

ISSN 1335-339X

METEOROLOGICKÝ ČASOPIS

METEOROLOGICAL JOURNAL

2022

ROČNÍK 25 - ČÍSLO 1
VOLUME 25 - NUMBER 1



SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV

Meteorologický časopis vydáva Slovenský hydrometeorologický ústav (SHMÚ) ako vedecké a odborné periodikum so zameraním na meteorológiu, klimatológiu, hydrológiu, znečistenie ovzdušia a príbuzné vedné disciplíny. Časopis uverejňuje pôvodné vedecké práce, prehľadové články a krátke odborné príspevky domácich aj zahraničných autorov. Všetky články sú recenzované minimálne dvomi recenzentmi. Príspevky sa publikujú v jazyku anglickom, slovenskom a českom. Časopis vychádza 2x ročne. Časopis je dostupný na <http://www.shmu.sk/sk/?page=31>.

The Meteorological Journal is being published by the Slovak Hydrometeorological Institute (SHMÚ). The purpose of the journal is to publish papers in any field of meteorology, climatology, hydrology, air pollution and related scientific disciplines. They may be original scientific papers, reviews and short communications of Slovak and foreign authors. All the papers are reviewed by at least two reviewers. Papers are published in English, either Slovak, or Czech languages. The Meteorological Journal is issued twice per year. Journal is available at <http://www.shmu.sk/en/?page=31>.

PREDSEDA REDAKČNEJ RADY – EDITORIAL BOARD CHAIRMAN

Norbert Polčák, SHMÚ, Bratislava

TECHNICKÁ REDAKTORKA – TECHNICAL EDITOR

Katarína Pukančíková, SHMÚ, Bratislava

REDAKČNÁ RADA – EDITORIAL BOARD

Jan Bednář, MFF UK (Faculty of Mathematics and Physics Charles University), Praha

Martin Benko, SHMÚ, Bratislava

Rudolf Brázdil, MU (Masaryk University), Brno

Kamila Hlavčová, STU (Slovak University of Technology), Bratislava

Branislav Chvíla, SHMÚ, Bratislava

Martin Kremler, SHMÚ, Bratislava

Milan Lapin, FMFI UK (Faculty of Mathematics, Physics and Informatics Comenius University), Bratislava

Danica Lešková, SHMÚ, Bratislava

Oľga Majerčíková, SHMÚ, Bratislava

Igor Matečný, PriF UK (Faculty of Natural Sciences Comenius University), Bratislava

Irena Michlíková, SHMÚ, Bratislava

Jozef Mindáš, SEVS (University of Central Europe), Skalica

Pavol Nejedlík, SAV, Bratislava

Vladimír Pastirčák, SHMÚ, Bratislava

Jana Poórová, SHMÚ, Bratislava

Anna Pribullová, SHMÚ, Gánovce

Zora Snopková, SHMÚ, Banská Bystrica

Janka Szemesová, SHMÚ, Bratislava

Ján Szolgay, STU (Slovak University of Technology), Bratislava

Bernard Šiska, SPU (Slovak University of Agriculture), Nitra

Štefan Škulec, SHMÚ, Bratislava

Jaroslav Škvarenina, TU (Technical University), Zvolen

Pavel Šťastný, SHMÚ, Bratislava

Radim Tolasz, ČHMÚ (Czech Hydrometeorological Institute), Ostrava

Milan Trizna, PriF UK (Faculty of Natural Sciences Comenius University), Bratislava

Jozef Vivoda, SHMÚ, Bratislava

Pavol Zaujec, SHMÚ, Bratislava

VYDAVATEĽ – EDITOR

© Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, júl 2022

Jeséniova 17, P.O. Box 15, 833 15 Bratislava 37

IČO 00 156 884

R. č. MK SR: 3268/09

ISSN 1335-339X

METEOROLOGICKÝ ČASOPIS

METEOROLOGICAL JOURNAL

2022

ROČNÍK 25 – ČÍSLO 1

VOLUME 25 – NUMBER 1

SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV
SLOVAK HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE



CONTENTS

SAHARAN DUST OVER SLOVAKIA IN THE YEARS 2015 – 2020	
Peter Hrabčák	3
EVALUATION OF SIMULATIONS AND FORECASTS OF HYDROLOGICAL MODELS IN SHMU OPERATIONAL HYDROLOGY	
Hana Hlaváčiková, Kateřina Hrušková, Marcel Zvolenský, Danica Lešková	17
CALIBRATION ASPECTS OF A RAINFALL-RUNOFF MODEL OF SEVERAL HEADWATER CATCHMENTS WITH DIFFERENT RUNOFF REGIMES FOR OPERATIONAL HYDROLOGY	
Samuel Bacák, Hana Hlaváčiková, Kateřina Hrušková.....	27
MEAN DAILY CONCENTRATION PROFILES OF NO₂, NO AND O₃ AT NATIONAL AIR QUALITY MONITORING NETWORK IN 2010 – 2020	
Dušan Štefánik, Tereza Šedivá	41
CLIMATOLOGICAL PROBABILITY OF "WHITE CHRISTMAS" IN SLOVAKIA	
Milan Onderka, Jozef Pecho	57

INFORMATION

Flood situations in Slovakia in 2021	
Danica Lešková	65
Meteorological observations in Telgárt started 80 years ago	
Pavol Pisár Pavol Faško, Dalibor Výberčí	69
25th Snow meeting	
Martin Halaj	71
Prof. RNDr. Milan Lapin CSc. received a state award	
Pavol Šťastný	72

PERSONALS	73
------------------------	----

OBSAH

SAHARSKÝ PRACH NAD SLOVENSKOM V ROKOCH 2015 – 2020	
Peter Hrabčák	3
HODNOTENIE SIMULÁCIÍ A PREDPOVEDÍ HYDROLOGICKÝCH MODELOV V OPERATÍVNEJ HYDROLÓGII SHMÚ	
Hana Hlaváčiková, Kateřina Hrušková, Marcel Zvolenský, Danica Lešková	17
ASPEKTY KALIBRÁCIE ZRÁŽKOVO-ODTOKOVÉHO MODELU NIEKOĽKÝCH PRAMENNÝCH POVODÍ S RÔZNYM ODTOKOVÝM REŽIMOM PRE POTREBY OPERATÍVNEJ HYDROLÓGIE	
Samuel Bacák, Hana Hlaváčiková, Kateřina Hrušková.....	27
DENNÝ CHOD KONCENTRÁCIÍ NO₂, NO A O₃ NA STANICIACH NÁRODNEJ MONITOROVACEJ SIETI KVALITY OVZDUŠIA V ROKOCH 2010 – 2020	
Dušan Štefánik, Tereza Šedivá.....	41
KLIMATICKÁ PRAVDEPODOBNOŠŤ „BIELYCH VIANOC“ NA SLOVENSKU	
Milan Onderka, Jozef Pecho	57

INFORMÁCIE

Povodňové situácie na Slovensku v roku 2021	
Danica Lešková.....	65
Meteorologické pozorovania v Telgárte sa začali pred 80 rokmi	
Pavol Pisár Pavol Faško, Dalibor Výberčí	69
25. Stretnutie snehárov	
Martin Halaj.....	71
Prof. RNDr. Milan Lapin CSc. získal štátne vyznamenanie	
Pavol Šťastný.....	72

PERSONÁLIE	73
-------------------------	----

SAHARSKÝ PRACH NAD SLOVENSKOM V ROKOCH 2015 – 2020

PETER HRABČÁK

Slovenský hydrometeorologický ústav, Aerologické a radiačné centrum Gánovce, Hlavná 178, 058 01 Poprad-Gánovce, peter.hrabcak@shmu.sk

This study through model outputs from the Barcelona dust forecast center and measurements of the Cimel sun photometer at the Poprad-Gánovce station proves that dust from the Sahara desert is an episodic but not negligible part of the air over the territory of the Slovak republic. The paper uses data for the period 2015–2020. The days with the occurrence of Saharan dust were revealed primarily on the basis of information that came from a predictive model. Through photometer measurements such values of optical and microphysical properties of aerosols were subsequently separated, which belonged to situations with a dominant occurrence of Saharan dust in the aerosol mix. These properties were also determined for the average conditions in the investigated locality. Namely, these were the following characteristics: aerosol optical depth, Ångström exponent, coarse mode fraction at a total aerosol optical depth, and single scattering albedo. Furthermore, the following characteristics were determined for all aerosol sizes and separately for the coarse mode of the aerosols: volume concentration, effective radius, volume median radius, and its standard deviation. The volume distribution of aerosols was also presented at the work.

Táto štúdia prostredníctvom modelových výstupov z Barcelonského centra predpovede prachu a meraní slnečného fotometra Cimel na stanici Poprad-Gánovce dokazuje, že prach zo saharskej púšte je epizodickou, avšak nezanedbateľnou súčasťou ovzdušia nad územím Slovenskej republiky. V príspevku sú použité údaje pre obdobie 2015–2020. Dni s výskytom saharského prachu boli odhalené primárne na základe informácií, ktoré pochádzali z predpovedného modelu. Prostredníctvom meraní fotometra boli následne vyseparované také hodnoty optických a mikrofyzikálnych vlastností aerosólov, ktoré prináležali situáciám s dominantným výskytom saharského prachu v aerosólovom mixe. Tieto vlastnosti boli stanovené aj pre priemerné podmienky v skúmanej lokalite. Menovite išlo o nasledujúce charakteristiky: optická hrúbka aerosólov, Ångströmov exponent, podiel hrubých častíc na celkovej optickej hrúbke aerosólov a albedo jednoduchého rozptylu. Ďalej boli pre všetky veľkosti aerosólov, a separátne pre hrubý mód aerosólov, stanovené tieto charakteristiky: objemová koncentrácia, efektívny polomer, medián polomerov v objeme a jeho štandardná odchýlka. V práci bola tiež prezentovaná aj objemová distribúcia aerosólov.

Key words: Saharan dust, optical and microphysical properties of aerosols, Sun photometer

1 ÚVOD

Aerosóly sú dôležitou súčasťou klimatického systému Zeme. Ich významnou zložkou je okrem iných druhov aj minerálny prach. V ročnom priemere je v globálnom meradle zo zemského povrchu vyzdvihnutých 1000–4000 Tg minerálneho prachu, pričom približne 57 % z neho pochádza zo severnej Afriky (Huneeus et al., 2011; IPCC, 2013). Odhaduje sa, že minerálny prach predstavuje cca 70 % z celkovej globálnej hmotnosti všetkých atmosférických aerosólov a 25 % z globálnej optickej hrúbky aerosólov (Kinne et al., 2006). Aerosóly z púštnych oblastí vplývajú na energetickú bilanciu Zeme na jednej strane priamo, a to prostredníctvom interakcií s krátkovlnným a dlhovlnným žiarením a na druhej strane nepriamo prostredníctvom ich interakcií s oblakmi a ekosystémami (Kok et al., 2017).

Lokálny priamy vplyv môže v závislosti od albeda povrchu viesť ku kladnému, ale aj zápornému radiačnému pôsobeniu na hornej hranici atmosféry. Albedo vyššie ako 30 % (napr. nad púšťou alebo snehom) zvyčajne vedie ku kladnému radiačnému pôsobeniu a naopak albedo nižšie ako 15 % (napr. nad oceánmi alebo ihličnatými lesmi) zvyčajne vedie k zápornému radiačnému pôsobeniu. V oblasti približne medzi dvoma spomínanými hranicami môže byť výsledný vplyv tak kladný ako aj záporný (Balkanski et al.,

2007) a jeho konečnú hodnotu určujú fyzikálne vlastnosti aerosólových častíc (napr. ich tvar, veľkostná distribúcia alebo index refrakcie).

Stále zostáva nejasné to, či celkový vplyv atmosférického prachu na globálnu klímu je kladný alebo záporný. Nedávna štúdia Kok et al. (2017) odhalila podhodnocovanie veľkostí prachových častíc, ktoré vstupujú do globálnych klimatických modelov. Podľa ich zistení je prach nachádzajúci sa v atmosfére podstatne hrubší. Keďže hrubý prach má otepľujúci účinok na klímu, tak je pravdepodobné, že priamy radiačný efekt prachu bude menej ochladzujúci ako doposiaľ modelmi odhadovaná úroveň cca $-0,4 \text{ W/m}^2$. Práca prináša odhad v intervale od $-0,48$ do $+0,20 \text{ W/m}^2$, čo zahŕňa možnosť, že prach nakoniec spôsobuje čisté otepľovanie planéty. Pozoruhodný je vplyv prachu na snehovú pokrývku. Bolo zistené, že depozícia minerálneho prachu môže viesť vo vysokých polohách Álp a Karpát k zrýchlenému topeniu snehu v dôsledku zníženého albeda, a tiež aj v dôsledku tvorby snehových rias (Di Mauro et al., 2019; Greilinger et al., 2018).

Saharský prach je pre vedeckú obec zaujímavý už vyše 100 rokov. Článok o ňom napísal dokonca aj Charles Darwin. Plavidlá v Atlantickom oceáne často pokrýval jemný prášok a Darwin sa zamýšľal nad tým, či jeho zdrojom môže byť Afrika (Darwin, 1846). Ľudia v Európe sa so sa-

harským prachom určite stretávali aj v dávnejšej minulosti. Z výsledkov paleoklimatologickej štúdie Clifford et al. (2019) sa dozvedáme, že počas uplynulých 2000 rokov sa v Alpách vyskytla v určitých obdobiach zvýšená depozícia saharského prachu. Najdlhší interval významnejších prípadov výskytu saharského prachu (VSP) bol odhalený v období rokov 870–1000, ktoré je zhodné s nástupom teplejšieho obdobia, nazývaného stredoveké klimatické optimum: cca 900–1300 (Berner et al., 2011).

Ďalšie významné periódy VSP, avšak už kratšie, sa vyskytli v rokoch 140–170, 370–450, 1320–1370 a 1910–2000. Počas modernej doby (1780–2006) boli 3 najvýraznejšie VSP pozorované v rokoch 1977, 1943 a 1994 (zoraďené zostupne). Štúdia dospela k záveru, že v minulosti súviseli významné epizódy VSP s kombináciou sucha v severnej Afrike a zvýšenou rýchlosťou vetra, spôsobenou zmenami v gradiente teploty a tlaku. Na základe zistených súvislostí autori predpokladajú, že otepľovanie bude mať v budúcnosti za následok menej časté, ale intenzívnejšie prípady VSP.

Osobitnou kapitolou sú prípady transportu saharského prachu cez Atlantický oceán smerom na západ, často až nad americký svetadiel (Velasco-Merino et al., 2018). Podľa NASA (Streiff, 2021) by mala aktivita takýchto prípadov v nasledujúcich 20–50 rokov vplyvom klimatickej zmeny poklesnúť až o 30 % a tento pokles by mal ďalej pokračovať. V budúcom storočí by sa aktivita mohla dostať na najnižšiu úroveň za posledných 20 000 rokov. Príčina tkvie v zoslabení pasátového prúdenia vplyvom poklesu tlakového gradientu, a to ako následok relatívneho oteplenia severnejších vôd Atlantického oceánu v porovnaní s jeho južnejšie sa nachádzajúcimi oblasťami.

Problematika saharského prachu si zaslúžila svoju pozornosť aj na vedeckom poli v rámci štátov susediacich so Slovenskou republikou (Chilinski et al., 2016; Varga et al., 2013; Varga et al., 2016; Varga, 2020; Marion, et al., 2018; Gerhard, et al., 2016). Daná problematika získala v posledných rokoch určitý ohlas aj na Slovensku. Dôkazom toho je práca Hrabčák (2016), v ktorej nachádzame podrobnú analýzu 9-dňovej série (31.3.–8.4.2016) detekcie saharského prachu prostredníctvom meraní mikropulzného lidar na stanici Poprad-Gánovce. Výskyt prachu bol zaznamenaný v hraničnej vrstve atmosféry aj vo voľnej atmosfére. Maximálna nadmorská výška, v ktorej bol detegovaný, je 8 kilometrov. Vrstvy prachu sa nad miestom merania vyznačovali výraznou dynamikou a rôznorodou štruktúrou. Počas dňa 3. apríla sa prach nachádzal vo vrstve s vertikálnou hrúbkou až 5 kilometrov. Štúdia je obohatená aj o synoptickú analýzu danej situácie a tiež aj o analýzu spätných trajektórií prúdenia vzduchu.

Novšia práca maďarského autora Varga (2020) nadväzuje na staršiu štúdiu Varga et al. (2013). Obe práce sa zameriavajú na VSP v oblasti Panónskej panvy. Novšia z nich uvádza, že v spomínanej oblasti (jej severná časť zasahuje aj nad územie SR) bolo počas 40-ročného obdobia 1979–2018 prostredníctvom systematickej analýzy satelitných meraní odhalených celkovo 218 prípadov VSP. Suverénne najviac takýchto prípadov (90) sa vyskytlo v poslednom analyzovanom desaťročí (2009–2018). V prípade ročného chodu práca uvádza, že najviac prípadov

VSP bolo pozorovaných v jarnom (40 %) a letnom (32 %) období. Na druhej strane najmenej počas jesene (14 %) a zimy (14 %). K podobným výsledkom dospela aj práca Chilinski et al. (2016), v ktorej sa na základe 10-ročných klimatologických údajov spomína, že diaľkový prenos saharského prachu do strednej Európy nastáva najmä počas jari a leta.

Medzi najdôležitejšie prínosy práce Varga (2020) patrí zistenie, že v poslednom desaťročí bola počas zimy pozorovaná zvýšená frekvencia a intenzita depozície saharského prachu. Posledné skúmané desaťročie bolo v priebehu zimného obdobia charakterizované vyšším počtom prípadov VSP (16), ako počas troch predchádzajúcich desaťročí dohromady (13). Na margo zvyšujúceho sa počtu zimných prípadov VSP autor ponúka vysvetlenie prostredníctvom rastúcej amplitúdy planetárnych (Rossbyho) vln, ktorá následne ovplyvňuje tvorbu saharských tlakových níží a transport prachu do vyšších zemepisných šírok. Možnou príčinou viac meandrujúceho dýzového prúdenia a zvlneného polárneho vortexu je fenomén zvaný Arktické zosilnenie (Arctic amplification, Dai et al., 2019), ktoré je spôsobené rýchlejším otepľovaním polárnych oblastí severnej pologule v porovnaní s nižšími zemepisnými šírkami.

Na VSP v strednej Európe má ale pravdepodobne vplyv aj tzv. Intenzita severoafrického dipólu (North African Dipole Intensity - NAFDI). Index NAFDI charakterizuje intenzitu tlakového gradientu, ktorý závisí na jednej strane od výraznosti vysokého tlaku vzduchu v oblasti subtropickej saharskej Afriky (Maroko) a na druhej strane od južnejšie položenej monzúnovej oblasti nižšieho tlaku (Nigéria). Pozitívnu fázu NAFDI charakterizuje zvýšený transport saharského prachu do severného Atlantiku. Negatívna fáza NAFDI sa vyznačuje zvýšeným exportom prachu do oblasti západného Stredomoria (Rodríguez et al., 2020). Táto fáza má teda za následok aj vyššiu pravdepodobnosť transportu prachu do strednej Európy. Štúdia Varga (2020) sa venuje aj charakteristickému meteorologickému pozadiu jednotlivých epizód a prostredníctvom poľa geopotenciálnej výšky v hladine 700 hPa rozlišuje 3 hlavné synoptické typy spojené s VSP v oblasti Panónskej panvy.

Práca Varga (2020) tiež uvádza aj priemernú ročnú hodnotu celkovej depozície saharského prachu, ktorá činí 2,2 g/m². Dominantnou je mokrá zložka depozície a predstavuje 77–93 %. Depozícia prachu zo saharskej púšte zohrala nezanedbateľnú úlohu aj pri formovaní pôdy v medziľadových dobách. Podľa výpočtov Varga et al. (2016) môže severoafrický prachový materiál predstavovať 20–30 % z ílu a jemných pôdných zložiek interglaciálnych paleo-pôd (paleosols) v oblasti Panónskej panvy. Podľa rozdelenia Stuut et al. (2009) sa územie Slovenska nachádza na okraji D1b zóny, v rámci ktorej sa súčasný saharský prachový materiál môže začleniť do pôdneho systému a môže tak zvýšiť obsah jeho jemných častíc.

Priemerná ročná hodnota optickej hrúbky minerálneho prachu pre vlnovú dĺžku 550 nm (AERONET a modelové dáta) bola v období 1998–2012 v prípade Poľska $0,038 \pm 0,016$ s maximom v apríli na úrovni $0,057 \pm 0,03$ a minimom v mesiacoch december a január s hodnotou $0,027 \pm 0,01$ (Chilinski et al., 2016). Mesiac

máj charakterizuje až 28 percentný podiel dní s optickou hrúbkou minerálneho prachu vyššou ako 0,05, naopak v zime je takýchto dní pod 5%. Práca tiež uvádza, že na celkovej optickej hrúbke aerosólov (aerosol optical depth - AOD) má v danom regióne minerálny prach podiel cca 25 % a je jedným z dvoch (spoločne s produktmi horenia) najdôležitejších typov aerosólov, ktoré sa nachádzajú nad hraničnou vrstvou atmosféry.

Vedecká štúdia Marinou et al. (2017) zhodnotila výsledky 9-ročného (2007–2015) trojrozmerného monitoringu prenosu saharského prachu do Európy. Opierala sa o dva hlavné zdroje údajov, ktorými boli CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) a EARLINET (European Aerosol Research Lidar Network). V jednej zo širších oblastí (SV Európa: 10–30 V, 45–60 S) ich záujmu sa nachádzalo aj Slovensko. Táto oblasť okrem iného zahŕňala aj kompletne celé Maďarsko a Poľsko. Údaje o priemernej optickej hrúbke prachu pre vlnovú dĺžku 532 nm sú k dispozícii pre 4 3-mesačné obdobia. Najvyššie hodnoty dosahuje optická hrúbka prachu v období apríl-máj-jún a to $0,033 \pm 0,062$, naopak najnižšie hodnoty dosahuje v období október-november-december a to $0,023 \pm 0,043$.

Je možné konštatovať, že v ovzduší nad územím Slovenska a tiež aj susedných štátov sa prach zo Sahary vyskytuje epizodicky. Smerom na juh význam saharského prachu narastá. Satelitné merania ukázali, že je dôležitou zložkou stredomorskej atmosféry. V západnej časti Stredomoria je VSP detegovaný v takmer štvrtine dní (24%), v strednej časti je to 30 % a vo východnej časti je podiel dní najvyšší a dosahuje 34 % (Varga et al., 2014). V prípade jednotlivých juhoeurópskych krajín sú frekvencia výskytu a prízemné koncentrácie najvyššie predovšetkým v Španielsku a Taliansku.

Práca Wang et al. (2020) analyzovala vplyv saharského prachu na kvalitu ovzdušia a verejné zdravie v trinástich európskych krajinách. Podľa jej zistení podiel saharského prachu na celkovom počte úmrtí spojených s expozíciou PM₁₀ dosahuje v Španielsku 44 % a v Taliansku 27%. Daný podiel práca zmiňuje aj pre dve krajiny susediace so Slovenskom. V prípade Rakúska je to 13 % a v prípade Českej republiky je to 8 %. Citovaná štúdia odhaduje, že v dôsledku expozície saharským prachom dochádza ročne v Španielsku k cca 13 000 a v Taliansku k cca 16 000 úmrtiam. Pre Rakúsko je tento počet približne 600 a pre Českú republiku približne 700.

2 METODIKA

2.1 Výstupy BDFC

Barcelonské centrum predpovede prachu (Barcelona Dust Forecast Center - BDFC) bolo založené vo februári 2014 dvomi inštitúciami. Jednou z nich bola Španielska štátna meteorologická agentúra a druhou Barcelonské superpočítačové centrum. Dané centrum bolo založené s cieľom splniť záväzok Svetovej meteorologickej organizácie, ktorým bolo vytvoriť prvé špecializované regionálne meteorologické centrum, činnosťou ktorého má byť predpoveď výskytu piesku a prachu v atmosfére. Centrum

operačne generuje a distribuuje predpovede prachu pre severnú Afriku (severne od rovníka), Stredný východ a Európu (25° Z–65° V, 0°–65° S). Na predpovednej doméne sa okrem Sahary nachádzajú aj ďalšie významné oblasti potenciálnych zdrojov prachu, ktorými sú najmä Arabský polostrov a okolie Kaspického mora. BDFC vydáva svoje regionálne predpovedné produkty na dennej báze a využíva pritom predpovedný model MONARCH (Badia et al., 2017). Tento model zahŕňa prírodné aj antropogénne zdroje (t. j. poľnohospodársky narušené pôdy).

