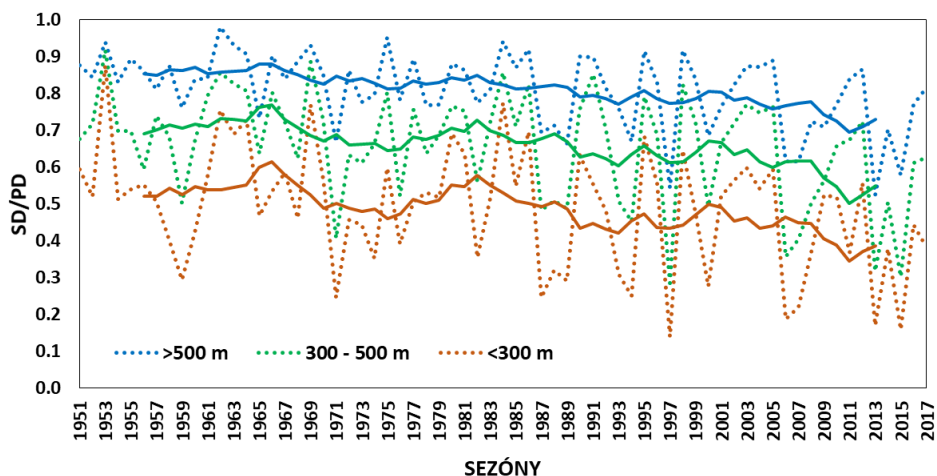
Tabuľka 1: Vybrané klimatologické stanice zahrnuté v analýze.

INDIKATÍV	KLIMATOLOGICKÁ STANICA	NADMORSKÁ VÝŠKA [m n.m.]	OBDOBIE	INDIKATÍV	KLIMATOLOGICKÁ STANICA	NADMORSKÁ VÝŠKA [m n.m.]	OBDOBIE
11801	Kuchyňa - Nový Dvôr	206	1961-2017	11908	Liptovská Osada	615	1961-2017
11810	Bratislava-Mlynská dolina	180	1982-2017	11910	Lom nad Rimavicou	1018	1961-2017
11812	Malý Javorník	584	1973-2017	11916	Chopok	1995	1955-2017
11813	Bratislava - Koliba	287	1951-2017	11917	Brezno	485	1984-2017
11815	Slovenský Grob	138	1973-2017	11927	Boľkovce	210	1951-2017
11816	Bratislava - letisko	133	1951-2017	11930	Lomnický štít	2635	1951-2017
11817	Kráľová pri Senci	121	1961-2017	11931	Skalná Pleso	1763	1961-2017
11818	Gabčíkovo	114	1961-2017	11933	Štrbské Pleso	1323	1951-2017
11819	Jaslovské Bohunice	178	1961-2017	11934	Poprad	694	1951-2017
11820	Žihárec	112	1961-2017	11935	Tatranská Lomnica	839	1961-2017
11826	Piešťany	163	1951-2017	11936	Tatranská Javorina	1017	1961-2017
11841	Dolný Hričov	309	1975-2017	11938	Telgárt	900	1951-2017
11846	Veľké Ripňany	182	1965-2017	11941	Ratková	304	1961-2017
11847	Topoľčany	176	1961-2017	11942	Rimavská Sobota	209	1951-2017
11849	Žikava	318	1966-2017	11944	Rožňava	311	1961-2017
11850	Podhájska	145	1961-2017	11945	Švedlár	477	1961-2017
11855	Nitra - Veľké Janíkovce	135	1982-2017	11946	Štós-Kúpele	599	1961-2017
11858	Hurbanovo	115	1951-2017	11947	Moldava n.Bodvou	216	1961-2017
11862	Beluša	253	1962-2017	11949	Spišské Vlachy	382	1965-2017
11865	Žilina	356	1961-2017	11950	Podolinec	566	1962-2017
11866	Čadca	458	1951-2017	11951	Červený Kláštor	469	1961-2017
11867	Prievidza	256	1972-2017	11952	Gánovce	698	1982-2017
11868	Oravská Lesná	785	1951-2017	11953	Revúca	340	1984-2017
11869	Rabča	642	1961-2017	11955	Prešov-vojsko	307	1984-2017
11872	Ružomberok	500	1961-2017	11962	Bardejov	312	1961-2017
11874	Liptovský Hrádok	640	1951-2017	11963	Jakubovany	407	1962-2017
11876	Podbanské	978	1961-2017	11966	Čadkov	140	1961-2017
11880	Dudince	139	1977-2017	11968	Košice - letisko	230	1951-2017
11892	Oravský Podzámok	526	1984-2017	11970	Silica	524	1971-2017
11898	Banská Bystrica-Zelená	420	1984-2017	11978	Máľhostov	102	1960-2017
11900	Žiar nad Hronom	275	1966-2017	11979	Somotor	97	1960-2017
11901	Banská Štiavnica	622	1961-2017	11982	Míchalovce	110	1960-2017
11902	Bzovík	351	1961-2017	11984	Orechová	120	1972-2017
11903	Sliac	310	1951-2017	11992	Osadné	380	1982-2017
11904	Vígfaš Pstruša	365	1961-2017	11993	Kamenica nad Cirochou	176	1951-2017
11905	Dolné Plachtince	191	1964-2017				