Predpovede zahŕňajú nasledovné produkty: zaťaženie prachom, ktoré udáva celkové množstvo prachu vo vertikálnom stĺpci nad daným miestom (g/m²), ďalej koncentrácia prachu pri povrchu (μg/m³), optická hrúbka pre vlnovú dĺžku 550 nm, útlm prachu (M/m) pri povrchu pre vlnovú dĺžku 550 nm. K dispozícii je tiež mokrá a suchá depozícia na povrchu (mg/m² za 3 hodiny). Všetky produkty sú prezentované s časovým krokom 3 hodiny od 12:00 UTC pre obdobie nasledujúcich 72 hodín. K dispozícii sú taktiež aj mesačné priemery prízemnej koncentrácie prachu a jeho celkového množstva vo vertikálnom stĺpci.

Predpovedný model MONARCH je spúšťaný každý deň. Jeho horizontálne rozlíšenie je 0,1° a jeho vertikálne rozlíšenie charakterizuje 40 σ hladín. Model využíva počiatočné podmienky (12 UTC) prevzaté od U. S. National Centers for Environmental Prediction (NCEP) s rozlíšením 0,5°. Okrajové meteorologické podmienky s časovým krokom 6 hodín a s rovnakým rozlíšením 0,5° preberá od NCEP Global Forecast System. BDFC vykonáva pravidelné hodnotenie predpovedanej optickej hrúbky prachu. Hodnotenie prebieha takmer v reálnom čase. Porovnávané sú hodnoty optickej hrúbky prachu pre vlnovú dĺžku 550 nm, získané z modelu v čase od 0 do 24 hodín s hodnotami celkovej optickej hrúbky aerosólov, ktoré sú poskytované sieťou AERONET (Aerosol RObotic NETwork) (Holben et al., 1998; Dubovik and King, 2000). Porovnanie sa vykonáva pre vybraných 40 staníc, pre ktoré je charakteristická vyššia pravdepodobnosť výskytu prachu (Werner et al., 2021).

V tejto práci sú predkladané výsledky analýzy, ktorá sa opiera o výstupy predpovedného produktu s názvom Zaťaženie prachom. Daná analýza spočívala v manuálnom skríningu týchto predpovedí, pričom sa používali iba predpovedné výstupy od 0 do 21 hodín. Prach pochádzajúci zo Sahary sa od iných zdrojov odlíšil prostredníctvom precízneho sledovania jeho postupu od zdroja až nad skúmanú lokalitu. Analyzované šesťročné obdobie začína 1. januárom 2015 a končí 31. decembrom 2020. V tomto období boli identifikované dni s VSP nad územím Slovenskej republiky. Samostatne boli počítané dni s VSP pre oblasť Poprad-Gánovce.

V prípade územia SR bol k jednotlivým dňom s VSP priradený aj maximálny index zaťaženia saharským prachom v daný deň (ďalej skrátené: MIZSP). Hodnoty indexov zaťaženia saharským prachom a k nim prislúchajúce veľkostné intervaly sa nachádzajú v Tab. 1. Tieto indexy zodpovedajú farebnej škále, ktorú používa BDFC pri svojich mapových predpovediach v prípade produktu zaťaženie prachom. Za deň s VSP je definovaný taký deň, v ktorom aspoň počas krátkeho časového intervalu dosiahol

Tabuľka 1. Hodnoty indexov zaťaženia saharským prachom a k nim prislúchajúce veľkostné intervaly.

Table 1. Values of Saharan dust load indices and associated size intervals.

Hodnota indexu	1	2	3	4	5	6	7
Zaťaženie [g/m ²]	0,1–0,2	0,2–0,4	0,4–0,8	0,8–1,2	1,2–1,6	1,6–3,2	3,2–6,4

index zaťaženia hodnotu minimálne 1 aspoň niekde nad územím SR resp. v oblasti Poprad-Gánovce. Index rovnajúci sa 1, ktorému prislúcha zaťaženie od 0,1 do 0,2 g/m² predstavuje prvú farbu na farebnej škále BDFC, pričom hodnoty pod 0,1 g/m² sa na predpovednom výstupe už nezobrazujú.

2.2 Výstupy zo slnečného fotometra Cimel

Automatický slnečný fotometer Cimel typu CE 318 NE dP (od roku 2018 aktualizovaný na T verziu) je prístroj umožňujúci merania priameho a rozptýleného slnečného žiarenia. Slnečné žiarenie deteguje v deviatich spektrálnych oblastiach. Dve vlnové dĺžky, a to 340 a 380 nm sú v UV oblasti. Tri sú vo viditeľnej oblasti: 440, 500 a 675 nm. Posledná skupina, a to štvorica vlnových dĺžok sa nachádza v infračervenej oblasti: 870, 938 (zameraná na detekciu vodnej pary), 1020 a 1640 nm. Okrem štandardných meraní toto vedecké zariadenie vykonáva aj merania v troch polarizačných stupňoch (120°, 240° a 360°). Prístroj je plne automatizovaný a za priaznivých poveternostných situácií sú informácie o priamom slnečnom žiarení získavané približne každých 15 minút. Merania rozptýleného slnečného žiarenia sa získavajú dvoma hlavnými meracími metódami v automaticky stanovených časoch, ktoré prislúchajú vybraným zenitovým uhlom Slnka na oblohe. Týmto meracími metódami sú Almuqantar (zenitový uhol je konštantný a mení sa azimutálny uhol) a Principal Plan (mení sa zenitový uhol v kladnom a zápornom smere od Slnka) (Cimel Electronique, 2015).

Slnečný fotometer je prístroj, ktorého konštrukcia a meracie postupy sú špeciálne navrhnuté za účelom určovania rôznych optických a mikrofyzikálnych vlastností aerosólov. Okrem toho dokáže určiť aj obsah vodnej pary v atmosférickom stĺpci. Prvé merania sa začali na pracovisku Poprad-Gánovce vykonávať 12.12.2014. Ak to podmienky dovoľujú, tak je v automatickej prevádzke každý deň okrem kalibračného obdobia. Z tohto dôvodu nie sú k dispozícii kontinuálne merania. Doba kalibrácie je približne 2 mesiace a počas nej je prístroj mimo pracoviska. Vykonáva sa raz ročne a najvhodnejším obdobím pre jej uskutočnenie je obdobie okolo zimného slnovratu. Je zabezpečená v rámci globálnej siete AERONET (AErosol RObotic NETwork) a vykonáva ju Service National d'Observation PHOTONS/AERONET, Laboratoire d'Optique Atmosphérique, CNRS-Université de Lille.

Proces výpočtu optických a mikrofyzikálnych vlastností aerosólov je pomerne zložitý a je realizovaný vďaka nášmu členstvu v medzinárodnej sieti AERONET, ktorá zabezpečuje jednotnú metodiku pre celý svet (AERONET, 2019). V rámci AERONETu je zavedený prepracovaný systém, ktorý prešiel dlhoročným vývojom. K dispozícii sú

tri úrovne kvality údajov. Level 1.0 (bez skríningu oblakov a kontroly kvality), level 1.5 (po skríningu oblakov a kontrole kvality) a level 2.0 (zaručená kvalita). Detaily ohľadne procesu skríningu oblakov, ktorý zabezpečuje, aby údaje neboli ovplyvnené oblačnosťou ponúka štúdia Smirnov et al.

(2000). Údaje, ktorých level je 2.0 sú dostupné až po kalibrácii prístroja. V predloženej práci boli vždy použité iba údaje levelu 2.0.

Všetky optické a mikrofyzikálne vlastnosti aerosólov, ktoré budú v nasledujúcom texte postupne predstavené sa vzťahujú na celý vertikálny stĺpec atmosféry, t. j. od zemského povrchu až po hornú hranicu atmosféry. Základnou optickou vlastnosťou stanovenou pomocou meraní slnečného fotometra je optická hrúbka aerosólov. Pre potreby tejto práce bola určená pre všetkých 8 možných vlnových dĺžok: 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 a 1640 nm. Optická hrúbka aerosólov τ_λ pre danú vlnovú dĺžku λ je daná vzťahom (Hrabčák, 2019):

$$\tau_\lambda = \int_0^H b(\lambda, h) dh = \frac{\ln(S_{\lambda,H}) - \ln(S_\lambda) - \sum_{i=1}^n \tau_{\lambda,i} \mu_i}{\mu}, \quad (1)$$

kde H označuje vzdialenosť hornej hranice atmosféry od zemského povrchu, b je koeficient útľmu pre aerosóly, h je vzdialenosť od zemského povrchu, $S_{\lambda,H}$ je hustota toku monochromatického slnečného žiarenia na hornej hranici atmosféry, S_λ je hustota toku monochromatického slnečného žiarenia na zemskom povrchu, $\tau_{\lambda,i}$ je optická hrúbka ďalších faktorov spôsobujúcich útľm priameho slnečného žiarenia, μ_i je ich relatívna optická hmotnosť a μ označuje relatívnu optickú hmotnosť aerosólov. Ďalšou optickou vlastnosťou aerosólov použitou v tejto práci je Ångströmov exponent α

$$\alpha = -\frac{\log(\tau_{\lambda_1}/\tau_{\lambda_2})}{\log(\lambda_1/\lambda_2)}, \quad (2)$$

ktorý bol pre potreby tejto štúdie stanovený pre pár vlnových dĺžok 440 a 870 nm. Optická charakteristika albedo jednoduchého rozptylu bola stanovená pre vlnovú dĺžku 440 nm a je definovaná ako

$$\omega_\lambda = \frac{\tau_{\lambda,r}}{\tau_\lambda}, \quad (3)$$

kde τ_λ je optická hrúbka aerosólov (celková) a $\tau_{\lambda,r}$ označuje rozptylovú optickú hrúbku aerosólov, ktorá kvantifikuje parciálny vplyv aerosólového rozptylu na slnečné žiarenie dopadajúce na zemský povrch (Dubovik, 2000). Čím väčšia je hodnota albeda jednoduchého rozptylu, tak tým vyšší podiel má rozptyl na celkovom útľme slnečného žiarenia spôsobeného aerosólmi nachádzajúcimi sa v ovzduší.

Okrem už spomenutých optických vlastností boli v práci použité aj výstupy objemovej distribúcie aerosólov $dV(r)/d \ln r$ [$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$], ktorá sa stanovuje pre 22 vopred preddefinovaných logaritmicke ekvidistantných diskretných bodov r_i , v intervale polomerov častíc od 0,05 do 15 μm (AERONET, 2019). Medzi objemovou distribúciou a distribúciou počtu častíc $dN(r)/d \ln r$ platí vzťah:

$$\frac{dV(r)}{d \ln r} = V(r) \frac{dN(r)}{d \ln r} = \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{dN(r)}{d \ln r}. \quad (4)$$

Ďalšou získanou charakteristikou aerosólov z meraní slnečného fotometra je podiel hrubých častíc na celkovej AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm. Tu je dôležité upozorniť, že v prípade siete AERONET je hranica medzi jemnými a hrubými časticami definovaná prostredníctvom bodu minima na objemovej distribučnej krivke v oblasti polomeru častíc od 0,439 do 0,992 μm . V práci boli použité aj nasledujúce štandardné parametre mikrofyzikálnych vlastností aerosólov, ktoré boli stanovené súhrnne pre všetky veľkosti aerosólových častíc a tiež aj separátne, čisto pre hrubý mód aerosólov: objemová koncentrácia C_v [$\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$], efektívny polomer r_{eff} , medián polomerov v objeme $\ln r_v$ a štandardná odchýlka pre medián polomerov v objeme σ_v (AERONET, 2019).

$$C_v = \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r, \quad (5)$$

$$r_{eff} = \frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^3 \frac{dN(r)}{d \ln r} d \ln r}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} r^2 \frac{dN(r)}{d \ln r} d \ln r}, \quad (6)$$

$$\ln r_v = \frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} \ln r \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r}, \quad (7)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\int_{r_{min}}^{r_{max}} (\ln r - \ln r_v)^2 \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r}{\int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{dV(r)}{d \ln r} d \ln r}}. \quad (8)$$

2.3 Charakteristika skúmanej oblasti

Geografickou oblasťou výskumu tejto práce je celé územie Slovenskej republiky, ktorého južné hranice sú od okraja saharskej púšte vzdialené približne 1500 km. Táto práca sa ale zameriava prevažne na lokalitu, kde je umiestnený prístroj slnečný fotometer. Ten sa nachádza na streche budovy Aerologického a radiačného centra Slovenského hydrometeorologického ústavu v Gánovciach, pri meste Poprad. Súradnice lokality sú 49,03° s. z. š., 20,32° v. z. d. a nadmorská výška je 706 m n. m.

Obsah aerosólov v ovzduší, či už celkové množstvo alebo aj druhové zloženie determinujú na jednej strane lokálne zdroje a na strane druhej atmosférické prúdenie, ktoré dokáže určitú vzduchovú hmotu spolu s aerosólmi premiestniť aj o niekoľko tisíc kilometrov. Viackrát za rok tu môže ísť o transport saharského prachu z Afriky. V ojedinelých prípadoch tu môže ísť napríklad aj o dym z rozsiahlych požiarov. V roku 2016 a 2017 bol pomocou lidar nad Slovenskom zaznamenaný dym až z kanadských požiarov, pričom v roku 2017 bol detegovaný aj v spodnej stratosfére, teda nad tropopauzou (Hrabčák, 2016 a 2017). Pozoruhodný prípad diaľkového prenosu nastal aj v roku 2019 a tentoraz boli detegované aerosólové častice (kvapôčky kyseliny sírovej) pochádzajúce z erupcie sopky

Raikoke, ktorá sa nachádza v oblasti Kurilských ostrovov (Hrabčák, 2019).

Medzi významnejšie lokálne zdroje patria produkty spaľovania tuhého paliva v okolitých obciach a poľnohospodárstvo. Často dochádza k odvíjaniu holej suchej pôdy alebo aj rastlinných produktov vetrom, keďže lokalita je pomerne veterná. Blízkosť mesta Poprad (cca 1,5 km) s cca 50 000 obyvateľmi a rôznymi priemyselnými aktivitami tiež zohráva určitú úlohu. Na druhej strane ide o podhorskú lokalitu, pretože najvyšší vrchol Karpát, ktorým je Gerlachovský štít (2654 m n. m.), sa nachádza iba 20 km od stanice. Aj napriek blízkosti spomenutého mesta je možné oblasť vzhľadom na antropogénny vplyv vo všeobecnosti považovať za vidiecku.

3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

3.1 Výstupy BDFC

K hodnoteniu VSP nad územím Slovenska bolo prístupné dvoma spôsobmi. Prvý spôsob spočíval v analýze celkového počtu dní s VSP. Išlo o dni počas ktorých bolo zaznamenané zaťaženie prachom s hodnotou aspoň 0,1 g/m². Tento spôsob analýzy odhalil viaceré zaujímavé skutočnosti. Ako dokumentuje Obr. 1, saharský prach sa nad územím Slovenskej republiky vyskytoval v sledovanom šesťročnom období 2015–2020 rádovalo počas desiatok dní v roku. Najmenej takýchto dní bolo zaznamenaných v roku 2017. Ich počet bol 47. Naopak, najviac dní s VSP bolo zaznamenaných v nasledujúcom roku 2018, a to až 81. V ročnom priemere dosiahol počet dní s VSP nad územím SR hodnotu 64, čo predstavuje 18 % z celého roka. Inými slovami je možné konštatovať, že saharský prach sa nad územím SR vyskytuje v priemere raz za 6 dní. V prípade oblasti Poprad-Gánovce je priemerný ročný počet 42 dní, čo predstavuje 66 % z celoslovenského priemeru.

Pri pohľade na rok 2017 vidíme, že MIZSP dosiahol hodnotu nanajvýš 3, čo je najnižšia hodnota zo všetkých sledovaných rokov. Rekordným bol v tomto ohľade už vyššie zmienený rok 2018. MIZSP počas jedného dňa (16. apríla 2018) dosiahol hodnotu až 7, čo vzhľadom na Tab. 1 predstavuje celkový obsah prachu v intervale od 3,2 do 6,4 g/m². Tento konkrétny prípad je znázornený na Obr. 2, na ktorom môžeme vidieť výstup BDFC udávajúci zaťaženie prachom v g/m² pre veľkopriestorovú predpočítanú doménu. Na Obr. 1 si môžeme ďalej všimnúť, že najčastejšie je zastúpený MIZSP s hodnotou 1 až 3, pričom zo všetkých dní s VSP to predstavuje až 92 %. Zvyšných 8 % pripadá na dni v ktorých dosiahol MIZSP hodnotu 4 až 7. Priemerný počet dní za rok s MIZSP 4 a viac preto dosahuje hodnotu len 5. MIZSP 5 a viac sa vyskytuje ešte zriedkavejšie, v ročnom priemere sú takéto dni iba dva. Počet dní s MIZSP 6 a 7 dosiahol za celé sledované 6-ročné obdobie hodnotu 5, čo predstavuje priemerný výskyt menej ako raz za rok. Konkrétne išlo o tieto dni počas dvoch ucelených období: 16. a 17. júna 2016 a ešte 15., 16. a 17. apríla 2018.

Pozoruhodné zistenia vyplývajú z analýzy VSP v prípade jednotlivých mesiacov roka. Výsledky týchto zistení sumarizuje Obr. 3, na ktorom môžeme vidieť zaujímavý ročný chod počtu dní s VSP. Pravdepodobnosť objavenia

sa vzduchovej hmoty, ktorá by obsahovala saharský prach od decembra smerom k jari postupne narastá. V mesiaci apríl pozorujeme 1. ročné maximum, nasleduje menší pokles pre mesiac máj a následne sa v mesiaci jún vyskytuje 2. ročné maximum, počtom dní úplne totožné s prvým maximum. Najvyššia pravdepodobnosť VSP nad Slovenskom je v období apríl-máj-jún. Počas týchto troch mesia-

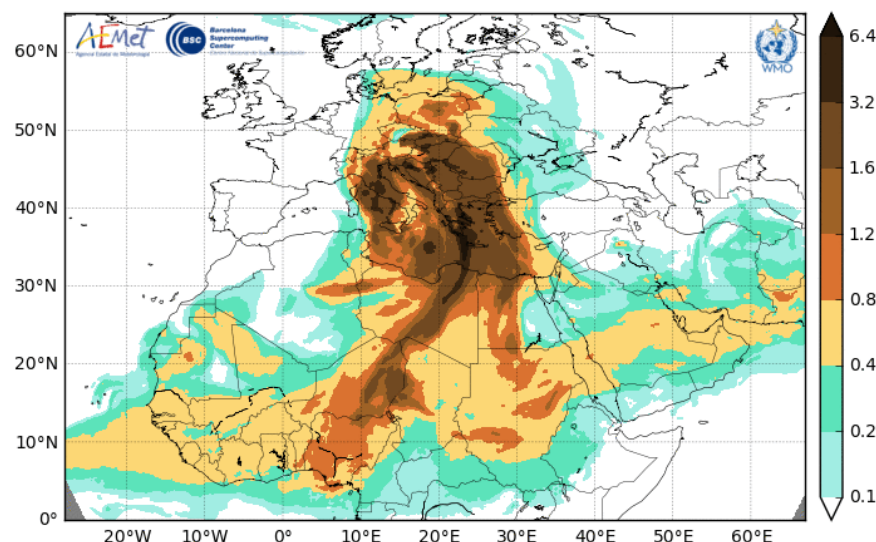
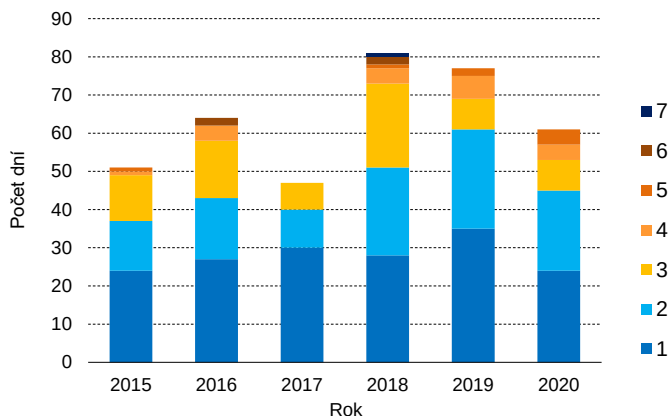
cov sa vyskytuje až 47 % dní s VSP z ich celkového počtu v rámci celého roka. V mesiacoch júl a august je pravdepodobnosť prúdenia vzduchu so saharským prachom nad územie SR evidentne nižšia ako v predchádzajúcich troch mesiacoch. Tiež aj MIZSP nedosahuje v mesiacoch júl a august až tak vysoké hodnoty, aké nadobúda v období apríl až jún.

Obrázok 1.

Počet dní s výskytom saharského prachu nad územím Slovenska v jednotlivých rokoch v období 2015 – 2020. Farebná škála reprezentuje počet dní s konkrétnym maximálnym indexom zaťaženia saharským prachom.

Figure 1.

Number of days with the occurrence of Saharan dust over the territory of Slovakia in individual years in the period 2015 – 2020. The color scale represents the number of days with a specific maximum Saharan dust load index.



Obrázok 2.

Predpovedný výstup BDFC udávajúci celkové množstvo prachu vo vertikálnom stĺpci nad daným miestom (g/m^2) dňa 16. 4. 2018, v čase 06:00 UTC. Predpoveď je z 12:00 UTC dňa 15. 4. 2018.

Figure 2.

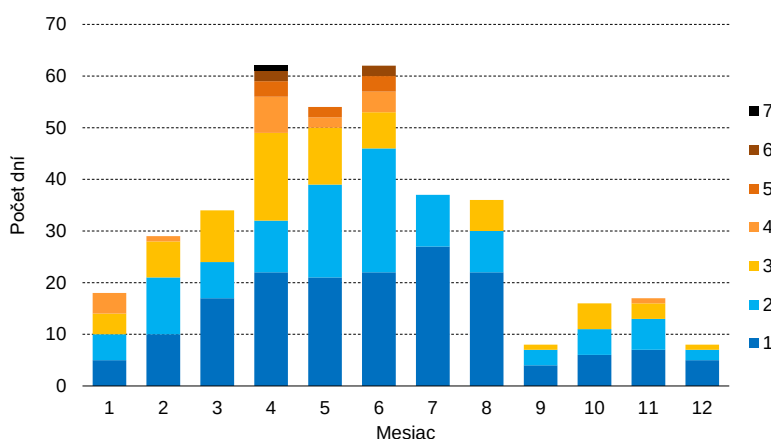
Predictive output of BDFC indicating the total amount of dust in the vertical column above the location (g/m^2) for the 16th of April 2018, at 06:00 UTC. The forecast is from 12:00 UTC, 15th of April 2018.

Obrázok 3.

Počet dní s výskytom saharského prachu nad územím Slovenska v jednotlivých mesiacoch v období 2015 – 2020. Farebná škála reprezentuje počet dní s konkrétnym maximálnym indexom zaťaženia saharským prachom.

Figure 3.

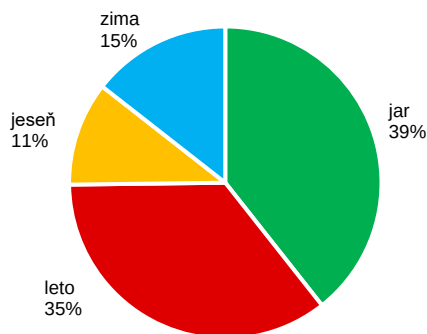
Number of days with the occurrence of Saharan dust over the territory of Slovakia in individual months in the period 2015 – 2020. The color scale represents the number of days with a specific maximum Saharan dust load index.



Zvyšné mesiace roka, teda obdobie od septembra do decembra je obdobím s najmenšou pravdepodobnosťou VSP nad Slovenskom. September a december sú charakteristické najnižším počtom dní s VSP spomedzi všetkých mesiacov roka. Pri pohľade na Obr. 4 získame dobrý prehľad o situácii s VSP v priebehu jednotlivých ročných období. Vidíme, že jednoznačne sú v popredí jar (39 %) a leto (35 %). Naopak výrazne nižšie zastúpenie dní s VSP nachádzame počas zimy (15 %) a jesene (11 %). Tieto výsledky veľmi dobre korešpondujú so zisteniami prezentovanými v práci Varga (2020), ktorá v analyzovanom 40-ročnom období 1979–2018 zistila veľmi podobné relatívne zastúpenie prípadov VSP pre oblasť Panónskej panvy: jar (40 %), leto (32 %), jeseň (14 %) a zima (14 %).

Obrázok 4. Relatívne zastúpenie dní s výskytom saharského prachu nad územím Slovenska v jednotlivých ročných obdobiach v období 2015 – 2020.

Figure 4. Relative representation of days with the occurrence of Saharan dust over the territory of Slovakia in individual seasons in the period 2015 – 2020.



Príčiny prezentovaného ročného chodu je možné hľadať na jednej strane vo veľkopriestorových cirkulačných pomeroch v jednotlivých častiach roka a na strane druhej v dostatočne turbulentných podmienkach v oblasti saharskej púšte. Je evidentné, že tieto podmienky sú najlepšie splnené v trojmesačnom období od apríla do júna. Kľúčovú úlohu v tomto období pravdepodobne zohrávajú vpády studeného polárneho morského vzduchu nad saharskú púšť. Studený vzduch sa nad Saharu dostáva väčšinou v severozápadnom prízemnom prúde po prechode studeného frontu. Niekedy môže byť takýchto vpádov studeného vzduchu aj viacero v krátkom čase po sebe.

Napr. v roku 2016 sa v priebehu niekoľkých dní vyskytlo až 5 studených frontov za sebou, ktoré ovplyvnili severozápadnú časť Afriky (Hrabčák, 2016). Studený front je spravidla viazaný na rozsiahlu výškovú brázdnu, na prednej strane ktorej dochádza k teplej advekcií tropického vzduchu smerom na severovýchod do Európy. Tento vzduch môže v závislosti od predchádzajúcich turbulentných podmienok obsahovať prislúchajúce množstvo saharského prachu. Niekedy dochádza aj k osamostatneniu výškovej tlakovej níše v oblasti severnej Afriky, čo má výrazne pozitívny efekt na vyzdvihnutie veľkého množstva

prachu zo saharskej púšte. Poloha a dynamika výškovej brázdny resp. tlakovej níše má rozhodujúci vplyv na to, ktorá časť Európy je prachom najviac zasiahnutá, ako dlho je ním zasiahnutá a v akom množstve. Opakovanie resp. obnovovanie výškovej brázdny môže spôsobiť aj dlhobejší transport saharského prachu do Európy.

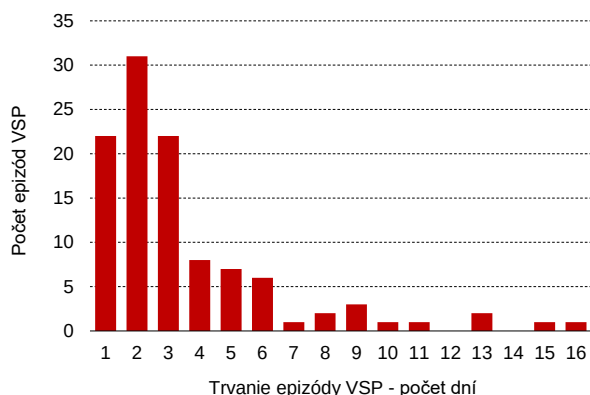
Druhý spôsob hodnotenia VSP ukázal v tomto smere pre prípad Slovenska zaujímavé skutočnosti. Tento spôsob spočíval v analýze tzv. epizód s VSP. Pod epizódou je myslený jeden až viacdňový VSP, pričom pri viacdňovom VSP musel byť prach v ovzduší v každom jednom dni skúmanej série. Série ale nebola podmienená kontinuálnym VSP, to znamená, že mohlo dôjsť k niekoľkohodinovému prerušeniu VSP. Najviac epizód s VSP v období rokov 2015–2020 v prípade celého územia SR sa pozorovalo v roku 2019 a to v počte 23. S počtom 15 ich bolo najmenej v roku 2015. Zaujímavé je, že pri hodnotení z pohľadu celkového počtu dní s VSP pripadá maximum na rok 2018 a minimum na rok 2017, teda ide tu o úplne rozdielnu dvojicu rokov ako pri hodnotení z pohľadu epizód. V ročnom priemere nadobúda počet epizód s VSP hodnotu 18.

Ak porovnáme toto číslo so zisteniami uvedenými v práci Varga (2020), tak vidíme značný rozdiel. Napr. v desaťročnom období 2009–2018 práca uvádza výskyt najväčšieho počtu prípadov VSP zo všetkých analyzovaných desaťročí (1979–2018) a to 90, čo v prepočte predstavuje 9 prípadov ročne. VSP je v tomto prípade zacielený na pomerne rozsiahlu oblasť Panónskej panvy, avšak práca používa rozdielnu metodiku, ktorá spočíva v systematickej analýze satelitných meraní. Táto metodika je podľa všetkého menej citlivá na VSP v porovnaní s údajmi z numerického modelu, ktorý bol použitý v našom prípade. Pri údajoch z modelu bolo kritérium pre VSP stanovené prostredníctvom zaťaženia prachom, ktoré muselo nadobnúť hodnotou aspoň $0,1 \text{ g/m}^2$. Ak by ale bola prahová hodnota vyššia, tak to by následne viedlo k nižšiemu počtu identifikovaných dní a epizód s VSP. Pri nižšej prahovej hodnote by to bolo naopak.

Všetkých 381 dní s VSP je možné súhrnne zaeliť do 108 epizód s VSP. Trvanie jednej epizódy je teda v priemere 3,5 dní. Na Obr. 5 si je možné všimnúť početnosť epizód VSP nad územím Slovenska pre jednotlivé dĺžky trvania (počty dní) v období 2015–2020. Vidíme, že trvanie epizódy je najčastejšie dvojdnové, čo je o niečo menej ako vyššie spomínaný priemer. Pozoruhodné sú ale najmä epizódy, ktorých trvanie je 10 a viac dní. Takýchto prípadov sa počas skúmaného 6-ročného obdobia vyskytlo 6, čo približne vychádza na opakovanie danej situácie raz za rok. Ešte pozoruhodnejšie sú však epizódy s kontinuálnym trvaním 15 a viac dní. Zaznamenala sa dvojica takýchto epizód. Prvá z nich sa odohrala od 31. 3. do 14. 4. 2016. Trvala 15 dní a MIZSP dosiahol v priebehu tejto epizódy úroveň 4. Extrémna epizóda z pohľadu dĺžky trvania bola pozorovaná od 3. do 18. apríla 2018. Jej trvanie bolo 16 dní a MIZSP dosiahol dňa 16. apríla svoje maximum s hodnotou 7, čo je taktiež extrémna hodnota, ktorá sa vyskytla iba jedenkrát. Danú situáciu môžeme vidieť na Obr. 2.

Obrázok 5. Početnosť epizód výskytu saharského prachu (VSP) nad územím Slovenska pre jednotlivé dĺžky trvania (počty dní) v období 2015–2020.

Figure 5. The number of episodes of Saharan dust occurrence over the territory of Slovakia for individual durations (number of days) in the period 2015–2020.

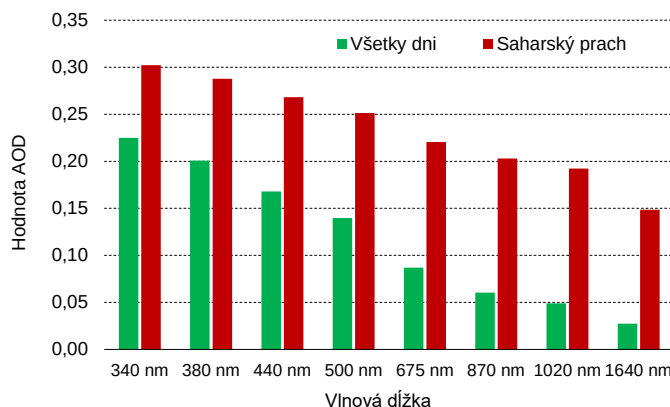


3.2 Výstupy zo slnečného fotometra Cimel

Pomocou meraní slnečného fotometra Cimel bol stanovený dlhodobý priemer hodnôt AOD pre týchto 8 vlnových dĺžok: 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 a 1640 nm. Výsledky sú znázornené na Obr. 6, pričom sú rozdelené do dvoch kategórií. V kategórii *Všetky dni* bol dlhodobý priemer vypočítaný zo všetkých denných priemerov danej charakteristiky. Celkový počet dní v skúmanom šesťročnom období 2015–2020, pre ktoré bol k dispozícii denný priemer AOD je 1108. Táto hodnota predstavuje 51 % zo všetkých kalendárnych dní v sledovanom období. Polovičné zastúpenie má dve príčiny. Prvá z nich je meteorologická, presnejšie povedané ide o vplyv oblačnosti, ktorá v niektorých dňoch úplne znemožňuje vykonať meranie priameho slnečného žiarenia. Druhou príčinou je fakt, že prístroj každoročne podstupuje zahraničnú kalibráciu a počas nej je jeho prevádzka na stanici prerušená na 2–3 mesiace, väčšinou v zimnom období.

Obrázok 6. Priemerné hodnoty optickej hrúbky aerosólov (AOD) pre jednotlivé vlnové dĺžky v prípade kategórií *Všetky dni* a *Saharský prach* v období 2015–2020.

Figure 6. Average values of the aerosol optical depth (AOD) for individual wavelengths in the case of All the days and Saharan dust categories in the period 2015–2020.



Vďaka výstupom BDFC bola k dispozícii informácia o tom, počas ktorých dní bol zaznamenaný VSP v oblasti Poprad-Gánovce. Tieto dni boli spárované s meraniami slnečného fotometra Cimel. Celkový počet spárovaných dní v skúmanom šesťročnom období bol 100, čo predstavuje iba 40 % zo všetkých dní s možným VSP podľa výstupov BDFC. Okrem absencie prístroja je tento nižší počet zapríčinený aj absenciou meraní priameho slnečného žiarenia z dôvodu oblačnosti. Pri skúmaní charakteristík saharského prachu je ale práve uvedená selekcia nepostačujúca, pretože počas dní s VSP nemusí byť saharský prach celý čas prítomný v ovzduší alebo môže tam byť prítomný iba v malých množstvách.

Ak sa teda chceme zamerať na optické a mikrofyzikálne vlastnosti saharského prachu, tak potrebujeme vylúčiť merania, kde je saharský prach nedominantnou zložkou aerosólového mixu, inak by mohli byť jeho charakteristiky výrazne skreslené. Keďže veľkosť Ångströmovho exponentu je zvyčajne nepriamo úmerná veľkosti aerosólových častíc (O'Neill, 1993), tak vďaka tejto jeho vlastnosti nám uvedená podmienka zabezpečí, aby sa do výpočtu nedostali merania, v čase ktorých prevládali v atmosfére skôr častice menších rozmerov, nekorešpondujúce so saharským prachom. V kategórii *Saharský prach* bol preto dlhodobý priemer hodnôt danej charakteristiky vypočítaný zo všetkých individuálnych meraní spĺňajúcich počas dní s VSP podmienku, že Ångströmov exponent pre pár vlnových dĺžok 440–870 nm je $<0,65$. Zvolená prahová hodnota vychádza zo štúdie Patel et al. (2016), v ktorej sa nachádza klasifikácia jednotlivých druhov aerosólov, pričom jedným z použitých parametrov tejto klasifikácie je aj Ångströmov exponent. Celkový počet dní v skúmanom šesťročnom období, počas ktorých boli splnené obe uvedené podmienky je len 21, čo predstavuje 21 % z dní, ktoré splnili 1. podmienku a iba 8 % zo všetkých dní s možným VSP podľa výstupov BDFC.

Z výsledkov prezentovaných na Obr. 6 je zrejmé, že pre všetky 8 vlnových dĺžok sú vyššie hodnoty AOD dosahované v prípade kategórie *Saharský prach*. Ďalej si je možné všimnúť, že v oboch kategóriách veľkosť AOD s rastúcou vlnovou dĺžkou klesá. V prípade kategórie *Všetky dni* AOD klesá z hodnoty 0,225 pre vlnovú dĺžku 340 nm na hodnotu 0,027 pre vlnovú dĺžku 1640 nm, pričom tento pokles činí 0,198. V prípade kategórie *Saharský prach* AOD klesá z hodnoty 0,302 pre vlnovú dĺžku 340 nm na hodnotu 0,148 pre vlnovú dĺžku 1640 nm, pričom tento pokles činí 0,154. Vidíme teda, že pokles je markantnejší v prvej kategórii. Príčinou menšieho poklesu AOD v prípade kategórie *Saharský prach* je väčší rozmer aerosólových častíc. Za pozornosť tiež stojí aj fakt, že pomer hodnôt AOD medzi druhou a prvou kategóriou postupne smerom k väčším vlnovým dĺžkam narastá. Pre najmenšiu vlnovú dĺžku 340 nm je spomínaný pomer rovný 1,3 a pre najväčšiu vlnovú dĺžku 1640 nm je to až 5,4.

Tabuľka 2. Priemerné hodnoty vybraných optických a mikrofyzikálnych charakteristík aerosólov v období 2015–2020 (od štvrtého stĺpca 2016–2020), pre kategórie Všetky dni, VSP dni a Saharský prach. Menovite zľava: optická hrúbka aerosólov (AOD), Ångströmov exponent (AE), podiel hrubých častíc na celkovej AOD (CMF), albedo jednoduchého rozptylu (SSA). Ďalej boli pre všetky veľkosti aerosólov (T) a separátne pre hrubý mód aerosólov (C) stanovené tieto charakteristiky: objemová koncentrácia (VolC), efektívny polomer (REff), medián polomerov v objeme (VMR), štandardná odchýlka pre medián polomerov v objeme (Std).

Table 2. Average values of selected optical and microphysical characteristics of aerosols in the period 2015–2020 (from the fourth column 2016–2020), for categories All the days, VSP days and Saharan dust. Namely from the left: aerosol optical depth (AOD), Ångström exponent (AE), coarse mode fraction at a total AOD (CMF), single scattering albedo (SSA). Furthermore, the following characteristics were determined for the all aerosol sizes (T) and separately for coarse aerosol mode (C): volume concentration (VolC), effective radius (REff), volume median radius (VMR), standard deviation from volume median radius (Std).

	AOD 500 nm	AE 440–870 nm	CMF 500 nm	SSA 440 nm	VolC T $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	VolC C $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$	REff T μm	REff C μm	VMR T μm	VMR C μm	Std T μm	Std C μm
Všetky dni	0,138	1,53	0,18	0,961	0,04	0,02	0,288	2,28	0,682	2,863	1,433	0,671
VSP dni	0,196	1,25	0,32	0,951	0,096	0,067	0,38	1,903	0,919	2,392	1,358	0,668
Saharský prach	0,251	0,44	0,67	0,936	0,153	0,125	0,507	1,548	1,2	1,89	1,158	0,621

Sumárny prehľad vybraných optických a mikrofyzikálnych charakteristík aerosólov nám poskytuje Tab. 2. Dané charakteristiky boli v tomto prípade rozdelené do troch kategórií. Okrem už vyššie spomínaných dvoch kategórií pribudla v Tab. 2 ešte jedna s názvom VSP dni, ktorá zahŕňa dlhodobé priemery vypočítané z denných priemerov danej charakteristiky počas dní s VSP. V prípade tejto kategórie ide v podstate o medzistupeň medzi kategóriami Všetky dni a Saharský prach. Prvé tri charakteristiky uvedené v Tab. 2 boli stanovené pre zaužívané obdobie v tejto práci, teda pre roky 2015–2020, avšak nasledujúce charakteristiky boli dostupné pre kratšie obdobie rokov 2016–2020.

Pri pohľade na hodnoty prvej charakteristiky uvedenej v Tab. 2, teda na hodnoty AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm, vidíme význam zavedenia filtrácie údajov pomocou hodnôt Ångströmovho exponentu. Hodnota 0,196 pre kategóriu VSP dni sa nachádza približne v polovici medzi hodnotami 0,138 a 0,251, ktoré prislúchajú kategóriám Všetky dni a Saharský prach. Okamžitá úroveň AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm v prípade kategórie Saharský prach dosiahla svoje absolútne maximum 0,73 dňa 7. 4. 2016 v čase 5:55 UTC. V priebehu 21 dní, počas ktorých boli namerané údaje pre kategóriu Saharský prach dosiahol MIZSP v prípade územia Slovenska priemernú hodnotu 2,95. Za zmienku stojí aj fakt, že počas všetkých spomínaných dní bol MIZSP najnižšie na úrovni rovnajúcej sa 2, čo opäť podčiarkuje význam použitia selekcie údajov pomocou Ångströmovho exponentu.

Druhou optickou vlastnosťou, nachádzajúcou sa v Tab. 2, je už viackrát spomínaný Ångströmov exponent (AE) pre pár vlnových dĺžok 440–870 nm. Keďže táto optická vlastnosť úzko súvisí s tretím parametrom, ktorým je podiel hrubých častíc (coarse mode fraction - CMF) na celkovej AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm, tak z tohto dôvodu budú tieto charakteristiky hodnotené spoločne. Veľkosť Ångströmovho exponentu v kategórii Všetky dni nadobúda hodnotu 1,53 a tá veľmi dobre korešponduje s podielom hrubých častíc na celkovej AOD, ktorý je 18 %. Medzi týmito dvoma parametrami v podstate platí nepriama úmera. Z práve uvedených hodnôt je zrejmé, že v lokalite Poprad-Gánovce má na veľkosť AOD počas

bežných dní významne dominantný vplyv mód jemných aerosólových častíc.

Hodnoty AOD v UV oblasti spektra získané z meraní Brewerovho ozónového spektrofotometra prezentované v práci Hrabčák (2019) ukázali, že v dlhodobom mesačnom priemere sú ich najnižšie hodnoty zaznamenávané v zimných mesiacoch január a december. Preto je možné predpokladať, že hore uvedený dlhodobý priemer celkovej AOD v kategórii Všetky dni pre vlnovú dĺžku 500 nm by bol pri zarataní absentujúcich meraní (väčšinou v zimnom období) v skutočnosti o niečo nižší. Taktiež aj dlhodobý priemer v kategórii Všetky dni pre frakciu hrubých častíc by bol pravdepodobne trochu menší, keďže ako už bolo ukázané na Obr. 4, zima je obdobím s menej častým VSP.

Ďalej si môžeme všimnúť, že aj v kategórii VSP dni pozorujeme stále dosť vysokú hodnotu Ångströmovho exponentu rovnajúcu sa 1,25 a opäť dominanciu módu jemných častíc, pretože podiel hrubých častíc dosahuje len 32 %. Z práve uvedeného vyplýva, že počas dní s VSP v dlhodobom priemere nemá saharský prach dominantný podiel na celkovej AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm. Opačná situácia bola zistená v prípade kategórie Saharský prach, kedy sa podiel hrubých častíc rovná 67 % a je možné konštatovať, že saharský prach je dominantným druhom aerosólových častíc. Tomu zodpovedá aj veľkosť Ångströmovho exponentu, ktorý má hodnotu len 0,44.

Štvrtou charakteristikou v Tab. 2 je albedo jednoduchého rozptylu (single scattering albedo - SSA) pre vlnovú dĺžku 440 nm. Dní, pre ktoré bol k dispozícii jej denný priemer, bolo v období 2016–2020 len 21. Dôvodom takto nízkeho počtu dní je skutočnosť, že hodnoty tejto optickej vlastnosti aerosólov sú v rámci siete AERONET pre level 2.0 dostupné len vtedy, keď je AOD pre vlnovú dĺžku 440 nm väčšia ako 0,4 a zenitový uhol Slnka je počas merania väčší ako 50°, čo je v našej oblasti málokedy splniteľné. Viac ako polovica spomínaných dní, konkrétne 12, ktoré splnili uvedené prísne podmienky, pripadlo práve pre kategóriu VSP dni a len 9 individuálnych meraní v rámci piatich dní bolo obsiahnutých v kategórii Saharský prach. Pri pohľade na výsledky vidíme veľmi podobné, avšak postupne klesajúce hodnoty smerom od prvej ku tretej kategórii. Tento pokles je v súlade s tým, čo je pre

VSP uvedené v práci Raptis et al. (2020), ktorá sa venovala optickým vlastnostiam aerosólov v oblasti Atén. Je tiež známe, že prachové aerosóly, najmä tie, ktoré obsahujú hematit, absorbujú viac pri menších vlnových dĺžkach (Schuster et al., 2016).

Zostávajúce charakteristiky v Tab. 2 zaraďujeme medzi mikrofyzikálne vlastnosti aerosólov. Boli stanovené v dvoch prípadoch, t. j. pre všetky veľkosti aerosólov a separátne pre hrubý mód aerosólov. Prvou z nich je objemová koncentrácia (volume concentration - VolC). Jej hodnoty sú podľa očakávania v oboch prípadoch najnižšie pre kategóriu *Všetky dni* a naopak najvyššie pre kategóriu *Saharský prach*. Rozdiel medzi týmito kategóriami je v prípade všetkých veľkostí aerosólov približne 3,8-násobný, avšak v prípade hrubého módu aerosólov je až cca 6,3-násobný. Ďalej si môžeme všimnúť, že podiel hrubého módu aerosólov na objemovej koncentrácii rastie z hodnoty 50 % pre kategóriu *Všetky dni* na hodnotu 70 % pre kategóriu *VSP dni* a až na hodnotu 82 % pre kategóriu *Saharský prach*.

Uvedené percentuálne podiely sú v porovnaní s podielom hrubých častíc na celkovej AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm vo všetkých troch kategóriách vyššie. Vidíme teda, že hrubé častice majú vo všeobecnosti menší vplyv na hodnotu spomínanej AOD, než by sa mohlo očakávať vzhľadom na ich percentuálny podiel na objemovej koncentrácii. Nie je to prekvapujúce, pretože zo základov optiky aerosólov je všeobecne známe, že pri rovnakom objeme a rovnakej bezrozmernej účinnosti útľmu má početnejšia skupina sférických častíc s menším polomerom väčší koeficient útľmu než menej početná skupina sférických častíc s väčším polomerom.

Objemová koncentrácia hrubého módu aerosólov v prípade kategórie *Saharský prach* dosahuje $0,125 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ alebo pre lepšiu predstavu to môžeme vyjadriť ako $0,125 \text{ m}^3/\text{km}^2$, či cm^3/m^2 . Za predpokladu, že všetok aerosól v hrubom móde je saharský prach, tak dostávame reálny obraz o jeho obsahu v ovzduší. Pomocou znalosti hustoty saharského prachu, ktorá je okolo $2,6 \text{ g}/\text{cm}^3$ (Rocha-Lima et al., 2018) je možné vypočítať aj zaťaženie prachom, ktoré udáva celkové množstvo prachu vo vertikálnom stĺpci nad daným miestom (g/m^2), čo je parameter, ktorý je jedným z predpovedných výstupov BDFC. V prípade vyššie uvedených vstupných parametrov dostávame výsledok $0,325 \text{ g}/\text{m}^2$, ktorému v Tab. 1 prislúcha index zaťaženia saharským prachom s hodnotou 2.