Pre potreby analýzy zmeny SD/PD boli vybrané dve porovnávacie obdobia, a to 1951 – 1990 (40 rokov) a 1991 – 2018 (27 rokov). Zlom vo výberových obdobiach bol stanovený na rok 1991 z dôvodu lepšieho vyjadrenia zmeny pomeru SD/PD podmieneným nárastom priemernej teploty vzduchu, pričom treba vziať do úvahy, že v prípade sezón 1951/1952 – 1960/1961 bolo do spracovania zaradených len 16 – 20 staníc. Zmena pomeru SD/PD v zimnej sezónne (DJF) tak bola pre každú stanicu vypočítaná ako jednoduchý rozdiel priemerných hodnôt pomeru pre zimné sezóny v obdobiach 1991/1992 – 2017/2018 a 1951/1952 – 1990/1991, vyjadrený ako percento zmeny. Tieto hodnoty boli následne korelované s nadmorskou výškou, vybranými referenčnými hodnotami nadmorskej výšky a vybranými referenčnými hladinami priemernej sezónnej teploty vzduchu v zime (DJF). Z vypočítaných hodnôt rozdielu pomeru SD/PD sme pre každú stanicu určili regresné krivky lineárneho trendu pre vzťah priemernej sezónnej teploty vzduchu a daného sezónneho pomeru SD/PD pre celé obdobie pozorovania zahrnuté v spracovaní. Zo získaných regresných rovníc sme pre každú stanicu vypočítali zmenu hodnoty SD/PD pri náraste teploty o 1 K, ktoré nám poslúžili ako základ pre výpočet zmien pomeru pre referenčné hladiny nadmorskej výšky a teploty vzduchu, s využitím jednoduchého empirického regresného modelu.



Obrázok 5: Vývoj počtu analyzovaných klimatologických staníc SHMÚ v závislosti od nadmorskej výšky v zimných sezónach 1951/1952 – 2017/2018.

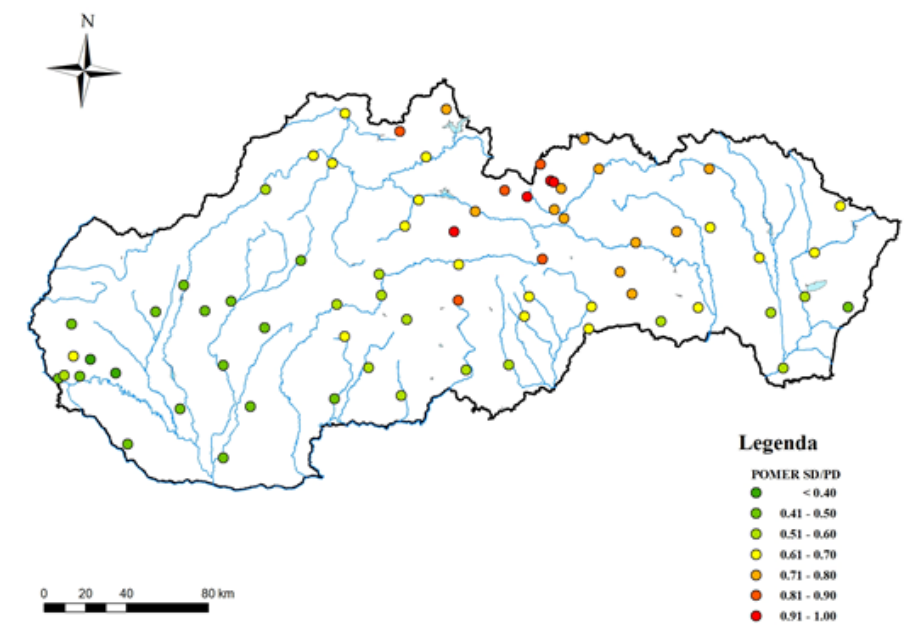


Obrázok 6: Vývoj priemernej hodnoty pomeru SD/PD pre vybrané skupiny nadmorských výšok vo výberovom súbore klimatologických staníc v zimných sezónach 1951/1952 – 2017/2018.