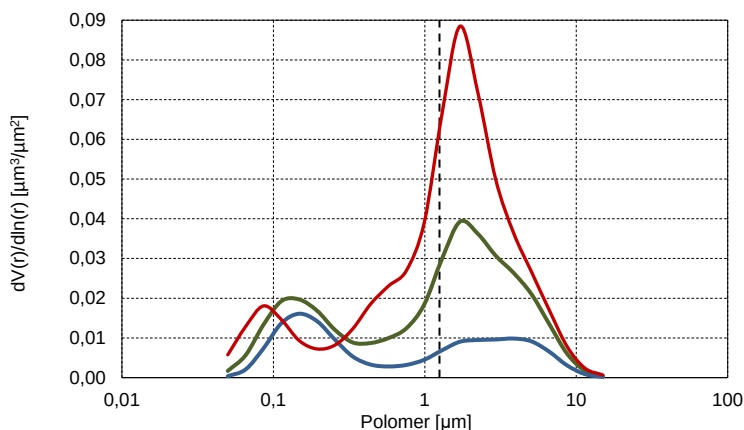
Je pozoruhodné, že absolútne okamžité maximum objemovej koncentrácie pre všetky veľkosti aerosólov, a tiež aj pre hrubý mód aerosólov, bolo v prípade kategórie *Saharský prach*, no rovnako aj v kategórii *Všetky dni*, teda v prípade úplne všetkých dostupných meraní zaznamenané dňa 4.4.2016 v čase 15:11 UTC. Tento

absolútny extrém objemovej koncentrácie v podstate prisudzuje saharskému prachu prvú priečku v rámci všetkých druhov aerosólov, ktoré sa v období dostupných meraní vyskytli nad skúmanou lokalitou. Pre všetky veľkosti aerosólov dosiahla objemová koncentrácia úroveň $0,441 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ a pre ich hrubý mód to bolo $0,402 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, čo predstavuje až 91 % z prvej menovanej hodnoty. Pri prepočte na zaťaženie prachom získame výsledok cca $1 \text{ g}/\text{m}^2$, čomu zodpovedá index zaťaženia s hodnotou 4. Za predpokladu, že všetok aerosól v hrubom móde je saharský prach, tak získavame cennú informáciu o jeho obsahu v ovzduší nad stanicou Poprad-Gánovce. V spomínaný deň dosiahol MIZSP na základe výstupov BDFC v prípade celého územia Slovenska úroveň 4, čo je výborná zhoda s prevedeným výpočtom na základe údajov zo slnečného fotometra.

Detailné informácie o veľkosti aerosólových častíc v ovzduší nám, okrem zostávajúcich mikrofyzikálnych vlastností aerosólov v Tab. 2, prináša aj Obr. 7, na ktorom sa nachádza porovnanie ich priemernej objemovej distribúcie pre zaužívanú trojicu kategórií, t. j. *Všetky dni*, *VSP dni* a *Saharský prach*. Výsledky ukazujú, že v skúmanej oblasti sa v dlhodobom priemere pre všetky tri kategórie pozoruje bimodálne, teda dvojvrcholové rozdelenie aerosólových častíc. V prípade kategórie *Všetky dni* má distribučná krivka svoje globálne maximum v oblasti jemnej frakcie aerosólových častíc. Dané maximum pripadá pre častice s polomerom približne $0,15 \mu\text{m}$. Pre túto kategóriu nadobúda lokálny vrchol distribučnej krivky v oblasti módu hrubých častíc tvar platô s maximom na úrovni zhruba $3,86 \mu\text{m}$.

Obrázok 7. Priemerná objemová distribúcia aerosólov získaná z meraní slnečného fotometra Cimel, v období 2016–2020. Tmavo modrý graf predstavuje hodnoty pre kategóriu *Všetky dni*, tmavo zelený graf reprezentuje hodnoty pre kategóriu *VSP dni* a tmavo červený graf predstavuje hodnoty pre kategóriu *Saharský prach*. Zvislá prerušovaná čiara reprezentuje polomer častíc s hodnotou $1,25 \mu\text{m}$, t. j. $2,5 \mu\text{m}$ pre ich priemer (hranica $\text{PM}_{2,5}$).

Figure 7. The average volume distribution of aerosols obtained from the measurements of the Cimel Sun Photometer, in the period 2016–2020. The dark blue graph represents the values for the All the days category, the dark green graph represents the values for the VSP days category, and the dark red graph represents the values for the Sahara dust category. The vertical dashed line represents the radius of the particles with a value of $1.25 \mu\text{m}$, i. e. $2.5 \mu\text{m}$ for their diameter ($\text{PM}_{2,5}$ limit).



V prípade kategórie VSP dni je situácia značne odlišná, globálne maximum distribučnej krivky sa už pozoruje v rámci módu hrubých častíc a zodpovedá časticiam s polomerom cca 1,71 μm . Lokálne maximum sa v prípade tejto kategórie vyskytuje presne tam, kde sa nachádza aj v kategórii Všetky dni. Distribučná krivka pre kategóriu Saharský prach na Obr. 7 dosahuje najvyššiu hodnotu spomedzi trojice hodnotených kategórií, a to vďaka svojmu výraznému globálnemu maximu, ktoré sa rovnako ako pri kategórii VSP dni vyskytuje v hrubom móde a prináleží časticiam s polomerom cca 1,71 μm . Za povšimnutie stojí aj fakt, že lokálne maximum v jemnom móde je v porovnaní s predchádzajúcimi dvoma kategóriami posunuté viac doľava a pozoruje sa pre menšie častice s polomerom zhruba 0,09 μm .

Viacročné merania na afrických staniciach Capo Verde a Dakar pomocou slnečného fotometra Cimel ukazujú, že pre všetky mesiace roka nadobúda distribučná krivka svoj vrchol na hodnote 2,24 μm (Euphrasie-Clotilde et al., 2021). Táto hodnota, ktorá charakterizuje domovskú oblasť saharského prachu je o niečo vyššia ako hodnota 1,71 μm , ktorá charakterizuje oblasť Poprad-Gánovce v prípade kategórie Saharský prach. Pri transporte aerosólov z Afriky nad územie Slovenska dochádza postupom času z dôvodu suchej depozície (gravitačnej sedimentácie) k znižovaniu zastúpenia väčších častíc. To nám vysvetľuje, prečo nad Slovenskom pripadá maximum distribučnej krivky pre menšie častice. Pomocou suchej depozície sa dá vysvetliť aj to, prečo je v kategórii Všetky dni lokálne maximum až na úrovni častíc s polomerom cca 3,86 μm . V stručnosti povedané je to preto, že tu ide o lokálny aerosól, t. j. napr. prach z ciest a polí a tiež peľ.

S tvarom distribučných kriviek na Obr. 7 úzko súvisia ešte nekomentované mikrofyzikálne vlastnosti aerosólov, ktorými sú efektívny polomer (effective radius - REff), medián polomerov v objeme (volume median radius - VMR) a jeho štandardná odchýlka. Hodnoty efektívneho polomeru v prípade všetkých veľkostí aerosólov sú podľa očakávania najnižšie pre kategóriu Všetky dni a naopak, najvyššie pre kategóriu Saharský prach. To isté platí aj pre medián polomerov v objeme. Presne opačné poradie u oboch charakteristík ale nachádzame pre hrubý mód aerosólov. Je preto možné konštatovať, že pre saharský prach je typický menší rozmer aerosólových častíc, než aké sa obvykle nachádzajú v skúmanej lokalite pre hrubý mód aerosólov. Zo získaných výsledkov vyplýva, že prach zo Sahary v prípade jeho výskytu nad skúmanou lokalitou charakterizuje efektívny polomer s hodnotou cca 1,5 μm a medián polomerov v objeme s jeho štandardnou odchýlkou na úrovni približne $1,9 \pm 0,6 \mu\text{m}$.

Publikované výsledky z in situ analýzy častíc, ktoré sa na zemský povrch dostali prostredníctvom depozície (prevažne mokrej) ukazujú, že v rámci európskeho priestoru sa polomer častíc saharského prachu vyskytuje prevažne v rozsahu od 1 do 15 μm (Varga, 2020). Prezentované výsledky pre stanicu Poprad-Gánovce z meraní slnečného fotometra sa nachádzajú prevažne v oblasti uvedeného intervalu. Ďalej vidíme, že spodný okraj uvedeného intervalu pre polomer častíc 1 μm , t. j. 2 μm pre ich priemer sa už nachádza v oblasti častíc PM_{2,5} (tzv.

respirabilné častice). Pri porovnaní krivky objemovej distribúcie aerosólov na Obr. 7 v prípade kategórie Všetky dni s krivkou pre kategóriu Saharský prach je zrejme, že vplyvom prachu zo Sahary dochádza aj k zvyšovaniu obsahu častíc, ktoré už zaraďujeme medzi častice PM_{2,5}. Distribučné krivky sú vytvorené na základe 22 vopred preddefinovaných diskretných bodov. V prvom preddefinovanom bode objemovej distribúcie v oblasti PM_{2,5}, t. j. pre častice s priemerom cca 2 μm dosahuje kategória Saharský prach až 8,7 násobne vyššiu úroveň ako kategória Všetky dni. Pre častice s priemerom cca 0,9 μm je uvedený pomer ešte stále vysoký a nadobúda hodnotu 5,6.

4 ZÁVER

Táto práca bola zameraná na saharský prach epizodicky sa vyskytujúci v ovzduší Slovenskej republiky. Údaje použité pri výskumných analýzach pochádzali z dvoch hlavných zdrojov. Prvým z nich boli modelové výstupy z Barcelonského centra predpovede prachu. Z palety viacerých produktov bolo v tejto práci použité zaťaženie prachom, ktoré udáva celkové množstvo prachu vo vertikálnom stĺpci nad daným miestom (g/m^2). Pomocou tohto produktu boli identifikované dni s výskytom saharského prachu nad územím Slovenskej republiky. Samostatne boli takéto dni kvantifikované pre oblasť Poprad-Gánovce. V prípade územia SR bol ku všetkým dňom s VSP priradený aj maximálny index zaťaženia saharským prachom. Druhým zdrojom údajov pre výskum boli merania slnečného fotometra Cimel na stanici Poprad-Gánovce, ktorého výstupy ponúkajú širokú paletu optických a mikrofyzikálnych vlastností aerosólov. Z oboch menovaných zdrojov boli použité informácie pre 6-ročné obdobie, ktoré začína 1. januárom 2015 a končí 31. decembrom 2020.

Prvá časť práce je venovaná analýze výstupov z BDFC. Bolo zistené, že v ročnom priemere dosiahol počet dní s VSP nad územím SR hodnotu 64, čo predstavuje 18 % z celého roka. V prípade oblasti Poprad-Gánovce bol priemerný ročný počet nižší a dosiahol 42 dní. Najvyššia pravdepodobnosť VSP nad Slovenskom bola v období apríl-máj-jún. Počas týchto troch mesiacov sa vyskytlo až 47 % dní s VSP z ich celkového počtu v rámci celého roka. V rovnakom období dosiahol aj MIZSP tak vysokých hodnôt, aké sa v iných mesiacoch roka vôbec nevyskytli. Dvojica jar (39 %) a leto (35 %) mala v prípade ročných období jednoznačne najvyššie zastúpenie dní s VSP, naopak výrazne nižšie zastúpenie dní s VSP bolo nájdené počas zimy (15 %) a jesene (11 %).

Hodnotenie VSP prostredníctvom tzv. epizód ukázalo, že ich priemerný ročný počet je v prípade SR 18 a jedna epizóda trvá v priemere 3,5 dňa. Najčastejšie mali epizódy dvojdnovú dĺžku. Extrémna epizóda z pohľadu dĺžky trvania bola pozorovaná od 3. do 18. apríla 2018. Jej trvanie bolo 16 dní a MIZSP dosiahol dňa 16. apríla svoje absolútne šesťročné maximum, ktorému prislúcha celkový obsah prachu v intervale od 3,2 do 6,4 g/m^2 .

Vo svojej druhej, ťažiskovej časti sa táto práca postupne venovala viacerým optickým a mikrofyzikálnym vlastnostiam aerosólov. Hlavným cieľom tejto časti bolo zameranie sa na charakteristiky saharského prachu, a to

prostredníctvom špeciálne vyselektovaných údajov. Táto kategória údajov dostala názov *Saharský prach*. Dôležitú úlohu zohralo aj porovnanie s priemerným stavom aerosólov v ovzduší nad skúmanou lokalitou v kategórii *Všetky dni*, resp. porovnanie s medzistupňom medzi nimi, ktorý prináležal kategórii s názvom *VSP dni*. Menšou nevýhodou bolo to, že prístroj slnečný fotometer, pomocou ktorého boli charakteristiky aerosólov stanovené, nie je na danej stanici v kontinuálnej prevádzke kvôli svojej dlhšie trvajúcej zahraničnej kalibrácii. Tento problém by sa mohol v budúcnosti vyriešiť jedine záložným zariadením. Ďalej je dôležité podotknúť, že dištančný spôsob získavania informácií o aerosóloch pomocou slnečného fotometra je cenný z dvoch dôvodov. Po prvé preto, že všetky charakteristiky určuje iba na základe meraní priameho a difúzneho slnečného žiarenia a po druhé preto, že získané informácie sú integrálneho charakteru, teda zahŕňujú celú atmosféru nad miestom merania.

V práci boli postupne vyhodnotené jednotlivé charakteristiky aerosólov. Najskôr optická hrúbka aerosólov pre 8 vlnových dĺžok, od ultrafialovej po infračervenú časť slnečného spektra, t. j. pre 340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 a 1640 nm. V prípade kategórie *Saharský prach* AOD pre jednotlivé vlnové dĺžky postupne klesá z hodnoty 0,302 pre vlnovú dĺžku 340 nm na hodnotu 0,148 pre vlnovú dĺžku 1640 nm. Pre vlnovú dĺžku 500 nm dosiahla AOD v kategórii *Všetky dni* hodnotu 0,138 a v kategórii *Saharský prach* to bolo až 0,251. Ďalšou stanovenou optickou vlastnosťou bol Ångströmov exponent pre 440–870 nm. V kategórii *Všetky dni* dosiahol úroveň 1,53, v kategórii *VSP dni* bol stále relatívne vysoký s hodnotou na úrovni 1,25 a v kategórii *Saharský prach* bol rovný už len 0,44. Podiel hrubých častíc na celkovej AOD pre vlnovú dĺžku 500 nm korešponduje s veľkosťou Ångströmovho exponentu a v kategóriách *Všetky dni* a *Saharský prach* boli jeho hodnoty 0,18 a 0,67. Nasledovalo albedo jednoduchého rozptylu pre vlnovú dĺžku 440 nm, ktorého hodnoty vo vyššie spomínaných dvoch kategóriách boli 0,961 a 0,936.

Ďalej boli pre všetky veľkosti aerosólov a separátne pre hrubý mód aerosólov stanovené určité mikrofyzikálne charakteristiky. Prvou bola objemová koncentrácia, ktorej hodnota v kategórii *Všetky dni* dosiahla $0,04 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ a v kategórii *Saharský prach* to bolo až $0,153 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$, pričom separátne pre hrubý mód aerosólov a kategóriu *Saharský prach* to bolo $0,125 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$. Z ďalších charakteristík vyplýva, že pre kategóriu *Saharský prach* je typický efektívny polomer s hodnotou cca $1,5 \mu\text{m}$ a medián polomerov v objeme s jeho štandardnou odchýlkou na úrovni približne $1,9 \pm 0,6 \mu\text{m}$. V práci bola prezentovaná aj objemová distribúcia aerosólov, ktorá mala vo všetkých troch kategóriách bimodálne rozdelenie, pričom kategórii *Saharský prach* jednoznačne dominoval hrubý mód aerosólov.

Táto štúdia ukázala, že saharská púšť vďaka svojej veľkej rozlohe aj napriek relatívne väčšej vzdialenosti od Slovenskej republiky nezanedbateľne ovplyvňuje stav atmosféry nad jej územím. Vo výnimočných situáciách vplýva saharský prach aj na socioekonomické aspekty života jej obyvateľov. V takýchto prípadoch azda najviac pozornosti prináleží zašpineným povrchom áut a iných

predmetov v exteriéri, pričom niektorí obyvatelia si to omylom môžu spojiť napr. s priemyselnou činnosťou v ich okolí. Ovplyvnená prítomnosťou prachu zo Sahary môže byť taktiež aj kvalita ovzdušia, ktoré dýchame. Saharský prach je fenomén, ktorému je potrebné venovať dostatočnú pozornosť. Upozorňovanie na jeho výskyt v ovzduší národnou meteorologickou službou v sebe nesie potenciál pozitívne ovplyvniť život obyvateľstva.

Podakovanie

Autor ďakuje AERONET-Europe za poskytovanie kalibračných služieb. AERONET-Europe je súčasťou projektu ACTRIS-2, ktorý získala finančné prostriedky z Európskej únie (H2020-INFRAIA-2014-2015) na základe dohody o grante č. 654109.

LITERATÚRA

- AERONET, 2019, *Publications*. Goddard Space Flight Center, NASA, [online], Dostupné na: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/publications.html
- AERONET, 2019, *AERONET Inversion Products (Version 3)*. Goddard Space Flight Center, NASA, [online], Dostupné na: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/Documents/Inversion_products_for_V3.pdf.
- Badia, A.–Jorba, O.–Voulgarakis, A.–Dabdub, D.–Pérez García-Pando, C.–Hilboll, A.–Goncalves, M.–Janjiz, Z., 2017, *Description and evaluation of the Multiscale Online Nonhydrostatic Atmosphere Chemistry model (NMMB-MONARCH) version 1.0: gasphase chemistry at global scale*. *Geoscientific Model Development*, 10, 609–638.
- Balkanski, Y.–Schulz, M.–Claquin, T.–Guibert, S., 2007, *Reevaluation of mineral aerosol radiative forcings suggests a better agreement with satellite and AERONET data*. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 81–95, <https://doi.org/10.5194/acp-7-81-2007>.
- Berner, K.S.–Koc, N.–Godtliebsen, F.–Divine, D., 2011, *Holocene climate variability of the Norwegian Atlantic Current during high and low solar insolation forcing*. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 26, PA2220, <https://doi.org/10.1029/2010PA002002>.
- Chilinski, M.T.–Markowicz, K.M.–Zawadzka, O. et al., 2016, *Modelling and Observation of Mineral Dust Optical Properties over Central Europe*. *Acta Geophys.* 64, 2550–2590, <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0069>.
- Cimel Electronique, 2015, *CE318 Photometer User's Operation Manual*. Cimel Electronique, Paris, France.
- Clifford, H.M.–Spaulding, N.E.–Kurbatov, A.V.–More, A.–Korotkikh, E.V.–Sneed, S.B. et al., 2019, *A 2000 year Saharan dust event proxy record from an ice core in the European Alps*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, <https://doi.org/10.1029/2019JD030725>.
- Dai, A.–Luo, D.–Song, M. et al., 2019, *Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO2*. *Nat Commun* 10, 121, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07954-9>.
- Darwin, C., 1846, *An account of the fine dust which often falls on vessels in the Atlantic Ocean*. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 2(1–2), 26–30.
- Di Mauro, B. et al., 2019, *Saharan dust events in the European Alps: role in snowmelt and geochemical characterization*. *Cryosph.*, 13, 1147–1165, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1147-2019>.

- Dubovik, King, M.D., 2000, A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 105, 20673–20696.
- Dubovik, O.–Smirnov, A.–Holben, B.N.–King, M.D.–Kaufman, Y.J.–Eck, T.F.–Slutsker, I., 2000, Accuracy assessment of aerosol optical properties retrieval from AERONET sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 105, 9791–9806.
- Greilinger, M. et al., 2018, Contribution of Saharan Dust to Ion Deposition Loads of High Alpine Snow Packs in Austria (1987–2017). *Front. Earth Sci.*, 6, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00126>.
- Euphrasie-Clotilde, L.–Plocoste, T.–Brute, F. N., 2021, Particle Size Analysis of African Dust Haze over the Last 20 Years: A Focus on the Extreme Event of June 2020. *Atmosphere*, 12, 502, <https://doi.org/10.3390/atmos12040502>.
- Holben, B.N. et al., 1998, AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Rem. Sens. Environ.*, 66, 1–16.
- Hrabčák, P., 2016, Dym z Kanady nad Slovenskom. *SHMÚ*, [online], Dostupné na: <http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=714>.
- Hrabčák, P., 2016, Saharský prach nad Slovenskom. *Meteorologický časopis, ročník 19, č. 2*, 83–91, ISSN 1335-339X, http://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/MET_CASOPIS/2016-2_MC.pdf.
- Hrabčák, P., 2017, Dym z kanadských požiarov aj nad Slovenskom. *SHMÚ*, [online], Dostupné na: <http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=856>.
- Hrabčák, P., 2019, Optické vlastnosti aerosólu vo vybraných oblastiach snežného spektra. Dizertačná práca, *Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského v Bratislave, Bratislava*.
- Hrabčák, P., 2019, Dva pozoruhodné prípady výskytu stratosférických aerosólov nad Slovenskom, nerecenzovaný príspevok, *Meteorologický časopis, ročník 22, číslo 2*, 118–121, ISSN 1335-339X, http://www.shmu.sk/File/ExtraFiles/MET_CASOPIS/MC_2019-2.pdf.
- Huneeus, N. et al., 2011, Global dust model intercomparison in AeroCom phase I. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 7781–7816, <https://doi.org/10.5194/acp-11-7781-2011>.
- IPCC, 2013, Summary for Policymakers, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, 29 pp.
- Kinne, S. et al., 2006, An AeroCom initial assessment – optical properties in aerosol component modules of global models. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1815–1834, <https://doi.org/10.5194/acp-6-1815-2006>.
- Kok, J.–Ridley, D.–Zhou, Q. et al., 2017, Smaller desert dust cooling effect estimated from analysis of dust size and abundance. *Nature Geosci* 10, 274–278, <https://doi.org/10.1038/ngeo2912>.
- Marinou, E. et al., 2017, Three-dimensional evolution of Saharan dust transport towards Europe based on a 9-year EARLINET-optimized CALIPSO dataset. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 5893–5919, <https://doi.org/10.5194/acp-17-5893-2017>.
- O'Neill, N.T.–Royer, A., 1993, Extraction of bimodal aerosol-size distribution radii from spectral and angular slope (Ångström) coefficients. *Appl. Opt.*, 32, 1642–1645.
- Patel, P.N.–Bhatt, H.–Mathur, A.K.–Prajapati, R.P.–Tyagi, G., 2016, Reflectance-based vicarious calibration of INSAT-3D using high-reflectance ground target. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 3, 20–35, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2015.12.001>.
- Raptis I.P.–Kazadzis S.–Amiridis V.–Gkikas A.–Gerasopoulos E.–Mihalopoulos N., 2020, A Decade of Aerosol Optical Properties Measurements over Athens, Greece. *Atmosphere*, 11(2):154, <https://doi.org/10.3390/atmos11020154>.
- Rocha-Lima, A. et al., 2018, A detailed characterization of the Saharan dust collected during the Fennec campaign in 2011: in situ ground-based and laboratory measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 1023–1043, <https://doi.org/10.5194/acp-18-1023-2018>.
- Rodríguez, S. et al., 2020, Rapid changes of dust geochemistry in the Saharan Air Layer linked to sources and meteorology. *Atmospheric Environment*, Volume 223, 117186, ISSN 1352–2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117186>.
- Schauer, G. et al., 2016, Increased PM concentrations during a combined wildfire and Saharan dust event observed at high-altitude Sonnblick Observatory, Austria. *Aerosol and Air Quality Research*, 16.3, 542–554.
- Schuster, G.L.–Dubovik, O.–Arola, A., 2016, Remote sensing of soot carbon–Part 1: Distinguishing different absorbing aerosol species. *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 1565–1585.
- Smirnov, A.–Holben, B. N.–Eck, T. F.–Dubovik, O.–Slutsker, I., 2000, Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database. *Remote Sens. Rev.*, 73, 337–349.
- Streiff, L., 2021, Earth Day Connections: NASA Study Predicts Less Saharan Dust in Future Winds. NASA, [online], Dostupné na: <https://www.nasa.gov/feature/esnt/2021/nasa-study-predicts-less-saharan-dust-in-future-winds>.
- Stuut, J.B.–Smalley, I.–O'Hara-Dhand, K., 2009, Aeolian dust in Europe: African sources and European deposits. *Quat. Int.*, 198 (1–2), 234–245, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2008.10.007>.
- Varga, G.–Kovács, J.–Újvári, G., 2013, Analysis of Saharan dust intrusions into the Carpathian Basin (Central Europe) over the period of 1979–2011. *Glob. Planet. Change*, 100, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.007>.
- Varga, G.–Újvári, G.–Kovács, J., 2014, Spatiotemporal patterns of Saharan dust outbreaks in the Mediterranean Basin. *Aeolian Res.*, 15, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.06.005>.
- Varga, G.–Cserhádi, C.–Kovács, J.–Szalai, Z., 2016, Saharan dust deposition in the Carpathian Basin and its possible effects on interglacial soil formation. *Aeolian Res.*, 22, <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.05.004>.
- Varga, G., 2020, Changing nature of Saharan dust deposition in the Carpathian Basin (Central Europe): 40 years of identified North African dust events (1979–2018). *Environment International*, Volume 139, 105712, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105712>.
- Velasco-Merino, C. et al., 2018, Impact of long-range transport over the Atlantic Ocean on Saharan dust optical and microphysical properties based on AERONET data. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 9411–9424, <https://doi.org/10.5194/acp-18-9411-2018>.
- Wang, Q.–Gu, J.–Wang, X., 2020, The impact of Sahara dust on air quality and public health in European countries. *Atmos. Environment*, Volume 241, 117771, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117771>.
- Werner, E.–Basart, S.–Benincasa, F., 2021, Activity Report 2020. Barcelona Dust Forecast Center, [online], Dostupné na: https://dust.aemet.es/about-us/copy_of_20190601_BDFC_ActivityReport2020.pdf.