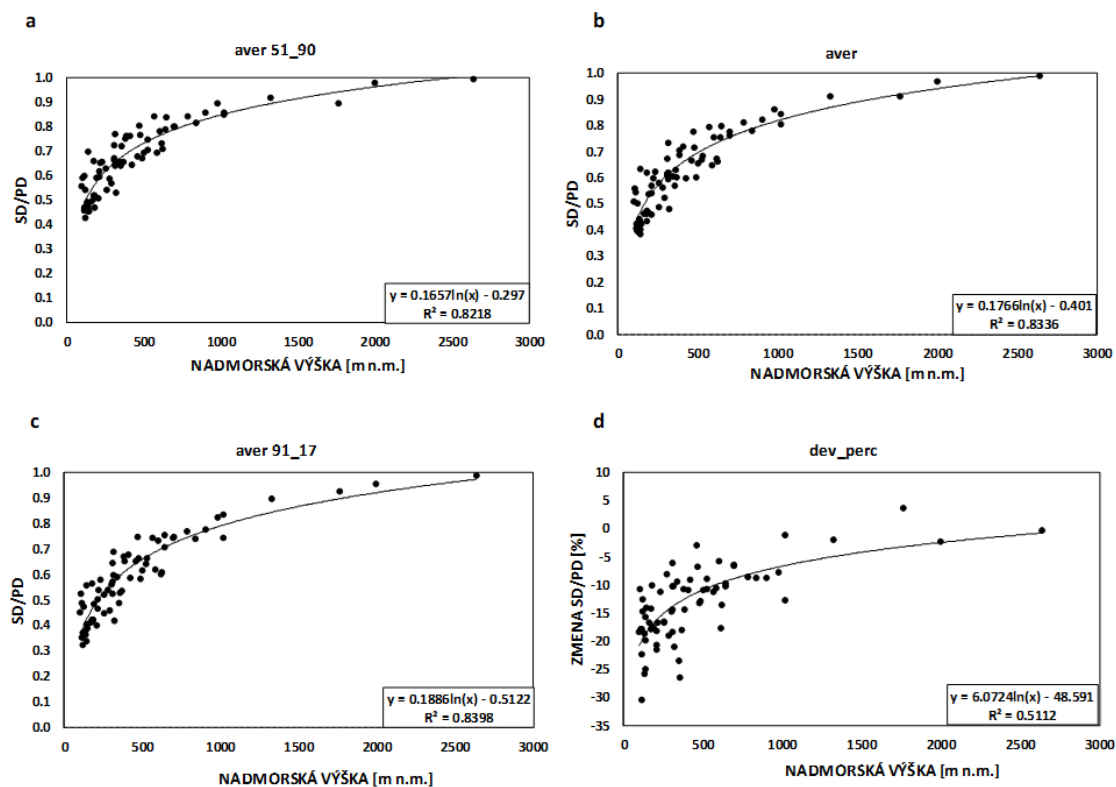
3 Výsledky a diskusia

Vo všeobecnosti je možné na základe dosiahnutých výsledkov konštatovať, že hodnoty pomeru SD/PD sa pre interval rokov 1951 – 2018, v rámci výberovej siete klimatologických staníc, pohybujú v intervale hodnôt 0.38 – 0.99, s mediánom 0.62 (Obr.7). V prípade intervalov absolútnych hodnôt pomeru SD/PD pre vybrané porovnávacie obdobia sezón 1951 – 1990: 0.43 – 0.99 (medián 0.66) a 1991 – 2017: 0.33 – 0.99 (medián 0.57) je pozorovaný pokles minimálnych hodnôt pomeru a mediánu, pričom je zaznamenaný aj pokles priemernej celosúborovej hodnoty z 0.67 (1951 – 1990) na 0.58 (1991 – 2017) (Obr.8). Najnižšie hodnoty boli vypočítané pre nížinné oblasti s nadmorskou výškou do 200 metrov, a to <0.47 (minimum Pezinok – Myslenice (Slovenský Grob) 0.38 51-90, Kráľová pri Senci 0.43 51-90,

Gabčíkovo 0.33 91-17), pričom na dosiahnuté hodnoty vplývala nielen nadmorská výška lokality, ale aj jej priestorové umiestnenie v rámci územia. Táto skutočnosť je napríklad dobre vyjadrená pri porovnaní hodnôt dosiahnutých v nížinných oblastiach na západe a východe územia, kde pozorujeme vplyv rastúcej kontinentality (smerom na východ) a prevládajúcich cirkulačných podmienok na priemernú sezónnu teplotu vzduchu a teplotu počas zrážkovej činnosti. V našom prípade to znamená všeobecne vyššie hodnoty pomeru SD/PD dosahované v porovnateľných nadmorských výškach v nížinných polohách na východe územia. Hodnoty blízke 1 naopak zaznamenávame predovšetkým vo vrcholových polohách Tatier, kde sú tekuté zrážky v zime pozorované len veľmi výnimočne, avšak vysoké hodnoty pomeru SD/PD sú zaznamenávané aj v relatívne nižších polohách na SZ a v horských a podhorských oblastiach na strednom a východnom Slovensku (Tab.2). Hodnoty pomeru pre rozdiel porovnávaných období 1951/1990 a 1991/2017 sa pohybovali v intervale -30,4 % až 3,8 % (medián 13,1 %). Najväčšie zmeny v podobe percentuálneho poklesu boli zaznamenané predovšetkým na juhu západného a stredného Slovenska v polohách do 300 m n.m., kde sa vyskytovali lokality s poklesom väčším ako 20 %, pričom absolútne najväčší relatívny pokles (-30,4 %) bol vypočítaný pre stanicu Gabčíkovo, situovanú na západe územia. Naopak najmenšie poklesy, respektíve veľmi malé nárasty boli vypočítané pre horské polohy nad 1000 m n.m., pričom aj v niektorých nižšie položených oblastiach na SZ a v strednej časti územia boli zaznamenané len malé zmeny pomeru SD/PD, ktoré v mnohých prípadoch nepresahovali prirodzenú variabilitu a neboli tak štatisticky významné (Obr.9). Jednoduchým regresným modelom, ktorý využíval hodnoty získané v rámci výberového súboru klimatologických staníc, boli vypočítané hodnoty zmeny pomeru SD/PD aj pre vybrané referenčné hodnoty nadmorskej výšky a vybrané referenčné hladiny teploty vzduchu (Tab.3). Z takto získaných údajov môžeme konštatovať, že pre väčšinu územia Slovenska (polohy pod 500 m n.m.) predpokladané hodnoty zmeny pomeru SD/PD predstavujú pokles > 10%, pričom pri očakávanom ďalšom otepľovaní zimnej sezóny sa javí ako veľmi pravdepodobný aj predpoklad, že bude dochádzať k ďalšiemu a aj výraznejšiemu úbytku výskytu dní so snežením. Táto skutočnosť je čiastočne vyjadrená aj vo výstupe modelovej predpovede pre jednotlivé vybrané referenčné hladiny teploty vzduchu. Alarmujúco vyznieva predovšetkým výpočet zmeny pre priemernú sezónnu teplotu 4 °C – pokles o 35 %. Takáto hodnota dlhodobej priemernej teploty vzduchu síce v momentálnom súbore staníc nebola zaznamenaná na žiadnej stanici, avšak v posledných rokoch sú hodnoty jej blízke čoraz častejšie zaznamenávané v jednotlivých zimných sezónach. Ako príklad môžu slúžiť zimné sezóny 2006/2007, 2013/2014 a 2015/2016, počas ktorých boli na mnohých staniaciach zaznamenané priemerné sezónne teploty vzduchu v intervale 3 °C – 4 °C čo sa následne prejavilo v pomeroch SD/PD < 0.15, pričom v sezóne 2013/2014 neboli na viacerých lokalitách na juhozápade územia Slovenska a Záhorí zaznamenané žiadne SD. Zmeny pomeru SD/PD boli modelovo vypočítané pre náraste teploty vzduchu o 1 K empirickým regresným modelom s využitím regresných rovníc pre zmenu pomeru medzi porovnávacími obdobiami na jednotlivých klimatologických staniaciach (Obr.10). Zo získaných údajov vyplýva, že najväčšie zmeny sú predpokladané v lokalitách situovaných v nadmorskej výške < 500 metrov a pre lokality s priemernou sezónnou teplotou vzduchu > 0°C. Pre tieto lokality sú predpokladané zmeny v podobe poklesu pomeru v intervale 10% - 40%, čo by pre mnohé nížinné lokality, aj s ohľadom na predpokladanú modelovú zmenu teploty vzduchu, v konečnom dôsledku znamenalo, že v prípade dní so snežením (SD), v najteplejších častiach Slovenska budú výrazne pribúdať také zimné sezóny, počas ktorých nebudú zaznamenané žiadne dni so snežením, čo môže z dlhodobého hľadiska predstavovať významné problémy.



Obrázok 7: Priemerná hodnota pomeru SD/PD vo výberovom súbore klimatologických staníc v zimných sezónach 1951/1952 – 2017/2018.



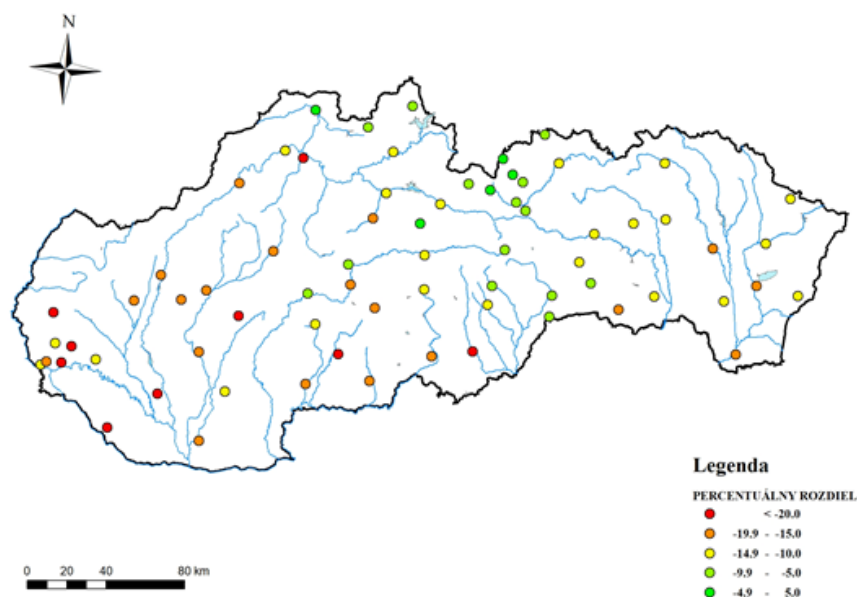
Obrázok 8: Závislosť priemernej hodnoty pomeru SD/PD od nadmorskej výšky [m n.m.] vo výberovom súbore staníc v zime (DJF) v obdobiach 1951/1990 **(a)** 1991/2017 **(b)** 1951/2017 **(c)** a zmeny pomeru SD/PD [%] v závislosti od nadmorskej výšky [m n.m.] pre obdobia 1991–2017 a 1951–1990 **(d)**.