HODNOTENIE SIMULÁCIÍ A PREDPOVEDÍ HYDROLOGICKÝCH MODELOV V OPERATÍVNEJ HYDROLÓGII SHMÚ

HANA HLAVÁČIKOVÁ, KATEŘINA HRUŠKOVÁ, MARCEL ZVOLENSKÝ, DANICA LEŠKOVÁ

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

Operational hydrological forecasts are important pieces of information for different users. They are based on simulations of hydrological models, in SHMÚ operational hydrology mainly on the HBV and HEC-HMS rainfall-runoff models. Hydrological forecasts involve various uncertainties that are little known and are not often separately quantified. Therefore, there is effort to develop a new methodology for evaluating forecasts and simulations, which may help with their elimination. This paper provides information on the assessment method of hydrological forecasts and simulations of SHMÚ. Some examples of this assessment from several Slovak gauging stations and catchment areas are included as well. Regular and comprehensive evaluation of hydrological models should lead, in particular, to specific recommendations on improving the calibration of hydrological models, sending feedback to colleagues in Numerical Meteorology or Remote Sensing Departments of SHMÚ who are responsible for the preparation of precipitation input data (predicted or measured).

Operatívne hydrologické predpovede sú dôležitou informáciou pre rôznych užívateľov. Sú založené na simuláciách hydrologických modelov, v operatívnej hydrológii SHMÚ predovšetkým zrážkovo-odtokových modelov HBV a HEC-HMS. Hydrologické predpovede v sebe zahŕňajú rôzne neistoty, ktoré sú málo známe a často nie sú oddelene kvantifikované. Preto je snahou vyvinúť adekvátnu metodiku hodnotenia hydrologických predpovedí, ktorá by dokázala vyjadriť jednotlivé druhy neistôt, čo by mohlo pomôcť k ich eliminácii. Tento príspevok poskytuje informáciu o spôsobe hodnotenia hydrologických predpovedí a hydrologických modelov v operatívnej hydrológii SHMÚ, ako aj niektoré ukážky hodnotenia pre rok 2020 z niekoľkých slovenských vodomerných staníc a povodí. Pravidelné a komplexné hodnotenie hydrologických modelov by malo viesť predovšetkým ku konkrétnym odporúčaniam týkajúcim sa zlepšenia kalibrácie hydrologických modelov, zasielaniu spätnej väzby pre Odbor Numerické predpovedné modely a metódy a Odbor Dištančné merania SHMÚ, ktoré poskytujú údaje o meraných a predpovedaných zrážkach a pracujú na zvyšovaní kvality týchto údajov.

Key words: hydrological forecasts, radar, ALADIN, warnings, HBV model

ÚVOD

Operatívne hydrologické predpovede prinášajú informáciu o možnom vývoji hydrologickej situácie, v dôsledku čoho sú súčasťou procesu rozhodovania pri rôznych celospoločenských aktivitách. Sú dôležité napr. pre správcu vodných tokov a povodí, pre elektrárne pri plánovaní manipulácií na vodnom diele pri výrobe elektrickej energie, pre riečnu plavbu a v neposlednom rade pre protipovodňovú ochranu miest a obcí (Alfieri et al., 2014; Hrušková et al., 2019; Lopez et al., 2021; Unduche et al., 2018).

Operatívne hydrologické predpovede vychádzajú zo simulácií hydrologických modelov, ktoré boli nakalibrované na fyzicko-geografické podmienky konkrétneho povodia a daného záverového profilu. V operatívnej hydrológii SHMÚ sa používajú zrážkovo-odtokové (ZO) modely HBV a HEC-HMS pre 118 predpovedných vodomerných profilov, pričom na webovej stránke SHMÚ sú uverejňované deterministické predpovede vodných stavov pre 76 vodomerných profilov na 48 hodín (Obr. 1).

Hydrologické modely majú široké uplatnenie pri riešení rôznych úloh v oblasti základného a aplikovaného výskumu. Najznámejšie je modelovanie dopadov rôznych hypotetických scenárov, napr. zmeny využitia krajiny, dopadov klimatickej zmeny, vplyv extrémnych zrážok na

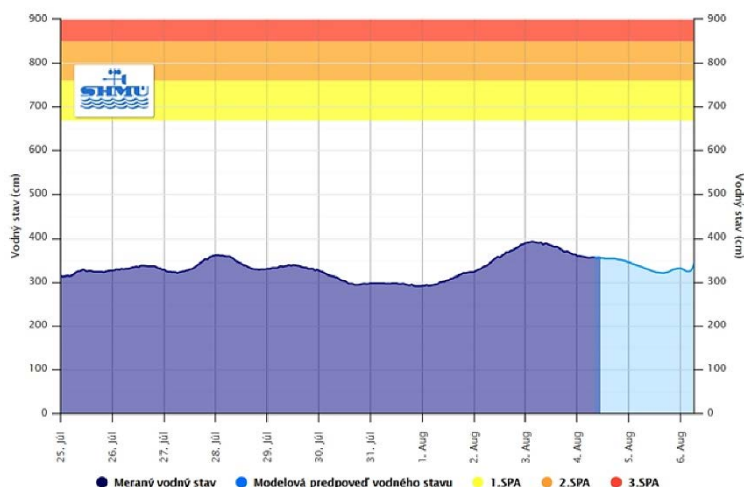
odtok v povodí (Danáčová et al., 2020; Hlavčová et al., 2016; Sleziač et al., 2018). Možno ich používať aj v ne-monitorovaných povodiach, kde môžu zastupovať časovo náročné a niekedy aj finančne nákladné merania. Na druhej strane sa používajú na testovanie poznatkov získaných z priamych meraní v povodiach (Krajčí et al., 2016; Széles et al., 2021). Ich použitie v operatívnej hydrológii má svoje špecifiká. V operatívnej prevádzke SHMÚ sú tieto špecifiká nasledovné: modely sú nastavené v hodinovom časovom kroku, v nepretržitej prevádzke (24/7) zbiehajú niekoľkokrát za deň (v závislosti od vstupného meteorologického modelu – ALADIN, ECMWF, deterministická alebo pravdepodobnostná verzia). Poskytujú predpoveď prietoku, resp. vodného stavu s rôznou dobou predstihu.

Vzhľadom na mimoriadnu zložitost' hydrologických procesov a limitované vedomosti pri ich popise sú výstupy hydrologických modelov zaťažené neistotou, ktorá pochádza najmä z chýb vstupných údajov, štruktúry modelu a jeho parametrov (Liu, Gupta, 2007). Znamená to, že neistota je neoddeliteľnou súčasťou každej hydrologickej predpovede.

Vo všeobecnosti možno povedať, že hydrologické modelovanie ovplyvňujú štyri hlavné zdroje neistôt (Renard et al., 2009): i) neistota vstupov, napr. chyby meraných alebo predpovedaných meteorologických prvkov (teplota vzduchu, atmosférické zrážky); ii) neistota výstupov, napr.

Obrázok 1. Ukážka predpovede vodného stavu pre vybraný predpovedný profil Devín.

Figure 1. Example of water level forecast for selected gauging station Devín.



chyby mernej krivky ovplyvňujúce odhad odtoku; iii) štruktúrna neistota hydrologického modelu (niekedy označovaná ako „neistota modelu“), vyplývajúca zo zjednodušeného vyjadrenia hydrologických procesov v hydrologických modeloch; a (iv) parametrická neistota, ktorá odráža nemožnosť presne stanoviť hodnoty parametrov modelu v dôsledku výberu kalibračného obdobia (dĺžka a jeho charakter), neistôt obsiahnutých v kalibračných údajoch, nedokonalého porozumenia hydrologických procesov, aproximácie modelu atď. Pri tvorbe hydrologických predpovedí k nej ešte možno pridať neistotu operatívnu, ktorá súvisí s konaním a rozhodovaním hydrologa prognostika.

Na to, aby bolo možné s neistotami účinne pracovať a informovať o nich, je dôležité pochopiť, odkiaľ pochádzajú. Ako uvádza Renard et al. (2009), zníženie celkovej predpovednej neistoty vyžaduje dôkladné kvantitatívne pochopenie každého z jej zdrojov. Situáciu v operatívnej prevádzke značne ovplyvňuje aj fakt, že hydrologické modely pracujú s kvalitatívne odlišnými vstupnými informáciami, aj keď ide o rovnaký meteorologický prvok (atmosférické zrážky alebo teplota vzduchu). Napr. do modelu vstupujúce radarové odhady úhrnov atmosférických zrážok sa od tých predpovedaných líšia na základe zdroja, z ktorého informácia o nich pochádza. Skutočnosť, že hydrologické modely v operatívnej prevádzke sú kalibrované a tréňované na radarových odhadoch zrážok, zatiaľ čo samotné hydrologické modelové predpovede sa opierajú o výstupy z meteorologických modelov, predstavuje významný zdroj neistôt bez ohľadu na jej ostatné zdroje.

V operatívnej hydrologii, a nielen v nej, tak vyvstávajú celkom zásadné otázky: je model zostavený pre dané povodie správny, dokáže dostatočne uspokojivo modelovať hydrologické procesy prebiehajúce na povodí, dokáže dostatočne dobre simulovať rôzne zrážkovo-odtokové situácie?

Od roku 2020 sme na Odbore Hydrologické predpovede a výstrahy SHMÚ pristúpili ku komplexnému hodnoteniu hydrologických modelov tak, aby sme postupne dokázali kvantifikovať a oddeliť jednotlivé druhy mode-

lových neistôt. To nám umožní lepšie poznať ich významné zdroje a zároveň aj generovať spätnú väzbu nevyhnutnú pre prípravu kvalitných meteorologických vstupov, meraných aj predpovedaných. Vo vzťahu ku konkrétnemu hydrologickému modelu sú taktiež identifikované povodia s väčšou alebo menšou mierou neistoty.

Cieľom tohto príspevku je oboznámiť odbornú verejnosť s metodikou hodnotenia simulácií a krátkodobých predpovedí hydrologických modelov používaných na Odbore Hydrologických predpovedí a výstrah SHMÚ. Jej účelom je identifikácia najvýznamnejších zdrojov neistôt pre konkrétny predpovedný profil a hydrologický model. Pre potreby spracovania tohto príspevku sme vybrali zrážkovo-odtokový model HBV.

METODIKA

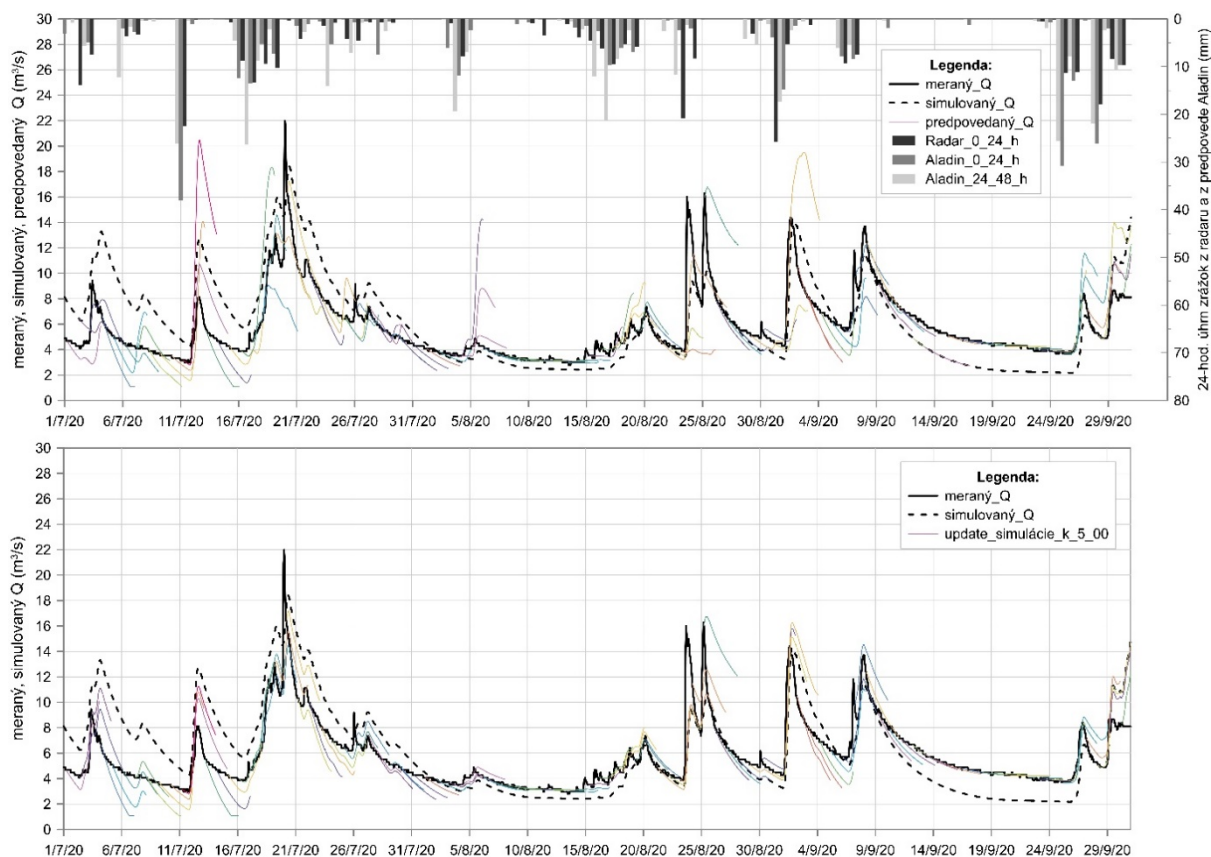
Hodnotenie hydrologických predpovedí a simulácií hydrologického modelu pre vybraný predpovedný profil sa skladá z niekoľkých častí. Cieľom bolo vytvoriť komplexnú metodiku hodnotenia, ktorá prebieha kvartálne na základe hodinových operatívnych údajov. Po ukončení roka sa niektoré charakteristiky posudzujú aj celoročne. Základnými vstupnými údajmi do hodnotenia sú merané, simulované a predpovedané prietoky v danom predpovednom profile. Údaje o spadnutých a predpovedaných atmosférických zrážkach a nameranej a predpovedanej teplote vzduchu sú spracované vo forme priemerov na povodie k záverovému profilu povodia – k hodnotenej stanici. V mesačnom kroku vstupujú do hodnotenia priemerné úhrny zrážok na povodie odvodené z klimatických máp priestorového rozloženia mesačných úhrnov zrážok, ktoré vytvára Odbor Klimatologická služba SHMÚ interpolačnou metódou 3D Spline. Klimatické mapy sú vytvorené na základe bodových údajov zo siete zrážkomerných staníc.

Dôležité je uvedomiť si rozdiel medzi predpovedanými a simulovanými prietokmi. Pri predpovediach hydrologického modelu vstupujú do modelu predpovede atmosférických zrážok a teploty vzduchu z meteorologického modelu ALADIN, čím vyjadrujú budúci, predpokladaný stav, na rozdiel od simulácií, do ktorých vstupujú reálne spadnuté zrážky a namerané teploty (odvodené z produktu INCA), vyjadrené ako priemerné hodnoty na povodia a predstavujú tak minulé až súčasný stav systému. Radarové odhady zrážok, ktoré sú prezentované v tejto práci a ďalej označované ako zrážky z radaru, sú zlúčenou informáciou založenou na analýze radiolokačných meraní kombinovaných s nameranými údajmi z pozemnej siete automatických zrážkomerných staníc (produkt qPrec).

Predpovedané prietoky, ktoré v modeli nadväzujú na simulované, sa vždy v hodine vydania predpovede (napr. ranné predpovede k 3:00 hod. UTC) aktualizujú na meraný prietok.

Obrázok 2. Merané, simulované a predpovedané prietoky (k 3:00 h UTC) a 24-hodinové úhrny zrážok z radaru a z predpovede Aladin na dnes (0–24 h) a na zajtra (24–48 h) (obr. hore), merané, simulované a updatované simulované prietoky (k 3:00 h UTC) (obr. dole) pre stanicu Spišské Vlachy – Hornád (VS 8430) pre obdobie 1. 7. – 30. 9. 2020.

Figure 2. Measured, simulated and forecasted discharges (as of 03:00 UTC) and 24-hour precipitation totals from radar and from Aladin forecast for today (0–24 h) and for tomorrow (24–48 h) (fig. top), measured, simulated and updated simulated discharges (as of 03:00 UTC) (fig. bottom) for the station Spišské Vlachy – Hornád for the period 1. 7. – 30. 9. 2020.



Samotné hodnotenie hydrologických modelov sa skladá z nasledovných krokov:

1) Hodnotenie hydrologických predpovedí

Hodnotenie zahŕňa grafické zhodnotenie predpovedí (Obr. 2) s dôrazom na predpovedanie stupňov povodňovej aktivity (SPA) a štatistické zhodnotenie predpovedí: počet termínovaných predpovedí v intervale prípustnej chyby, počet nadhodnotení/podhodnotení, relatívna chyba, koeficient variácie. V ročnom hodnotení sa vyhodnocujú aj štatistické metriky NSE (Nash-Sutcliffe) a KGE (Kling-Gupta) pre rozdiely medzi predpovedanými a meranými prietokmi pre jednotlivé hodiny doby predstihu predpovede (od 1 do 69 hodín). Prípustná chyba predpovede sa počíta na základe meraných hodinových prietokov z niekoľko-ročného obdobia. Je to interkvartilový rozsah súboru +/- smerodajná odchýlka súboru, čo predstavuje 68,7 % hodnôt súboru.

Štatistická metrika predpovedí alebo simulácií sa vyjadruje pomocou Nash-Sutcliffe (NSE) alebo Kling-Gupta (KGE) koeficientov (Alfieri et al., 2014, Knoben et al., 2019):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_a(t) - Q_b(t))^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_b(t) - \bar{Q}_b)^2}, \quad (1)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_b} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_a}{\mu_b} - 1\right)^2}. \quad (2)$$

Kde Q_a a Q_b sú v prípade štatistiky predpovedí predpovedaný a meraný prietok (alebo simulovaný a meraný prietok) analyzovaný pre každú hodinu doby predstihu predpovede zvlášť, pričom predpovedaný a simulovaný prietok je vždy updatovaný k ránnému meranému prietoku v čase vydania predpovede. V prípade analýzy simulácií hydrologického modelu je to simulovaný a meraný prietok (m^3/s). r je lineárny korelačný koeficient a vyjadruje koreláciu medzi skúmanými súbormi údajov, σ_a , σ_b a μ_a , μ_b sú smerodajné odchýlky a priemerné hodnoty analyzovaných radov údajov. Hodnota $\sigma_a / \sigma_b = \alpha$ vyjadruje mieru odchýlky variability, $\mu_a / \mu_b = \beta$ vyjadruje chybu priemeru.

Porovnaním Obr. 2 (horný a dolný) je možné vidieť neistotu meteorologickej predpovede. Obr. 2 (hore) znázorňuje neistoty hydrologických predpovedí (so všetkými neistotami) tak, ako sú publikované operatívnou službou. Obr. 2 (dole) zahŕňa v sebe iba neistotu hydrologického modelu a radarových údajov o zrážkach. Grafické, ako aj štatistické zhodnotenie dáva hydroológovi prvú informáciu o rozdieloch medzi predpovedanými a meranými prietokmi

a ich významnosti. Zatiaľ však chýba informácia o tom, čo je zdrojom možnej neistoty.

2) Hodnotenie simulácií hydrologického modelu

Hodnotenie zahŕňa grafické zhodnotenie simulácií, ako aj hodnotenie vyjadrené štatistickou metrikou NSE a KGE. Analýza výsledkov umožňuje určiť neistoty spojené s hydrologickým modelom, t.j. neistoty meraných meteorologických a hydrologických vstupov, ale aj parametrov modelu. Napr. rozdiely medzi simulovanými a meranými prietokmi v mrazovom bezzrážkovom období môžu detegovať existenciu ľadových úkazov. Ich vplyv sa prejaví vzdušným vodnej hladiny (vzostup vodných stavov), ktoré sa prostredníctvom mernej krivky prenesie aj do nereálneho vzostupu meraných prietokov (neistota hydrologických vstupov).

Z pohľadu operatívnej hydrológie je dôležité, akým spôsobom hydrologický model simuluje zrážkovú udalosť. Zaujímá nás celkový tvar a časový priebeh simulovanej vlny – jej nástup, veľkosť a čas kulminácie, ako aj pokles. Nakoľko hodnotený hydrologický model HBV patrí do kategórie kontinuálnych bilančných modelov, počíta sa nepretržite v každom časovom kroku vodná bilancia. Každý časový krok tak predstavuje počiatočné podmienky pre ďalší modelový výpočet. Inými slovami simulácia v minulosti ovplyvňuje budúcu simuláciu, ako aj hydrologickú predpoveď. Porovnanie simulovaného a meraného hydrogramu v nadväznosti na zrážkovú udalosť hydroológovi ukáže, či prípadné chyby hydrologického modelu môžu byť spôsobené meteorologickými vstupmi (neistota meteorologických vstupov – údaje z radaru), alebo hodnotami parametrov modelu (parametrická neistota). Bližšie informácie o hydrologickom modeli HBV (IHMS – Integrated Hydrological Modelling System) je možné nájsť v publikácii Bergström, 1992.

3) Hodnotenie atmosférických zrážok a teplôt vzduchu

Hodnotenie zrážok pozostáva z porovnania mesačných klimatických, radarových a predpovedaných (z modelu ALADIN) úhrnov zrážok. Na jednej strane táto informácia poskytuje údaj o tom, či išlo o obdobie bohaté, alebo chudobné na zrážky (klimatický úhrn je vyjadrený aj v % normálu). Druhou dôležitou informáciou, ktorá môže indikovať isté nezrovnalosti, je určenie charakteru zrážok (frontálne vs. konvektívne).

Výstupom tejto časti hodnotenia sú aj mapy podielov radarových a klimatických mesačných úhrnov zrážok pre jednotlivé modelované povodia (teda zrážok, získaných nepriamou metódou z radaru a zrážok získaných priamou metódou z pozemných bodových meraní, zo siete zrážkomerných staníc). Je možné z nich identifikovať časovo-priestorový výskyt dobrej alebo horšej zhody medzi reálne spadnutými zrážkami a zrážkami získanými z radarového produktu. Ide o veľmi cennú informáciu, ktorá je spätne zasielaná na Odbor Dištančné merania pre získanie informácie o spoľahlivosti radarových údajov. Na tomto odbore je tak neustále zlepšovaný radarový zrážkový produkt, ktorý je vstupom do hydrologického modelu. Ak sú výrazné odlišnosti medzi radarovými a skutočne spadnutými zrážkami, prejaví sa to buď v nadhodnotení, alebo podhodnotení modelovej simulácie. To má priamy dopad nielen na

simuláciu modelu, ale aj na kalibráciu modelu v dlhšom časovom horizonte. Porovnanie predpovedaných zrážok (prípadne teplôt, čo je dôležité hlavne v období akumulácie alebo topenia sa snehu) s reálne spadnutými indikuje neistoty meteorologickej predpovede, ktorá priamo ovplyvňuje výsledok hydrologickej predpovede.