Tabuľka 2: Priemerná hodnota pomeru SD/PD vo výberovom súbore klimatologických staníc pre vybrané výškové hladiny a vybrané intervaly priemernej teploty vzduchu v zimných sezónach 1951/1952 – 2017/2018

Priemerná hodnota pomeru SD/PD pre vybrané výškové hladiny [m n.m.]		Priemerná hodnota pomeru SD/PD pre vybrané hladiny teploty vzduchu [°C]	
Nadmorská výška [m n.m.]	SD/PD	Teplota vzduchu [°C]	SD/PD
> 200	0.47	> 0.0	0.42
[201 ; 300]	0.55	[-0.1 ; -0.5]	0.47
[301 ; 400]	0.62	[-0.6 ; -1.0]	0.48
[401 ; 500]	0.68	[-1.1 ; -1.5]	0.58
[501 ; 600]	0.71	[-1.6 ; -2.0]	0.60
[601 ; 700]	0.74	[-2.1 ; -3.0]	0.67
[701 ; 1000]	0.82	[-3.1 ; -4.0]	0.79
[1001 ; 1500]	0.85	[-4.1 ; -5.0]	0.87
1500 <	0.96	-5.1 >	0.98

Tabuľka 3: Zmeny pomeru SD/PD [%] pre vybrané referenčné nadmorské výšky [m n.m.] a vybrané referenčné hodnoty teploty vzduchu [°C] v zime (DJF) pre obdobia 1991–2017 a 1951–1990.

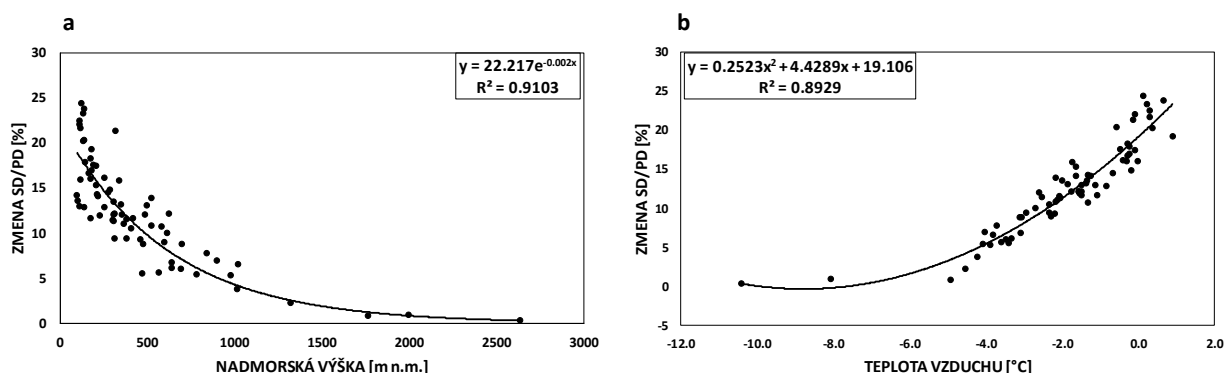
Zmena hodnoty SD/PD [%] pre vybrané referenčné nadmorské výšky [m n.m.]		Zmena hodnoty SD/PD [%] pre vybrané referenčné hodnoty teploty vzduchu [°C]	
Nadmorská výška [m n.m.]	SD/PD	Teplota vzduchu [°C]	SD/PD
200	-16.42	-12	1.15
400	-12.21	-10	0.75
600	-9.75	-8	-0.81
800	-8.00	-6	-3.54
1000	-6.64	-4	-7.44
1200	-5.54	-2	-12.51
1500	-4.18	0	-18.75
2000	-2.44	2	-26.17
2500	-1.08	4	-34.75



Obrázok 9: Rozdiel pomeru SD/PD v zimných sezónach (DJF) pre obdobia 1991–2017 a 1951–1990 vo výberovom súbore klimatologických staníc.

Tabuľka 4: Zmeny pomeru SD/PD [%] očakávané pri náraste teploty vzduchu o 1 K pre vybrané referenčné nadmorské výšky [m n.m.] a vybrané referenčné hodnoty teploty vzduchu [°C] v zime (DJF) pre obdobia 1991–2017 a 1951–1990.

Zmeny SD/PD [%] pre vybrané referenčné nadmorské výšky [m n.m.] pri náraste teploty vzduchu o 1 K		Zmeny SD/PD [%] pre vybrané referenčné hodnoty teploty vzduchu [°C] pri náraste teploty vzduchu o 1 K	
Nadmorská výška [m n.m.]	SD/PD	Teplota vzduchu [°C]	SD/PD
200	15.72	-12	2.29
400	11.34	-10	0.05
600	8.78	-8	-0.18
800	6.96	-6	1.62
1000	5.55	-4	5.43
1200	4.39	-2	11.26
1500	2.98	0	19.11
2000	1.16	2	28.97
2500	-0.25	4	40.86



Obrázok 10: Regresné závislosti určené pre zmeny pomeru SD/PD [%] očakávané pri náraste teploty vzduchu o 1 K v závislosti od nadmorskej výšky [m n.m.] (a) a teploty vzduchu [°C] (b).

4 Záver

Prebiehajúca Klimatická zmena sa vo všeobecnosti prejavuje zmenou charakteru počasia a priamo ovplyvňuje klimatické pomery aj na území Slovenska. Cieľom našej práce bolo preto vytvoriť základnú analýzu v oblasti skupenských zmien atmosférických zrážok, prezentovanú pomerom dní so snežením (SD) a dní so zrážkami (PD) v otepľujúcich sa podmienkach zimných sezón (DJF) v priebehu sezón 1951/1952 – 2017/2018. V spracovaní bolo použitých 71 klimatologických staníc rozmiestnených približne rovnomerne v rámci územia Slovenska v nadmorských výškach 97 – 2636 m. Závety získané na základe našej analýzy v prípade trendov zmeny pomeru SD/PD poukazujú na skutočnosť, že v rámci porovnávaných období zimných sezón 1951/1952 – 1990/1991 a 1991/1992 – 2017/2018 je zaznamenaný klesajúci trend – v intervale hodnôt -30,4 % až -3,8 %, ktorý bol výraznejší pre lokality s menšou nadmorskou výškou a pre teploty vzduchu približujúce sa ku kladným hodnotám. Jednoduchým empirickým regresným modelom sme skúmali možné zmeny pomeru SD/PD v závislosti od nadmorskej výšky a sezónnej (referenčnej) teploty vzduchu. Takto nastavený model umožňuje vypočítať zmenu hodnoty analyzovaného pomeru pre vybrané hladiny nadmorskej výšky a teploty vzduchu. Vypočítané zmeny hodnoty SD/PD pri zmene sezónnej teploty vzduchu o 1 K korešpondujú s predpokladaným nárastom teploty vzduchu pre obdobie zimnej sezóny, čo znamená, že v extrémnych prípadoch môžeme

v najteplejších lokalitách pri oteplení o 1 K očakávať zníženie pomeru SD/PD v intervale od -30 % do -40 %, čo by mohlo mať významný dopad na zimný charakter počasia a klimatické pomery nížinných oblastí Slovenska, s potenciálnym negatívnym dopadom na kvalitu života obyvateľstva a hospodárstvo štátu.