4) Celkové zhodnotenie hydrologického modelu

Z celoročného hodnotenia modelu, ako aj z validácií hydrologických modelov na období mimo kalibračného obdobia, je možné zhodnotiť, ktorý zdroj neistoty je považovaný za najväčší problém pre daný predpovedný vodomerný profil: či je to neistota radarových zrážok, neistota meteorologickej predpovede alebo je to neistota samotného hydrologického modelu a je potrebné zväziť jeho rekalkuláciu.

VÝSLEDKY

V tejto časti príspevku sú prezentované viaceré výsledky. Najprv je to zhodnotenie zrážkových pomerov v roku 2020, z ktorých sa odvíjala hydrologická situácia na tokoch. Potom je to ukážka výsledkov hodnotenia stanice Spišské Vlachy na toku Hornád, z ktorých vyplynuli aj určité závery a ďalšie odporúčania. Osobitnou časťou je ukážka hydrologických predpovedí regionálnych povodní v októbri 2020 v porovnaní s predpoveďami povodní, ktoré sa vyskytli na niektorých tokoch koncom decembra. V závere sú ukážky predpovedí zrážok, ktoré môžu byť v niektorých prípadoch veľmi nadhodnotené alebo podhodnotené. Problematickým obdobím je letné obdobie s príválovými zrážkami, ich presná lokalizácia a úhrny sú ťažko predpovedateľné, čo sa samozrejme prenáša aj do možnosti, resp. nemožnosti správne spracovať tieto udalosti použitými hydrologickými modelmi.

Zrážkové pomery v roku 2020

Rok 2020 bol z pohľadu vodnosti slovenských tokov veľmi premenlivý a vyznačoval sa viacerými extrémami (viď napr. v Správe o povodniach za rok 2020). Spočiatku veľmi suché obdobie v apríli bolo vystriedané častejším výskytom búrok na celom území. Počas letných mesiacov sa tak postupne dopĺňali zásoby vody v povodiach. September sa vyznačoval vo viacerých povodiach dvomi epizódami zrážok (na začiatku a na konci mesiaca), ktoré spôsobili nasýtenie týchto povodí. To vytvorilo priaznivé podmienky pre výskyt povodní, ktoré zasiahli takmer všetky povodia v mesiaci október. V októbri boli zrážky sústredené prevažne do piatich dní mesiaca, ostatná časť mesiaca a aj mesiac november boli prakticky bez zrážok, alebo iba s nízkymi úhrnmi. Vyššie úhrny zrážok sa vyskytli až koncom decembra, čo na niektorých tokoch opäť spôsobilo povodne.

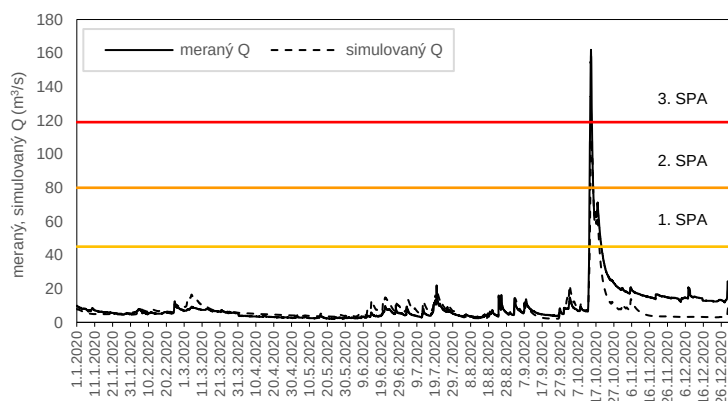
Hodnotenie vodomerného profilu Spišské Vlachy

Vodomerná stanica VS 8430 Spišské Vlachy sa nachádza na toku Hornád. Veľkosť povodia Hornádu po VS Spišské Vlachy je 775,02 km², dlhodobý priemerný ročný prietok je 5,27 m³/s.

Priebeh operatívnych meraných a simulovaných prietokov v roku 2020 je na Obr. 3. Počas poklesu povodňovej

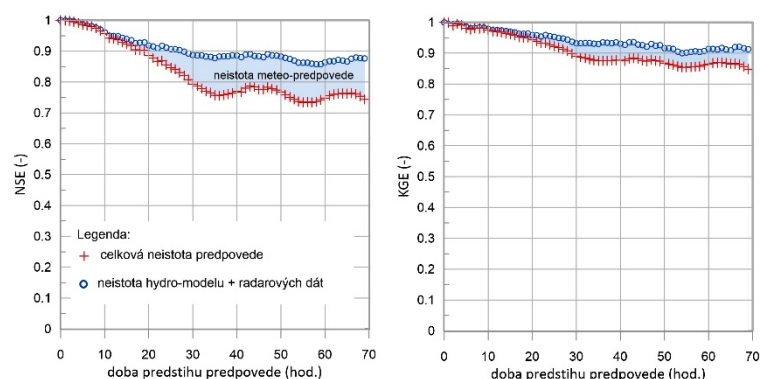
Obrázok 3. Merané a simulované prietoky pre vodomernú stanicu VS 8430 Spišské Vlachy na toku Hornád. Pre obdobie 1. 1. – 31. 12. 2020.

Figure 3. Measured and simulated discharges for the water gauging station Spišské Vlachy on the Hornád river. For the period 1. 1. – 31. 12. 2020.



Obrázok 4. Neistota hydrologických predpovedí vyjadrená pomocou štatistickej metriky NSE a KGE pre jednotlivé hodiny doby predstihu predpovede (1 až 69 hodín) pre stanicu 8430 Spišské Vlachy – Hornád, údaje sú z roku 2020. Rozdiel medzi celkovou neistotou hydrologických predpovedí a neistotou hydro-modelu a radarových dát je neistota meteo-predpovede.

Figure 4. Uncertainty of hydrological forecasts expressed by using NSE and KGE statistical metrics for individual forecast lead time hours (1 to 69 hours) for the station Spišské Vlachy – Hornád river, data are from the year 2020. The difference between the total uncertainty of hydrological forecasts and the uncertainty of the hydro-model and radar data is the uncertainty of the meteo-forecast.



vlny sa zmenil charakter odtoku, čo naznačuje rozdiel medzi meranými a simulovanými prietokmi. Uvedená situácia indikuje zmeny mernej krivky, čo sa potvrdilo po následnom vyhodnotení povodňovej situácie. Za normálnych okolností (bez zmeny koryta) by sa prietok po vlne vrátil na približne rovnakú úroveň ako pred vlnou podobne, ako ukazuje simulácia.

Percento termínovaných predpovedí s dobou predstihu 24 hodín sa pohybovalo v intervale 26 až 60 % prípustnej chyby, s dobou predstihu 48 hodín to bolo 20 až 51 %. Vyššie percentá boli dosiahnuté v období 2. kvartálu (apríl až máj) s nízkymi a ustálenými prietokmi. Štatistická metrika hodnotenia predpovedí je na Obr. 4. Je zaujímavé, že pre tento vodomerný profil hodnoty NSE aj KGE pre dobu predstihu od jednej hodiny po približne 31 až 37 hodín klesajú, potom sú už viac-menej ustálené. To znamená, že neistota predpovede v oboch prípadoch rastie

prvých 31 až 37 hodín, ale potom sa už významne nemení. Na základe Obr. 4, ktorý znázorňuje celkovú neistotu hydrologických predpovedí, neistotu hydrologického modelu a neistotu meteorologickej predpovede, je možné konštatovať, že neistota hydrologického modelu, ktorá zahŕňa v sebe aj neistotu radarových údajov o zrážkach, je v prvých hodinách doby predstihu vyššia ako neistota meteorologickej predpovede. Narastá až do približne 30. hodiny doby predstihu, potom je viac-menej vyrovnaná. Z Obr. 4 je tiež vidieť, že neistota meteorologickej predpovede narastá v rozsahu 10. až 35. hodiny doby predstihu. Výsledky na Obr. 4 znázorňujú a zároveň kvantifikujú jednotlivé druhy neistôt, ktoré sa podieľajú na celkovej neistote hydrologických predpovedí, vydaných a analyzovaných pre stanicu Spišské Vlachy v roku 2020.

Hodnotenie predpovedaných stupňov povodňovej aktivity patrí medzi osobitne dôležité ukazovatele a je aj jedným z bodov cieľov kvality hydrologických predpovedí. Počas roka 2020 sa v tomto profile vyskytol SPA 1-krát (14. 10. 2021), ktorý bol aj predpovedaný. Táto povodňová udalosť bola predpovedaná už 11. 10. v rannej predpovedi a bola potvrdená aj predpoveďami z ďalších dní (12. 10. a 13. 10.). Jeden SPA bol počas roka predpovedaný, ale sa neuskutočnil (tzv. falošný alarm, 27. 6. 2021).

Mesačné úhrny predpovedí zrážok, vyjadrené ako priemerné úhrny na povodie, z modelu Aladin na 1. a 2. deň (s dobou predstihu 0–24 a 24–48 hodín) boli v mesiaci máj, jún a september nadhodnotené o 20 až 50 %, v mesiaci júl iba mierne podhodnotené o 10 %, pričom v auguste boli podhodnotené o 50 a 20 % (1. hodnota je pre predpoveď z modelu Aladin na 0–24 h, 2. hodnota pre predpoveď na 24–48 h).

Predpoveď z dňa 26. 6. 2021 dávala falošný alarm na 1. SPA kvôli nadhodnotenej predpovedi zrážok na povodie (denný úhrn zrážok 46,1 mm oproti reálnej spadnutým 11,0 mm).

Mesačné úhrny zrážok z radaru, vyjadrené ako priemerné úhrny na povodie, sa pohybovali v rozsahu $\pm 10\%$ mesačných úhrnov zrážok získaných z pozemných meraní zo zrážkomerných staníc (z klimatických máp). V mesiaci apríl bol tento podiel najnižší (0,7), čo poukazuje na 30%-né podhodnotenie zrážok z radaru, ale pri veľmi malom úhrne zrážok v tomto mesiaci (10 mm) mal takýto výsledok zanedbateľný vplyv na výsledky hydrologickej simulácie.

Štatistické zhodnotenie simulácií hydrologického modelu je v Tab. 1. Je vyjadrené pre hodnotený rok 2020, ako aj pre celé obdobie (august 2016 až december 2020) s dostupnými údajmi, predovšetkým zrážkovými z novej siete radarových meraní (kalibračné a validačné obdobie spolu). NSE aj KGE indikujú dobrú simuláciu modelu.

Avšak vždy je potrebné posúdiť model z pohľadu cieľa, pre ktorý sa používa. V operatívnej hydrológii je jeden z dôležitých cieľov, aby model dokázal dobre simulovať obdobia povodňových prietokov.

Tabuľka 1. Štatistické charakteristiky simulácie hydrologického modelu NSE a KGE (spolu s rozkladom jednotlivých členov tejto charakteristiky) získané pre uvedené obdobia.

Table 1. Statistical metrics of the NSE and KGE hydrological model simulations (together with the decomposition of the individual terms of the KGE metric) obtained for the indicated periods.

8430 Spišské Vlachy	NSE	KGE	r	α	β
1.1. – 31.12.2020	0,805	0,735	0,908	0,779	0,886
Obdobie 08/2016 – 12/2020	0,830	0,811	0,915	0,833	1,021

Na základe komplexného hodnotenia tohto vodomerneho profilu bolo zistených niekoľko skutočností. Najväčším zdrojom neistoty sa ukázali byť predpovedané zrážky prevažne v mesiacoch jún až september. Podľa štatistickej metriky aj podľa grafického zhodnotenia je hydrologický model dobre nakalibrovaný. Slabšou stránkou je simulácia maximálnych prietokov, ktorej je potrebné venovať sa samostatne. Hoci maximálny predpovedaný prietok v roku 2020 spadol do 2. stupňa PA, bol o 54 m³/s nižší ako reálny. Simulácia kulminácie bola o tretinu nižšia ako meraný prietok. V roku 2019 bol maximálny prietok simulovaný iba v polovičnej hodnote meraného. Odporúčame preto zvážiť samostatnú kalibráciu modelu pre obdobie vysokej vodnosti. V ostatnej časti roka sú simulácie veľmi dobré.

Štvrtý kvartál 2020 - októbrové a decembrové povodne

Začiatkom októbra boli zaznamenané extrémne úhrny z trvalých zrážok. Na väčšine územia Slovenska mesačné úhrny zrážok zodpovedali 250 až 400 % normálu (1961 – 1990) (Bulletin meteorológia a klimatológia SHMU, 2020), čo spôsobilo povodne na viacerých tokoch. Zrážky boli pomerne rovnomerne priestorovo rozmiestnené v rámci povodí a padali niekoľko dní vo vyrovnannej intenzite. Z analýz predpovedí zrážok, z radarových úhrnov zrážok a z hydrologických predpovedí prietokov pre toto obdobie môžeme konštatovať, že všetky zložky vstupov do modelov odrážali reálnu situáciu a hydrologické predpovede boli v dobrej zhode s meranými prietokmi. Predstih hydrologických predpovedí bol dostupný až na 3 dni vopred. Viaceré modely signalizovali, že na tokoch budú dosiahnuté a prekročené stupne povodňovej aktivity. Podrobná analýza synoptickej situácie, ako aj výskytu povodní z tohto obdobia je v niekoľkých správach o povodniach (Povodňová situácia na tokoch v povodí Nitry a dolného Váhu v októbri 2020, Povodne z trvalého dažďa v povodí Hrona, Ipľa, Slanej a Rimavy v októbri 2020, Povodňová situácia na východnom Slovensku v októbri 2020, Povodňová situácia na tokoch v povodí horného a stredného Váhu v októbri 2020, dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy, 30. 08. 2021). Na Obr. 5 sú zobrazené mesačné úhrny zrážok pre mesiace september až december 2020.

Na viacerých staniciach modely indikovali dosiahnutie SPA už tri dni vopred (Obr. 6). Na základe takejto informácie bolo možné vydávať výstrahy na povodne z trvalého dažďa s dostatočne dlhou dobou predstihu. Modely sú v takýchto situáciách veľmi užitočným a potrebným nástrojom pre vydávanie výstrah. Niektoré predpovede boli potvrdené aj predpoveďami z európskeho povodňového výstražného systému EFAS (dostupné na: https://www.efas.eu/efas_frontend/#/home). Obr. 6 poskytuje ukážku výstupov hydrologických predpovedí v takom formáte, ako boli aktuálne dostupné na webových stránkach hydrologickej operatívnej služby, a ktoré v sebe obsahujú všetky spomínané druhy neistôt.

Podhodnotené zrážky z radaru aj predpovede zrážok koncom decembra 2020

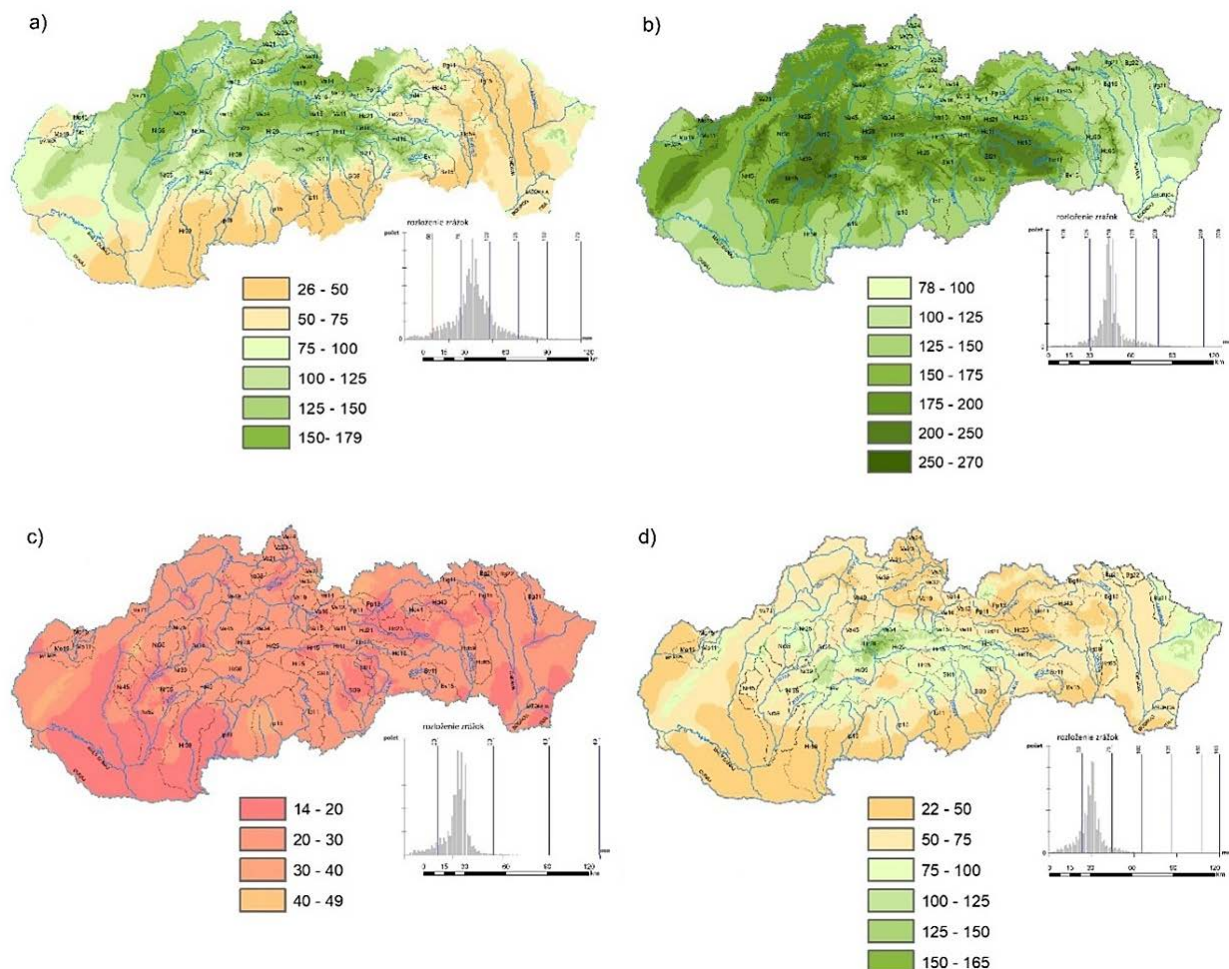
Trochu iná bola situácia na konci 4. kvartálu 2020, v mesiaci december. Na niektorých staniciach boli dosiahnuté SPA (Obr. 7), ale simulácie ani predpovede nenaznačovali výskyt povodní. V rámci hodnotenia modelov sa riešilo, čo mohlo spôsobiť takéto predpovede. Porovnávali sa merané a predpovedané teploty vzduchu (ktoré boli v dobrej zhode a boli väčšinou kladné), zásoby snehu a topenie snehu v hydrologických modeloch a predpovedané, merané a radarové úhrny zrážok. Z uvedeného vyplývalo, že radarové zrážky boli v tomto období vo viacerých povodiach podhodnotené. Na viacerých povodiach takéto podhodnotenie zodpovedalo 30–50 % meraných zrážok (Obr. 8 vpravo). Predpovedané zrážky boli tiež na viacerých povodiach podhodnotené, preto ani simulácie, ani predpovede nenaznačovali výskyt povodní.

Nadhodnotené a podhodnotené predpovede zrážok z meteorologického modelu Aladin

Niekedy sa stáva, že nadhodnotené predpovedané zrážky z modelu Aladin zlepšia podhodnotené simulácie hydrologického modelu (Obr. 9). Pre užívateľov hydrologických predpovedí je samozrejme dôležitý výsledný produkt, publikovaná hydrologická predpoveď. Avšak cieľom odboru hydrologických predpovedí je takéto situácie identifikovať a eliminovať.

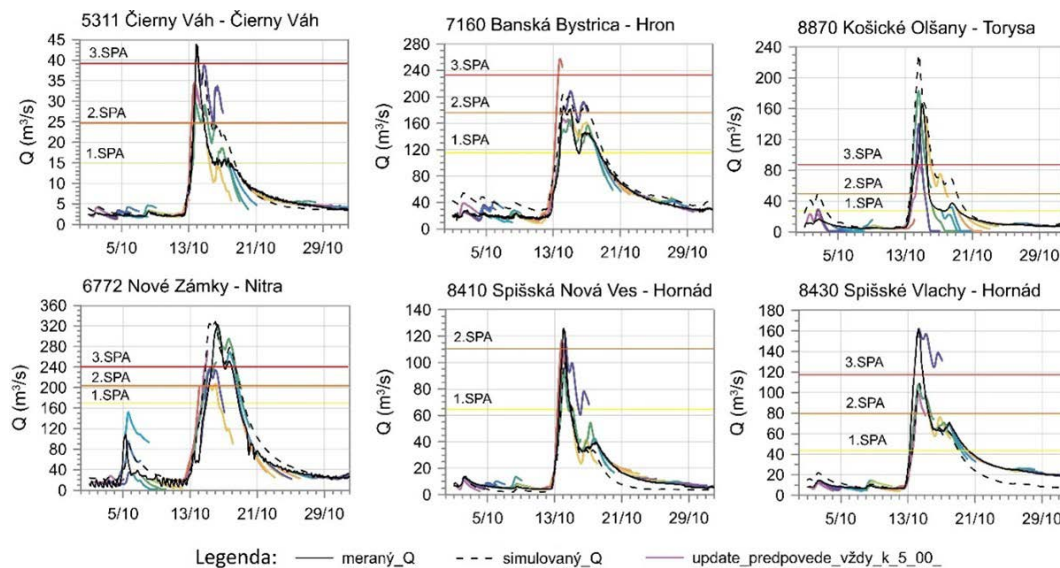
Letné búrkové obdobie je veľkou výzvou pre meteorologické a aj hydrologické predpovede. V letnom období júl až august 2020 boli v povodí hornej Tople, Toryse, Hnilci a na Poprade zaznamenané výrazné podhodnotenia predpovedaných úhrnov zrážok z modelu Aladin oproti reálne spadnutým v rozsahu 30–70 % meraných úhrnov zrážok (Obr. 10, povodie Torysy po VS Košické Olšany). Na iných povodiach boli naopak zaznamenané nadhodnotenia zrážok, niekde až dvojnásobné (Obr. 10, povodie Teplice po VS Sobotište). Takéto veľké odchýlky medzi predpovedanými a meranými úhrnmi zrážok nie sú počas letných búrok výnimočné. Búrky sa vyznačujú prevažne vysokými úhrnmi zrážok, ktoré spadnú za krátky čas na pomerne malom území. Úhrny zrážok môžu byť v priestore veľmi odlišné často aj vo veľmi malej vzdialenosti. Preto predpoveď ich presnej lokalizácie a času výskytu je náročnou úlohou a stále veľkou výzvou.

Obrázok 5. Mesačné klimatické úhrny zrážok (mm) v mesiacoch september až december 2020 (v poradí a) až d)).
Figure 5. Monthly climatic precipitation totals (mm) for September to December 2020 (in order (a) to (d)).



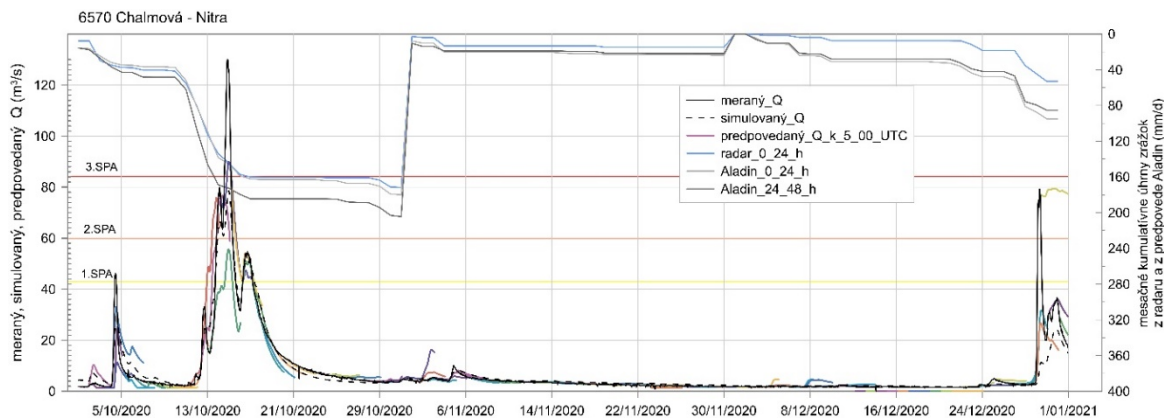
Obrázok 6. Ukážka niekoľkých predpovedných profilov s meranými, simulovanými a predpovedanými prietokmi v októbri 2020. V obrázku sú vyznačené aj stupne povodňovej aktivity (SPA).

Figure 6. Example of several forecast gauging stations with measured, simulated and forecasted discharges during the flood event in October 2020. The flood alert levels (SPA) are also indicated in the figure.



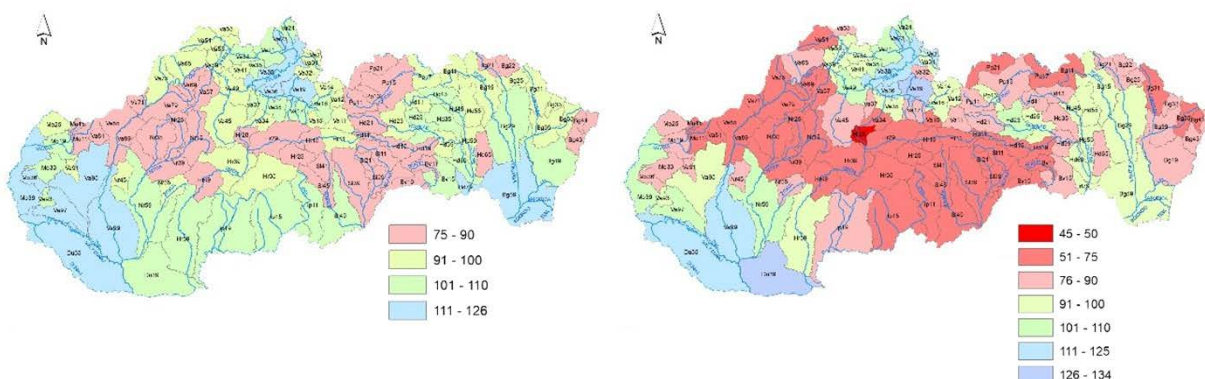
Obrázok 7. Merané, simulované a predpovedané prietoky a mesačné kumulované úhrny zrážok z radaru a z predpovede Aladin na dnes (0–24 h) a na zajtra (24–48 h) pre stanicu Chalmová - Nitra (VS 6570) pre obdobie 1.10.–31.12.2020. V obrázku sú vyznačené aj stupne povodňovej aktivity (SPA).

Figure 7. Measured, simulated and forecasted discharges and monthly cumulative precipitation totals from radar and Aladin forecasts for today (0–24 h) and tomorrow (24–48 h) for the station Chalmová - Nitra river for the period 1.10.–31.12.2020. The flood alert levels (SPA) are also indicated in the figure.



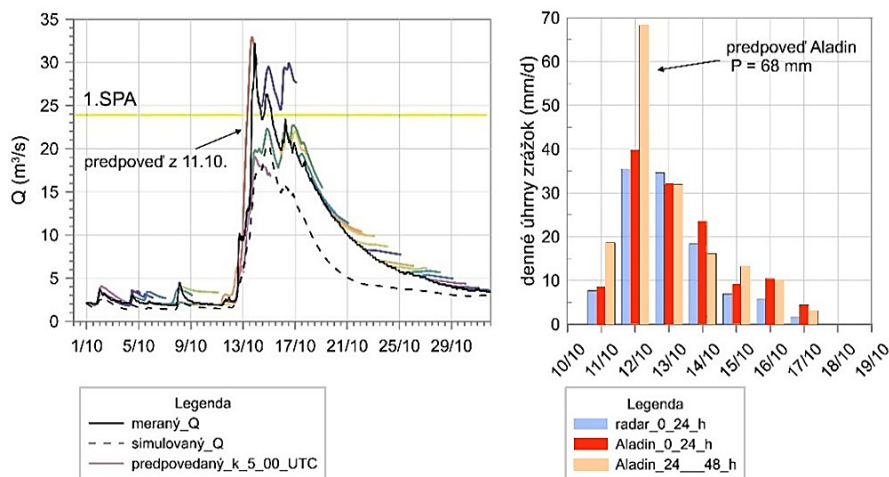
Obrázok 8. Podielové mapy (v %) priemerných mesačných úhrnov zrážok na povodie vypočítaných z radarových odhadov a z klimatických máp, vľavo október 2020, vpravo december 2020.

Figure 8. Proportion maps (%) of average monthly precipitation per catchment calculated from radar estimates and climate maps, on the left October 2020, on the right December 2020.



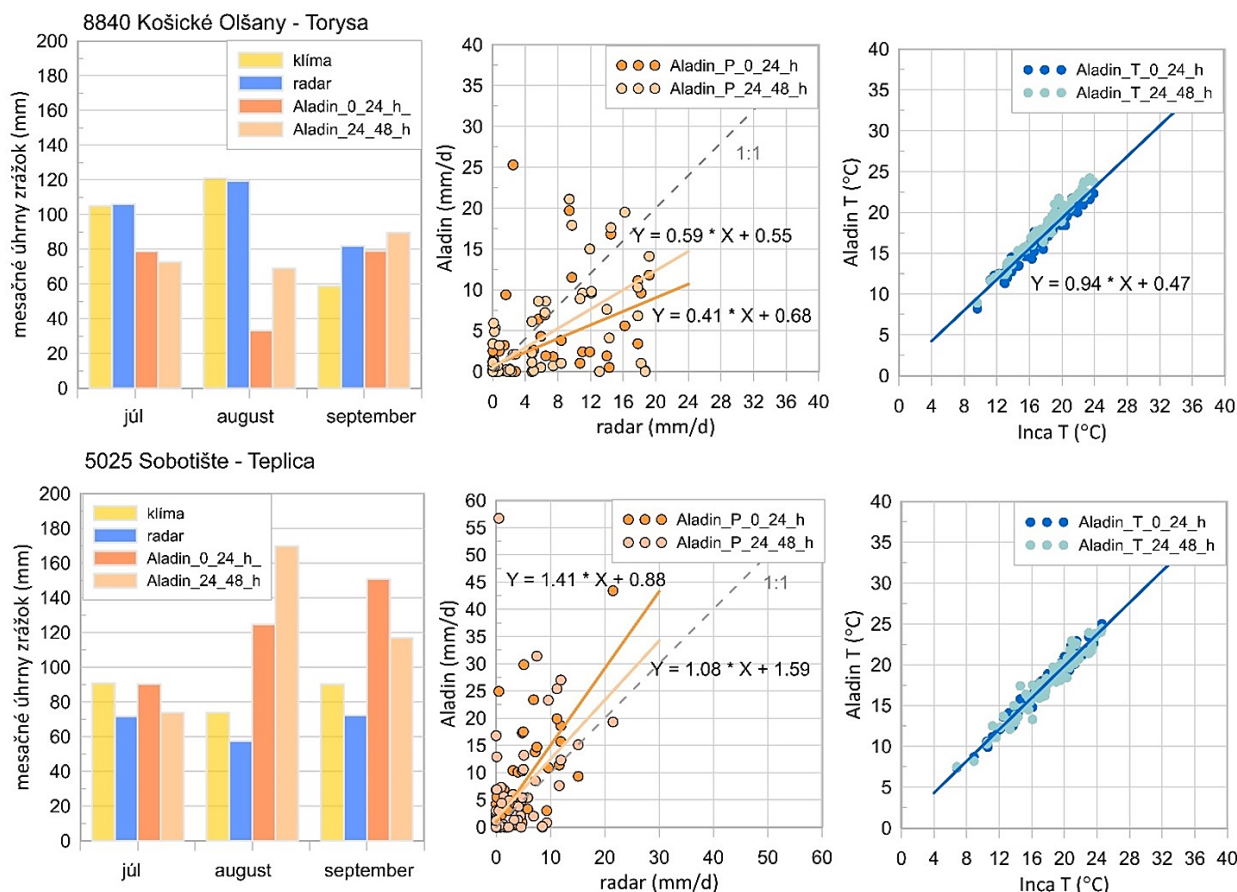
Obrázok 9. Merané, simulované a predpovedané prietoky pre VS 7045 Hronec - Čierny Hron (vľavo), denné úhrny radarových a predpovedaných zrážok z modelu Aladin na dnes (0–24 h) a na zajtra (24–48 h) v mesiaci október 2020 pre povodie Čierneho Hrona po Hronec.

Figure 9. Measured, simulated and forecasted discharges for the station Hronec - river Čierny Hron (on the left), daily radar and predicted precipitation totals from the Aladin model for today (0–24 h) and tomorrow (24–48 h) in the month of October 2020 for the basin of Čierny Hron up to the station Hronec.



Obrázok 10. Mesačné úhrny zrážok (obr. vľavo), denné úhrny zrážok z radaru v porovnaní s predpoveďanými zrážkami z modelu Aladin na 1. deň (0–24 h) a Aladin na 2. deň (24–48 h) (obr. v strede), aktuálne priemerné denné teploty vzduchu z produktu Inca v porovnaní s predpoveďanými teplotami z modelu Aladin (obr. vpravo) vyhodnotené pre dve povodia v období 1. 7. – 30. 09. 2020.

Figure 10. Monthly precipitation totals (Fig. on the left), daily precipitation totals from radar compared to forecasted precipitation from the Aladin model for day 1 (0–24 h) and Aladin for day 2 (24–48 h) (Fig. in the center), actual mean daily air temperatures from the Inca product compared to forecasted temperatures from the Aladin model (Fig. on the right) evaluated for the two watersheds of Torysa and Teplica rivers for the period from the 1st of July to the 30rd of September 2020.



ZÁVERY

Tvorba kvalitných hydrologických predpovedí má neoceniteľný význam pre skoré vydávanie hydrologických výstrah na povodňové situácie, ktoré sú spojené najmä s trvalými zrážkami alebo topiacim sa snehom. Základom sú spoľahlivé meteorologické a hydrologické vstupy, či už merané alebo predpovedané, ako aj robustný a flexibilný, dobre nakalibrovaný hydrologický model.

Vo fyzicko-geografických podmienkach Slovenska platí, že väčšina predpovedných profilov uzatvára povodia, ktoré ležia v pramenných oblastiach riek. To znamená, že pri zachovaní doby predstihu vydávanej predpovede (48 hodín) väčšina objemu odtoku pochádza zo zrážok, ktoré sa ešte reálne nevyskytli a sú obsiahnuté v meteorologickej predpovedi zrážok. To je dôvod, prečo sa kvantitatívna predpoveď zrážok považuje u odbornej verejnosti za najväčší zdroj neistôt pri tvorbe hydrologických predpovedí. To má aj praktické dôsledky pre protipovodňovú ochranu miest a obcí. Napríklad v prípade Banskej Bystrice extrémne povodňové vlny postupujúce po toku z Horehronia ne-

poskytujú dostatok času na realizáciu protipovodňových opatrení (osádzanie mobilných stĺpikov a hradenia). Prevádzkovateľ stavby bude musieť reagovať nielen na základe aktuálnej hydrometeorologickej situácie, ale najmä na základe jej predpovede. Meteorologické predpovede atmosférických zrážok a teploty vzduchu a ich transformácia na predpokladaný odtok pomocou hydrologického modelu predlži čas potrebný na realizáciu protipovodňových opatrení. Inými slovami, v procese rozhodovania bude veľký dôraz kladený na kvalitu meteorologickej a hydrologickej predpovede s dobou predstihu dlhšou, ako je postupová doba povodňovej vlny.

Na Odbore Hydrologické predpovede a výstrahy SHMÚ sa hodnotia hydrologické predpovede pre 53 vodomerných profilov 4-krát za rok a jedno komplexné hodnotenie sa realizuje pre hodnotené vodomerné profily raz za rok. Cieľom je kvantifikovať jednotlivé zdroje neistoty, ktoré sú neoddeliteľnou súčasťou hydrologických predpovedí. Z hodnotení potom vyplývajú pre každú hodnotenú stanicu (povodie) odporúčania, ako napr. potreba rekalibrácie hydrologického modelu ako celku, prípadne iba pre

špecifické situácie (napr. obdobie vysokých / nízkych prietokov, zimné obdobie s topením snehu a pod.). Dôležitým prínosom je spätná väzba zasielaná kolegom na Odbore dištančných meraní, ktorí sú zodpovední za merané údaje o zrážkach z radarov vstupujúcich do hydrologických modelov. Prínosom by mohlo byť aj využitie výsledkov zasielaných ako spätná väzba pre ďalší rozvoj modelov predpovede počasia pre náš región, napr. pre model ALADIN, na ktorého vývoji sa priamo podieľajú aj niektorí kolegovia z SHMÚ.

Podakovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-19-0340. Autori ďakujú celému kolektívu na Odbore Hydrologické predpovede a výstrahy v Bratislave a na Odboroch Hydrologické monitorovanie, predpovede a výstrahy v Banskej Bystrici, Žiline a Košiciach, ktorí sa podieľajú na hodnotení hydrologických modelov.

LITERATÚRA

- Alfieri, L.–Pappenberger, F.–Wetterhall, F.–Haiden, T.–Richardson, D.–Salamon, P., 2014, Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe, *J. Hydrol.*, 517 913–922, doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.035.
- Bergström, S., 1992, *The HBV model - its structure and applications*, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, SMHI Reports Hydrology, RH No. 4, Norrköping, 32 pp.
- Danáčová, M.–Földes, G.–Labat, M.M.–Kohnová, S.–Hlavčová, K., 2020, Estimating the Effect of Deforestation on Runoff in Small Mountainous Basins in Slovakia, *Water*, 12, 3113; doi:10.3390/w12113113.
- Hlavčová, K.–Kohnová, S.–Borga, M.–Horvát, O.–Šťastný, P.–Pekárová, P.–Majerčáková, O.–Danáčová, Z., 2016, Post-event analysis and flash flood hydrology in Slovakia, *J. Hydrol. Hydromech.*, 64(4), 304–315, doi: 10.1515/johh-2016-0041.
- Hrušková, K.–Kyselová, D.–Borsányi, P., 2019, Scenáre možného vývoja odtoku v povodí horného Hrona po Banskú Bystricu. In: *Manažment povodí a extrémne hydrologické javy 2019*, ZZVH, 8.-9.10.2019, Vyhne, ISBN 978-80-570-1236 [USB Flash Disk].
- Knoben, W.J.M.–Freer, J.–Woods, R.A., 2019, Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 4323–4331, doi.org/10.5194/hess-23-4323-2019.
- Krajčí, P.–Danko, M.–Hlavčo, J.–Kostka, Z.–Holko, L., 2016, Experimental measurements for improved understanding and simulation of snowmelt events in the Western Tatra Mountains, *J. Hydrol. Hydromech.*, 64(4), 316–328, doi: 10.1515/johh-2016-0038.
- Liu, Y.–Gupta, H.V., 2007, Uncertainty in hydrologic modeling: toward an integrated data assimilation framework, *Water Resour. Res.*, 43 (7), W07401, doi.org/10.1029/2006WR005756.
- Lopez, M.G.–Crochemore, L.–Pechlivanidis, I.G., 2021, Benchmarking an operational hydrological model for providing seasonal forecasts in Sweden, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 1189–1209.
- Renard, B.–Kavetski, D.–Thyer, M.–Kuczera, G.–Franks, S., 2009, Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors, *Water Resour. Res.*, American Geophysical Union, 46, 78 p., doi.org/10.1029/2009WR008328.
- Sleziak, P.–Szolgay, J.–Hlavčová, K.–Duethmann, D.–Parajka, J.–Danko, M., 2018, Factors controlling alterations in the performance of a runoff model in changing climate conditions, *J. Hydrol. Hydromech.*, 66(4), 381–392, doi: 10.2478/johh-2018-0031.
- Széles, B.–Parajka, J.–Hogan, P.–Silasari, R.–Pavlin, L.–Strauss, P.–Blösch, G., 2021, Stepwise prediction of runoff using proxy data in a small agricultural catchment, *J. Hydrol. Hydromech.*, 69(1), 65–75, doi: 10.2478/johh-2020-0029.
- Unduche, F.–Tolossa, H.–Senbeta, D.–Zhu, E., 2018, Evaluation of four hydrological models for operational flood forecasting in a Canadian Prairie watershed, *Hydrol. Sci. J.*, 63(8), 1133–1149, doi: 10.1080/02626667.2018.1474219.

Internetové zdroje

- Bulletin meteorológia a klimatológia Slovenská republika 2020, 26(10), Slovenský hydrometeorologický ústav, Odbor Klimatologická služba, ISSN 1338-7170, dostupné na: <https://www.shmu.sk/sk/?page=1613>.
- Povodňová situácia na tokoch v povodí Nitry a dolného Váhu v októbri 2020, SHMÚ, Odbor hydrologické predpovede a výstrahy, 2020, dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy.
- Povodne z trvalého dažďa v povodí Hrona, Ipl'a, Slanej a Rimavy v októbri 2020, SHMÚ, Odbor hydrologické monitorovanie, predpovede a výstrahy Banská Bystrica, 2020, dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy.
- Povodňová situácia na východnom Slovensku v októbri 2020, SHMÚ, Odbor hydrologické monitorovanie, predpovede a výstrahy Košice, 2020, dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy.
- Povodňová situácia na tokoch v povodí horného a stredného Váhu v októbri 2020, SHMÚ, Odbor hydrologické monitorovanie, predpovede a výstrahy Žilina, 2020, dostupné na: https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy.
- Správa o povodniach za rok 2020, SHMÚ, Centrum predpovedí a výstrah, Odbor Hydrologické predpovede a výstrahy, 129 p., dostupné na: [https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy#2021%20\(ro%C4%8Dn%C3%ADk%201\)](https://www.shmu.sk/sk/?page=1&id=pov_spravy#2021%20(ro%C4%8Dn%C3%ADk%201)).

ASPEKTY KALIBRÁCIE ZRÁŽKOVO-ODTOKOVÉHO MODELU NIEKOĽKÝCH PRAMENNÝCH POVODÍ S RÔZNYM ODTOKOVÝM REŽIMOM PRE POTREBY OPERATÍVNEJ HYDROLÓGIE

SAMUEL BACÁK¹, HANA HLAVÁČIKOVÁ², KATEŘINA HRUŠKOVÁ²

¹ Meteopress spol. s r.o.

² Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

The paper deals with the calibration of the HBV rainfall-runoff model for six Slovak river basins, selected on the basis of different runoff regimes. The aim of the calibration, which was carried out for the period from 1 August 2016 to 31 December 2019, was searching for an optimal set of parameters that could improve the simulations and predictions of a hydrological model whose important input was a qualitatively new compound rainfall product. In the paper, a sensitivity analysis of the model parameters was also performed, according to which the 4 most sensitive and 4 least sensitive parameters were evaluated. The calibration period was also divided into winter and summer seasons, for which calibrations were made, as well as their cross-validations. The parameters obtained from the whole calibration period were also suitable for the sub-periods in most cases. The applicability of the parameters obtained separately from the summer and winter seasons is determined by the specific conditions of these seasons and will be investigated in the future for their applicability in similar situations.

Príspevok sa zaoberá kalibráciou zrážkovo-odtokového modelu HBV na šiestich povodiach Slovenska, vybraných na základe rôznych odtokových režimov. Cieľom kalibrácie, ktorá prebiehala na období od 1. 8. 2016 do 31. 12. 2019, bolo hľadanie optimálnej sady parametrov, ktorá by mohla zlepšiť simulácie a predpovede hydrologického modelu, ktorého dôležitým vstupným údajom bol kvalitatívne nový zlúčený zrážkový produkt. V príspevku bola robená aj citlivosť analýza parametrov modelu, podľa ktorej boli vyhodnotené 4 najcitlivejšie a 4 najmenej citlivé parametre. Kalibračné obdobie bolo tiež rozdelené na zimné a letné sezóny, na ktorých boli robené kalibrácie, ale aj ich vzájomné validácie. Parametre získané z celého kalibračného obdobia boli vhodné vo väčšine prípadov aj pre čiastkové obdobia. Využitelnosť parametrov získaných z letných a zimných sezón je determinovaná špecifickými podmienkami týchto období a bude v budúcnosti skúmaná pre ich aplikovateľnosť v podobných situáciách.

Key words: recalibration, HBV model, sensitivity analysis, summer and winter periods

ÚVOD

Modelovanie extrémnych prejavov hydrologického cyklu, akými sú povodne, si vyžaduje kvalitné meteorologické vstupy. Z tohto pohľadu sú rozhodujúce atmosférické zrážky. V rámci projektu Povodňový varovný a predpovedný systém (POVAPSYS) bola v rokoch 2013 až 2016 dobudovaná rádiolokačná sieť. Dva radary boli zrekonštruované (Malý Javorník a Kojšovská hoľa) a dva novo vybudované (Kubínska hoľa a Španí laz).

Počas riešenia projektu POVAPSYS boli nakalibrované aj hydrologické modely HBV a HEC-HMS. Na kalibráciu boli použité údaje zo zrážkomernej siete SHMÚ za obdobie 2009–2013. Nakoľko oba hydrologické modely kontinuálne počítajú vodnú bilanciu, potrebujú pre svoj chod neustále, okrem meteorologických predpovedí, aj analýzu nameraných údajov teploty vzduchu a atmosférických zrážok. Od apríla 2015, kedy boli hydrologické modely nasadené do operatívnej prevádzky, vstupovali do modelov údaje o teplote vzduchu a atmosférických zrážkach zo systému INCA. Od polovice mája 2019 sa využíva pre vytvorenie zrážkových vstupov zlúčená informácia založená na analýze rádiolokačných meraní kombinovaných s nameranými údajmi z pozemnej siete automatických zrážkomerných staníc (ďalej označená ako qPrec). Používa sa tak kvalitatívne odlišná informácia, než ktorá bola použitá na samotnú kalibráciu hydrologických mo-

delov. Preto Odbor Hydrologické predpovede a výstrahy (OHPaV) SHMÚ pristúpil v roku 2019 k postupnej kalibrácii (ďalej označovanej ako rekalkibrácia modelu) oboch hydrologických modelov pre všetky predpovedné profily. Zrážkové vstupy pre OHPaV pripravuje Odbor Dištančných meraní. V príspevku sa zaoberáme rekalkibráciou zrážkovo-odtokového modelu HBV pre šesť vybraných predpovedných profilov.

Model HBV je švédsky semi-distribúovaný koncepčný hydrologický model pre výpočet odtoku vody z povodí (Bergström, 1992). Ako primárne hydrologické jednotky využíva subpovodia a v rámci nich výškové členenie a klasifikáciu využitia krajiny (les, otvorená oblasť, jazerá). Hlavnými vstupnými údajmi, okrem charakteristík povodia, sú úhrny zrážok, teplota vzduchu a potenciálna evapotranspirácia. Povodia môžu byť rozdelené do subpovodí, výškových a vegetačných zón. Model obsahuje niekoľko samostatných modulov pre výpočet akumulácie a topenia snehu teplotnou metódou (degree-day method, Rango a Martinec, 1995), pôdny modul pre výpočet pôdnej vlhkosti a evaporácie, modul transformácie odtoku, ktorý je reprezentovaný dvomi nádržami pre rýchly podpovrchový a pomalý podzemný odtok a transformačnú funkciu, ktorá transformuje jednotlivé zložky odtoku na celkový odtok v záverovom profile modelovaného sub-povodia. Pri spojení viacerých sub-povodí sa používa jednoduchá transformačná rovnica pre transformáciu vody v riečnom koryte.