5 Referencie

- BEDNORZ, E., (2003): *Snow cover in eastern Europe in relation to temperature, precipitation and circulation*, International Journal of Climatology 24: p 591–601.
- BOCHNÍČEK, O., (2003): Snow conditions of the High and Low Tatra Mountains in terms of suitability for winter sports. (in Slovak: Snehové pomery Vysokých a Nízkyh Tatier z hľadiska vhodnosti pre zimné športy). [Dizertačná práca], SHMÚ Bratislava.
- BROWN, R. D., (2000): *Northern Hemisphere snow cover variability and change*. Journal of Climate 13, p 2339–2355.
- FAŠKO, P., HANDŽÁK, Š., (1997): *Selected characteristics of changes of snow cover in the Low Tatras in period 1921–1995*. NKP SR 7/97, MŽP SR, SHMÚ Bratislava, p.46-67.
- FAŠKO, P., HANDŽÁK, Š., VIVODA, J., (2000): *Selected snow cover characteristics in the highest mountains region in Slovakia in 1921 – 1998*. Bulletin SMS at SAV, 11, No. 2, p 29-34.
- FAŠKO P., KAJABA P., MARKOVIČ L., PECHO J., ŠŤASTNÝ P., (2017). *Charakteristika snehovej pokrývky na horských staniciach Slovenska s významnou polohou a historickou hodnotou*. In: Sborník príspevků z konference ČHMÚ a ČMeS: 120 let meteorologických měření a pozorování na Lysé hoře. 1. Vydání, ČHMÚ, Praha 2017. S. 152-153. ISBN 978-80-87577-68-4.
- FAŠKO, P., LAPIN, M., (1996): *Snow cover and precipitation changes in Slovakia in the 1921 – 1995 period*. In Proceedings on the 24th ICAM 96, HMI of Slovenia, Bled 1996. p 259 – 266.
- FAŠKO, P., LAPIN, M., (1996): *Oscillations of snow cover characteristics on selected meteorological stations of Slovakia in relation to changes of atmospheric circulation*. Project: Country Study of the Slovak Republic. SHMÚ, Bratislava.
- FAŠKO, P., LAPIN, M., PECHO, J., MIKULOVÁ, K. (2009): *Analysis of snow cover characteristics change in Slovakia*. In: Proceedings from 30th International Conference on Alpine Meteorology: Programme & Extended Abstracts, Germany, Rastatt, 11.-15. May 2009, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Germany; pp. 170-171, 2009, ISBN 978-3-88148-440-4.
- FAŠKO, P., MARKOVIČ, L., BOCHNÍČEK, O., (2018): *Trends of selected snow cover characteristics in Slovakia during winter seasons 1921/1922 - 2016/2017*. 20th EGU General Assembly, 4-13 April 2018, Vienna, Geophysical Research Abstracts Austria, Vol. 20, p.2266.
- FAŠKO, P., ŠŤASTNÝ, P., (2001): *The trends of atmospheric precipitation in mountainous regions of Slovakia* (in Slovak). NKP SR 10/01, MŽP SR, SHMÚ Bratislava, p 54-81.
- FAŠKO, P., ŠVEC, M., ŠŤASTNÝ, P., BOCHNÍČEK, O., KAJABA, P., NEJEDLÍK, P., PECHO, J., NECHAJ, P., (2013): *Trend of values and culmination time of the seasonal maximum total snow cover depth in Slovakia since the mid-20th century*. In proceeding of: EGU 2013, Vol. 15, 7.-12. April 2013, Wien, Austria [poster].
- FENG, S., HU, Q., (2007): *Changes in winter snowfall/precipitation ratio in the contiguous United States*, Journal of Geophysics, Res., 112, D15109. doi:10.1029/2007JD008397.
- GROISMAN, P.Y., KARL T.R., KNIGHT R.W., STENCHIKOV G.L., (1994): *Changes of Snow Cover, Temperature, and Radiative Heat Balance over the Northern Hemisphere*. Journal of Climate, 7, p 1633–1656.
- HU, Q., FENG S., (2004): *A Role of the Soil Enthalpy in Land Memory*. Journal of Climate, 17, p 3633–3643.

- HUNTINGTON, T. G., HODGKINS, G. A., KEIM, B. D., DUDLEY, R. W. (2004): *Changes in the proportion of precipitation occurring as snow in New England (1949 –2000)*, Journal of Climate., 17, p 2626– 2636.
- IPCC, (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi: 10.1017/CBO9781107415324.
- KARL, T. R., GROISMAN, P. YA.; KNIGHT, R. W., HEIM, R. R., (1993): *Recent Variations of Snow Cover and Snowfall in North America and Their Relation to Precipitation and Temperature Variations*, Journal of Climate, vol. 6, Issue 7, p .1327-1344.
- KNOWLES, N., et al., (2006): *Trends in snowfall versus rainfall in the western United States*, Journal of Climate, 19(18), 4545–4559, doi:10.1175/JCLI3850.1.
- LAPIN M., FAŠKO P., PECHO J., (2007): *Snow Cover Variability and Trend in the Tatra Mountains in 1921–2006*. In: 29-th International Conference on Alpine Meteorology. Extended Abstracts. Oral Sessions, 1, Toulouse, Meteo France, p 175–178.
- MATEJKOVÁ, H., (2000): *Long-term characteristics of snow cover on selected meteorological stations of north and northwest Slovakia for period 1960/61–1989/90*. Diploma thesis, Faculty of Natural Sciences of Comenius University, Bratislava.
- NIKOLOVA, N., FAŠKO, P., LAPIN, M., ŠVEC, M. (2013): *Changes in snowfall/precipitation-day ratio in Slovakia and their linkages with air temperature and precipitation*. Contributions to Geophysics and Geodesy, Vol. 43/2, p 141 – 155.
- PECHO J., FAŠKO P., GERA M., LAPIN M., ŠŤASTNÝ P., (2017): *Snow cover trends and climate change scenarios in mountainous regions of Slovakia in 1951-2100*. In: Zborník príspevkov z konferencie: Šiška, B. et al. 2017: Snow an ecological phenomenon, Smolenice, Slovakia, 19th–21st September 2017.
- PECHO, J., FAŠKO, P., MIKULOVÁ, K., LAPIN, M., ŠŤASTNÝ, P. (2009): *Long-term changes of snow cover regime in connection with observed solid, liquid and mixed precipitation ratio trends in Slovakia*. In: Abstracts of the Scientific Programme, Nineth Annual Meeting of the European Meteorological Society, Nineth European Conf, on Applied Meteorology (ECAM), Toulouse - France, 28 September - 2 October, Volume 6, 2009, ISSN.
- PECHO J., FAŠKO P., LAPIN M., MIKULOVÁ, K., ŠŤASTNÝ, P., (2009): *Extreme values of precipitation and snow cover characteristics in Slovakia*. Sustainable development and bioclimate, reviewed conference proceedings, GPI SAS Stará Lesná, p 24–25.
- PECHO, J., FAŠKO, P., MIKULOVÁ, K., ŠŤASTNÝ, P., NEJEDLÍK, P., KOŠŤÁLOVÁ, J. (2010): *Comparative spatial and statistical analysis of selected snow cover climatological characteristics (SC duration) in Slovakia within the 1950/1951-1979/1980 and 1980/1981-2009/2010 winters (2010)*. Eighth European Conf, on Applied Climatology (ECAC), p. 7.
- PECHO J., TURŇA M., (2018): *Zmena režimu teploty vzduchu a jej extrémov na vybraných meteorologických staniciach na Slovensku*. Kolektív autorov: Zborník abstraktov odbornej konferencie s medzinárodnou účasťou Letiskové vozovky 2018, 21.5.-22.5.2018, s. 8 (24 s.). ISBN 978-80-89565-34-4.
- SERQUET G., MARTY CH., DULEX J. P., REBETEZ M., (2011): *Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland*. Geoph. Res. Let., 38, L07703, doi:10.1029/2011GL046976
- VOJTEK M., FAŠKO P., ŠŤASTNÝ P., (2003): *Some selected snow climate trends in Slovakia with respect to altitude*. Acta Meteorologica Univ. Comeniana, XXXII. 17–2.
- ŠAMAJ, F., VALOVIČ, Š., (1988): *Snehové pomery na Slovensku*. [Snow conditions in Slovakia]. ALFA, Bratislava, 128 p.

Changes in snowfall - days ratio in relation to winter precipitation occurrence in Slovakia

Atmospheric precipitations falling as snow and its subsequent ground accumulation in form of snow cover, as well as the ratio of solid and liquid precipitation observed during winter, is a matter that is very important from a hydrological point of view. Snowfall and snow cover are significantly involved in regulating surface and groundwater supplies during the winter and early spring and serve as a source of drinking and service water for the residents, agriculture and industry. In addition to the positive influence on the global hydrological regime, the occurrence of snow cover has many other beneficial effects. In particular, it protects the soil against heat loss during the night and morning hours, protects the soil's biosphere and crops from the adverse effects of the black frost and significantly boosts and improves the soil water budget. Last but not least, presence of the snow cover is important in terms of winter tourism. From a climatological point of view, the occurrence of snowfall and snow cover significantly influences the radiation balance of the Earth's surface and the regional and global water cycle as part of the global climate system (Groisman et al., 1994, Hu and Feng, 2002).

Current Climate change is, in general, expressed as a change in weather patterns and directly affects global climatic conditions over continents, including the territory of Slovakia. The aim of the paper was therefore to provide a basic analysis of the changes in atmospheric precipitation, change in weather patterns more precisely, the changes of snow days (SD) and precipitation days (PD) ratio (SD/PD) during the winter season, climatologically defined as the period of months December – February (DJF) in the period 1951/1952 – 2017/2018 with emphasis on its change during two comparative periods, 1951-1990 – 1991-2017. We focused on its possible future development in dependence on altitude and average seasonal air temperature. Our analysis builds on previously published papers that has already dealt with this issue within the territory of Slovakia, e.g. Lapin et al., (2007); Faško et al., (2009); Pecho et al., (2010); Faško et al., (2013); Nikolova, et al., (2013). Using the methodology applied in previous SD/PD processing for the region of Switzerland (Serquet et al., 2011), we attempted to prepare a simple regression forecast model with goal to obtain the corresponding decrease in assumed change of SD/PD ratio per 1 K as a function of the seasonal winter air temperature. Analysis was conducted using the set of 71 climatologic stations operated by the SHMÚ and evenly distributed within the territory of Slovakia with altitudes ranging from 97 m to 2636 m.

The conclusions drawn from our analysis on SD/PD trends point to the fact, that during the comparative winter seasons periods 1951/1952 – 1990/1991 and 1991/1992 – 2017/2018 there was detected decreasing trend between -30,4% to -3.8%. It was more pronounced for locations with lower altitudes and for seasonal winter average air temperature approaching the positive values. Using a simple empirical regression model, we investigated possible changes in SD/PD ratio depending on altitude and average seasonal (reference) air temperature. Calculated SD/PD changes corresponded to the assumed increase in air temperature for the winter season, which means that in extreme cases we can expect a reduction in the SD/PD ratio in the warmest regions of Slovakia in range between -30% to -40%. This magnitude of relative decrease could have a significant impact on the winter weather and climate conditions of Slovakia's lowlands, with potential negative impact on the quality of life of the population and the national economy.

Key words: atmospheric precipitation, Climate change, winter season, snow days, precipitation days.