HBV model bol vyvinutý Stenom Bergströmom začiatkom 70. rokov 20. storočia pre hydrologické predpovede určené primárne pre potreby vodných elektrární a odvtedy bol niekoľkokrát modifikovaný (Bergström, 1976, 1992). Jeho využitie bolo mnohokrát dokumentované nielen pre hydrologické predpovede v operatívnej hydrológii (Arheimer et al., 2011), ale aj pre vedecké účely, ako napr. pre výskum vplyvu klimatickej zmeny (Driessen et al., 2010; Kopáčiková et al., 2020), zmeny v zásobách snehu a ich vplyv na sezónnosť prietokov (Jeníček a Ledvinka, 2020).

Model je úspešne celosvetovo používaný už takmer 50 rokov, v rôznych verziách, operatívnych a vedeckých úlohách. Pre účely štúdia je známy vo voľne dostupnej upravenej verzii ako HBV Light (Seibert a Vis, 2012). Počet publikácií, ktoré sa týkajú použitia HBV modelu neustále rastie a v roku 2020 dosiahol 60 publikácií za rok. Prečo je HBV model taký populárny? Medzi jeho prednosti patrí jednoduchosť, napriek ktorej model dokáže obstáť aj v silnej konkurencii zložitejších distribuovaných modelov. Optimálny počet 15 kalibrovaných parametrov zabraňuje nadmernej parametrizácii modelu, čo je tiež jeho prednosťou. Nebolo zistené, že by pri vyššom počte kalibrovaných parametrov dokázal významne lepšie simulovať merané prietoky (Seibert a Bergstrom, 2021). Vo verzii 6.4 s užívateľským rozhraním IHMS, Integrated Hydrological Modelling System, je používaný na Odbore hydrologických predpovedí a výstrah SHMÚ. Pre účely operatívnej hydrologickej služby bol kalibrovaný v hodinovom kroku.

Cieľom tohto článku je: 1/ porovnanie výsledkov rekalibrácie modelu HBV na šiestich povodiach s rozdielnym odtokovým režimom, 2/ identifikácia najviac a najmenej citlivých parametrov modelu pre jednotlivé povodia, 3/ hľadanie špecifickej sady parametrov zvlášť pre letné

obdobie s prevládajúcimi privalovými zrážkami a evapotranspiráciou a pre zimné obdobie s akumuláciou a topením snehu a či tieto sady parametrov môžu výrazne zlepšiť výsledky simulácií, a tým aj predpovedí. Cieľom bolo aj hľadanie odpovede na otázky či je možné nájsť určitú podobnosť parametrov pre povodia s podobným odtokovým režimom, teda pre vysokohorské, stredohorské a nížinné.

Rekalibrácia modelu HBV na 6 vybraných povodiach Slovenska prebiehala v prvej fáze na celom období od 1. 8. 2016 do 31. 12. 2019, následne na jednotlivých letných a zimných obdobiach zvlášť.

METODIKA

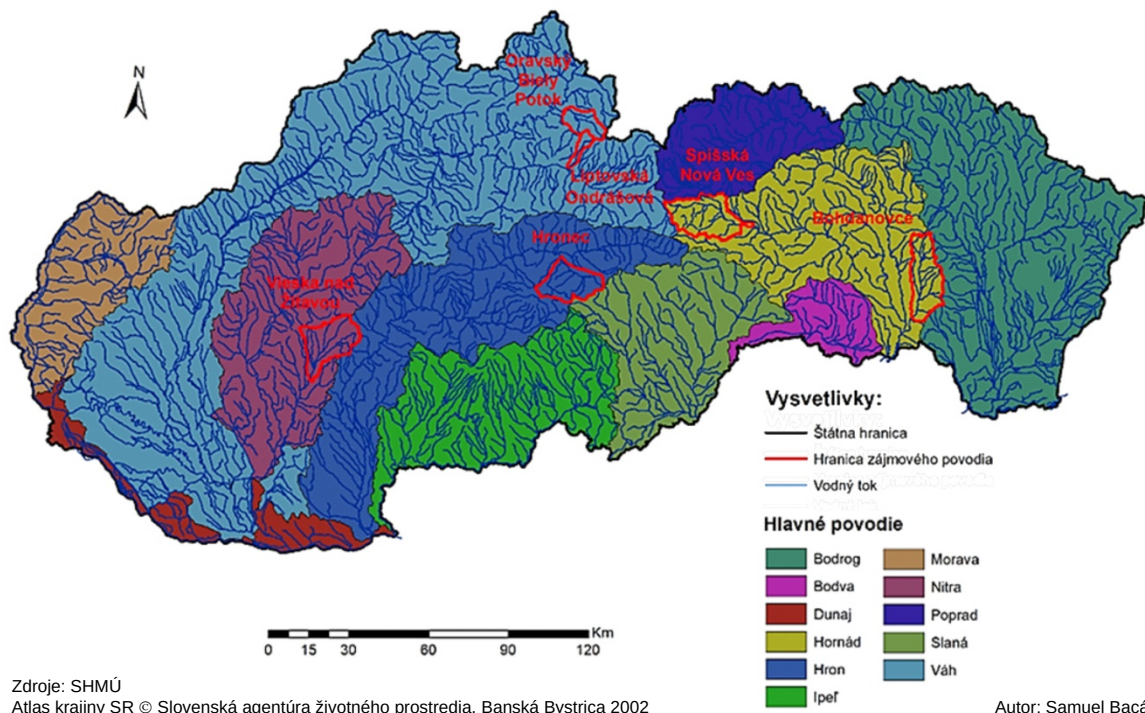
Poznanie geomorfologických a hydrologických charakteristík povodí, ako aj odtokových procesov, prebiehajúcich v daných povodiach, je vo všeobecnosti dôležitým predpokladom pre posúdenie výsledkov kalibrácií hydrologického modelu.

Výber povodí

Vybrané boli povodia, pre ktorých záverové profily Odbor Hydrologické predpovede a výstrahy (OHPaV) SHMÚ vydáva hydrologické predpovede. Kritériom výberu bola Dubova klasifikácia odtokového režimu na základe zimného a letného odtoku, ako aj vodnosť pre kalibračné obdobie od 1.8.2016 do 31.12.2019. Dub (1963) rozdelil povodia Slovenska na základe podielu odtoku zimného polroka na ročnom na vysokohorské (do 50 %), stredohorské (od 50 do 60 %) a pahorkatinné až nížinné (nad 60 %). Spolu bolo na základe uvedenej klasifikácie vybraných 6 povodí (Obr. 1), pričom bolo zohľadnené aj ich rovnomerné rozmiestnenie v rámci Slovenska.

Obrázok 1. Poloha záujmových povodí v rámci hlavných povodí Slovenska.

Figure 1. Location of river catchments studied within the main Slovak river basins.



Tabuľka 1. Vybrané morfometrické a hydrologické charakteristiky záujmových povodí.

Table 1. Selected morphometric and hydrological characteristics of the catchments.

Typ povodia (Dub)		Nížinné		Stredohorské		Vysokohorské	
Záverový profil		Vieska nad Žitavou	Bohdanovce	Hronec	Spišská Nová Ves	Oravský Biely Potok	Liptovská Ondrašová
Tok		Žitava	Oľšava	Čierny Hron	Hornád	Studený potok	Jalovský potok
Plocha povodia	[km ²]	289,5	306,1	239,4	336,5	118,1	45,0
Priemerný sklon toku	[%]	13,4	11,9	18,6	11,4	34,5	87,4
Priemerná nadm. výška povodia	[m n. m.]	394,3	429,9	812,7	816,8	1097,8	1169,6
Charakter tvaru povodia		Vejárovité	Pretiahnuté	Vejárovité	Pretiahnuté	Pretiahnuté	Pretiahnuté
Podiel lesnatosti	[%]	54,7	47,5	87,6	66,9	62,3	38,5
Priemerný ročný úhrn zrážok	[mm]	720	681	881	787	1225	1242
Priemerný ročný odtok	[mm]	171	466	382	571	811	733
Špecifický odtok	[l.s ⁻¹ .km ⁻²]	5,0	5,5	12,1	8,4	26,0	23,0
Priemerný ročný prietok	[m ³ .s ⁻¹]	1,601	1,683	2,898	2,818	3,033	1,045

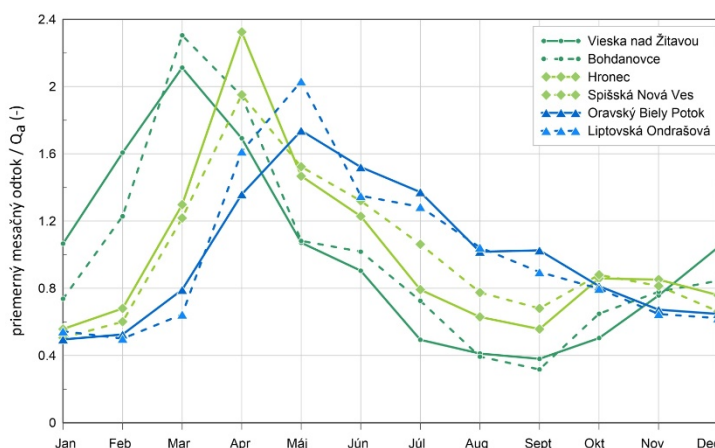
Charakteristika povodí

Z dostupných hydrologických údajov SHMÚ boli zhodnotené dlhodobé (1961–2000) hydrologické charakteristiky vybraných povodí. Morfometrické charakteristiky povodí boli vyhodnotené pomocou programu ArcGIS a spolu s hydrologickými charakteristikami povodí sú uvedené v Tab. 1 a na Obr. 2.

Ročné rozdelenie odtoku (Obr. 2) vykazuje pre jednotlivé typy povodí charakteristické znaky. V nížinných povodiach dosahuje odtok maximálne hodnoty na začiatku jari v marci, následne klesá až k minimu na konci leta a začiatku jesene (august–september). V stredohorských povodiach sa vyskytuje maximum odtoku na jar v apríli. V ďalších mesiacoch odtok z povodí klesá až k minimu na začiatku jesene v septembri. V jesenných mesiacoch (október–november) je vidieť prechodný vzostup odtoku s následným poklesom a druhotným minimom v zimných mesiacoch z dôvodu tvorby snehových zásob. Vysokohorské povodia sa v dôsledku oneskoreného topenia sa snehu vyznačujú posunom maximálneho odtoku do neskorej jari v máji. Nasleduje pokles odtoku s minimom v zimných mesiacoch, kedy sa zrážky akumulujú v snehovej pokrývke.

Obrázok 2. Priemerný mesačný odtok v analyzovaných povodiach vyjadrený ako podiel dlhodobého priemerného odtoku Q_a v danom povodí.

Figure 2. Mean monthly runoff curves for the analysed catchments normalized to the long-term average annual flow (Q_a).



Model HBV a jeho parametre

Švédsky zrážkovo-odtokový model HBV je semi-distribovaný koncepčný hydrologický model s jednoduchou štruktúrou (Bergström, 1992). Skladá sa z týchto hlavných komponentov: snehového modulu, modulu pôdnej vlhkosti, funkcie odozvy (pre generovanie odtoku) a z transformačného modulu. Vstupnými údajmi do modelu sú atmosférické zrážky, teplota vzduchu a potenciálna evapotranspirácia v požadovanom časovom kroku. Ostatné verzie modelu však môžu vyžadovať viac vstupných údajov pre snehový modul (Bergström, 1992). V rámci geografických charakteristík vstupujú do modelu plocha povodia (km²), priemerná nadmorská výška jednotlivých subpovodí, počet, plocha a priemerná nadmorská výška jednotlivých výškových zón subpovodí spolu s využitím územia (les, otvorená plocha, vodná plocha).

Model je vo verzii IHMS 6.4 používaný na Odbore hydrologické predpovede a výstrahy SHMÚ. Pre účely operatívnej hydrologickej služby bol kalibrovaný v hodinovom kroku. Parametre, ktoré ovplyvňujú objem odtoku sú predovšetkým: všeobecný korekčný faktor zrážok (PCORR), korekčný faktor kvapalných zrážok (RFCF), korekčný faktor snehových zrážok (SFCF), maximálna vodná kapacita pôdy (FC). Parametre snehového modulu sú: kritická teplota vzduchu (TT), ktorej podkročením dochádza k akumulácii snehu, DTTM spolu s parametrom TT určuje teplotu, pri ktorej dochádza k topeniu snehu, teplotný faktor (CFMAX) determinuje intenzitu topenia snehu. Parametre pôdneho modulu sú: už spomínaný objemový parameter FC, LP určuje, pri akej pôdnej vlhkosti dosiahne aktuálna evapotranspirácia jej maximálnu potenciálnu hodnotu, BETA určuje podiel zrážok, ktoré prispievajú k objemu odtoku z pôdneho modulu alebo k objemu pôdnej vlhkosti, CFLUX určuje maximálnu intenzitu kapilárneho toku vody z hornej nádrže do pôdneho modulu, ECORR je korekčný faktor potenciálnej evapotranspirácie. Pôdne parametre spolu s korekčnými faktormi zrážok

najviac ovplyvňujú objem odtoku, ale priamo neovplyvňujú tvar prietokových vln. Funkcia odozvy je daná recesným koeficientom pre priamy odtok KHQ, stupňom nelinearity pre priamy odtok ALFA, recesným koeficientom pre základný odtok K4 a intenzitou presakovania vody z hornej do dolnej nádrže PERC. Funkcia odozvy prerozdeľuje generovaný odtok v čase. Uvedené parametre ovplyvňujú tvar prietokových vln, nie ich objem. KHQ a ALFA ovplyvňujú veľkosť kulminácií a následný tvar výtokovej čiary, K4 a PERC určujú sklon a veľkosť základného odtoku. Parameter MAXBAZ je parametrom transformačnej funkcie. Určuje, aká je reakcia povodia na príčinnú zrážku, teda celkový čas trvania priameho odtoku, z ktorého je zrejmé, či povodie reaguje na zrážky rýchlo, alebo pomaly. Prehľad 16 najdôležitejších parametrov, ako aj ich minimálne a maximálne hodnoty sú znázornené v Tab. 2. Bližšie informácie o jednotlivých parametroch a spôsobe ich výpočtu je možné nájsť v publikácii SMHI (2014).

Postup kalibrácie modelu na celom období kalibrácie

Pred samotnou kalibráciou modelu bola robená citlivostná analýza jednotlivých parametrov, ktorej cieľom bolo identifikovať pre každé povodie najcitlivejšie a najmenej citlivé parametre z pohľadu Nash-Sutcliffeovho koeficientu. Zrážkovo-odtokové modely sa štandardne kalibrujú pomocou automatickej optimalizácie parametrov. Do modelu HBV implementovaný algoritmus automatickej kalibrácie

je podrobne popísaný v Lindström (1997). Samotná kalibrácia zahŕňala obdobie od 1.8.2016 do 31.12.2019. Štatistika výkonnosti modelu vyjadrená koeficientom Nash-Sutcliffe, rozdiely kumulatívnych objemov simulovaných a meraných prietokov (tzv. objemová chyba), ako aj vizuálne porovnanie meraných a simulovaných prietokov, simulované zásoby vody v snehu a priebeh pôdnej vlhkosti boli dôležitými faktormi pre posúdenie dobrého výsledku kalibrácie. Následne, pomocou manuálnej úpravy parametrov sa vykonalo tzv. doladenie modelu s dôrazom na zachytenie väčších prietokových udalostí. Vstupnými údajmi pre modelovanie boli hodinové úhrny zrážok získané z produktu qPrec zlúčenej radarovej informácie a priemerné hodinové teploty vzduchu zo systému INCA. Obidva meteorologické prvky boli vyjadrené ako priemery na povodie. Pre porovnanie simulovaných prietokov s meranými boli použité režimové prietoky v hodinovom kroku pre jednotlivé záverové vodomerné profily.

Postup kalibrácie modelu v čiastkových letných a zimných sezónach

Aby bolo možné overiť, či existuje optimálna sada parametrov osobitne pre letné a zimné obdobie a zároveň, či bude poskytovať aj lepšie výsledky, kalibrovali sme model aj na týchto čiastkových obdobiach. Následne sme pri každom povodí validovali parametre tzv. krížovou validáciou z jedného obdobia na ostatných (Tab. 3).

Tabuľka 2. Prehľad parametrov modelu HBV.

Table 2. The overview of the HBV model parameters.

	Označenie	Popis parametra	Jednotky	Odporúčaný rozsah
Korekčné faktory zrážok	PCORR	korekčný faktor zrážok	-	0,8 – 1,2
	RFCF	korekčný faktor kvapalných zrážok	-	0,8 – 1,3
	SFCF	korekčný faktor snehových zrážok	-	0,7 – 1,4
Parametre snehového modulu	TT	kritická teplota vzduchu pre akumuláciu snehu	°C	-2 až 2
	DTTM	spolu s parametrom TT kritická teplota pre topenie snehu	°C	-2 až 2
	CFMAX	teplotný faktor	mm.°C ⁻¹ .deň ⁻¹	2 – 5
Parametre pôdneho modulu	FC	maximálna vodná kapacita pôdy	mm	50 – 400
	LP	hraničná hodnota pôdnej vlhkosti, kedy aktuálna evapotranspirácia dosiahne hodnotu maximálnej, potenciálnej evapotranspirácie	-	0,5 – 1
	BETA	parameter odtokovej funkcie	-	1 – 4
	CFLUX	intenzita kapilárneho toku vody z hornej nádrže do pôdy	mm.deň ⁻¹	0 – 2
	ECORR	korekčný faktor potenciálnej evapotranspirácie	-	0,7 – 1,3
Parametre funkcie odozvy	KHQ	recesný koeficient pre priamy odtok	deň ⁻¹	0,005 – 0,5
	ALFA	stupeň nelinearity pre priamy odtok	-	0 – 1,5
	K4	recesný koeficient pre základný odtok	deň ⁻¹	0,001 – 0,1
	PERC	intenzita presakovania vody z hornej do dolnej nádrže	mm.deň ⁻¹	0,01 – 6
	MAXBAZ	parameter transformačnej funkcie	deň	0 – 7

Tabuľka 3. Postup pri sezónnej kalibrácii a následnej krížovej validácii.

Table 3. Seasonal calibration procedure and subsequent cross-validation.

	Čiastkové obdobie 1	Čiastkové obdobie 2	Čiastkové obdobie 3
Čiastkové obdobie 1	kalibrácia	validácia prvého obdobia na druhom	validácia prvého obdobia na treťom
Čiastkové obdobie 2	validácia druhého obdobia na prvom	kalibrácia	validácia druhého obdobia na treťom
Čiastkové obdobie 3	validácia tretieho obdobia na prvom	validácia tretieho obdobia na druhom	kalibrácia

Tabuľka 4. Čiastkové kalibračné obdobia vo vybraných povodiach.

Table 4. Partial calibration periods in selected catchments.

Typ povodia (Dub)		Nížinné		Stredohorské		Vysokohorské	
Záverový profil		Vieska nad Žitavou	Bohdanovce	Hronec	Spišská Nová Ves	Oravský Biely Potok	Liptovská Ondrašová
Tok		Žitava	Oľšava	Čierny Hron	Hornád	Studený potok	Jalovský potok
Kalibračné obdobia: 1. 8. 2016 – 31. 12. 2019							
Zima	2016 – 2017	1.11. – 15.4.		1.10. – 15.5.		1.10. – 15.6.	
	2017 – 2018	1.11. – 15.4.		1.10. – 15.5.		15.10. – 1.6.	
	2018 – 2019	1.11. – 15.4.		1.10. – 15.5.	1.10. – 25.5.	1.10. – 15.6.	
Leto	2017	15.4. – 1.11.		15.5. – 1.10.		15.6. – 15.10.	
	2018	15.4. – 1.11.		15.5. – 1.10.		1.6. – 1.10.	
	2019	15.4. – 1.11.		15.5. – 1.10.	25.5. – 1.10.	15.6. – 1.10.	

Tabuľka 5.
Výsledky citlivostnej analýzy podľa koeficientu Nash-Sutcliffe.

Table 5.
Results of the sensitivity analysis according to the Nash-Sutcliffe coefficient.

Predpovedný profil	Najcitlivejšie parametre				Najmenej citlivé parametre			
	1	2	3	4	4	3	2	1
Vieska nad Žitavou	RFCF	KHQ	FC	BETA	PERC	CFMAX	DTTM	K4
Bohdanovce	RFCF	KHQ	BETA	FC	SFCF	DTTM	K4	CFLUX
Hronec	KHQ	RFCF	TT	FC	ALFA	CFMAX	K4	LP
Spišská Nová Ves	KHQ	BETA	ALFA	RFCF	K4	TT	SFCF	CFLUX
Oravský Biely Potok	KHQ	FC	RFCF	MAXBAZ	DTTM	BETA	CFLUX	LP
Liptovská Ondrašová	KHQ	FC	TT	RFCF	DTTM	LP	ECORR	CFLUX

Leto a zima boli v povodiach rozdelené odlišne podľa výskytu simulovanej snehovej pokrývky za celé obdobie tak, aby v letnom období neboli vlny z topenia snehu. V horských povodiach tak bolo leto veľmi krátke (Tab. 4).

V ďalšom kroku boli na jednotlivých sezónach validované parametre odvodené pri rekalibrácii na celom období a dosiahnuté výsledky sa porovnali s výstupmi z čiastkových kalibrácií, resp. aj validácií.

Výsledky sezónnych kalibrácií a následných krížových validácií boli hodnotené nielen pomocou koeficientu Nash-Sutcliffe, ale aj vizuálne na základe grafických výstupov.

Hodnotenie výkonnosti modelu pomocou koeficientu Nash-Sutcliffe

Počas kalibrácie hydrologických modelov sa používajú rôzne kritériá výkonnosti modelu, ktoré vyjadrujú najlepšiu zhodu, tzv. „best fit“. Často používanou metrikou je Nash-Sutcliffe (NSE, Nash a Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2},$$

kde $Q_{sim}(t)$ je simulovaný odtok za čas t , $Q_{obs}(t)$ je pozorovaný odtok za čas t , $\overline{Q_{obs}}$ je priemerný pozorovaný odtok. $NSE = 1$ znamená dokonalú zhodu medzi simuláciami a pozorovaniami, $NSE = 0$ znamená, že modelové simulácie majú rovnakú vypovedaciu schopnosť ako priemer pozorovaní a $NSE < 0$ znamená, že model je horším prediktorom ako priemer pozorovaní. Koeficient NSE sa pohybuje v intervale od mínus nekonečna do 1 (Gupta et al., 2009). Hodnotenie štatistiky NSE jej rozdelením do

rôznych kategórií je veľmi orientačné. Môžeme ho rozdeliť napríklad na nasledovné kategórie (Moriassi et al., 2007): 1. 1 – 0,75 (veľmi dobré), 2. 0,75 – 0,65 (dobré), 3. 0,65 – 0,50 (uspokojivé), 4. < 0,50 (neuspokojivé).

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Rekalibrácia hydrologického modelu pre 6 vybraných povodí poskytuje výsledky citlivostnej analýzy parametrov modelu a výsledky samotnej rekalibrácie modelu pre celé modelované obdobie. Na záver sú uvedené výsledky kalibrácií z čiastkových letných a zimných sezón pre nížinné, stredohorské a vysokohorské povodia zvlášť.

Citlivostná analýza parametrov modelu

Najcitlivejším parametrom bol pre stredohorské a vysokohorské povodia identifikovaný parameter KHQ (Tab. 5). Tento parameter ovplyvňuje výšku kulminácií a následný tvar výtokovej čiary simulovaného hydrogramu (SMHI, 2012). Veľké rozdiely medzi meranými a simulovanými kulmináciami vln často spôsobovali výrazné zhoršenie výkonnosti modelu, vyjadreného pomocou Nash-Sutcliffe. Všetky povodia taktiež citlivo reagovali na zmenu parametra RFCF, čo svedčí o tom, že korekcia množstva tekutých zrážok významne ovplyvní výsledok simulácií v podobe systematickej chyby – nadhodnotí alebo podhodnotí simulovaný odtok. Parameter RFCF bol najcitlivejším parametrom u nížinných povodí. Okrem parametrov KHQ a RFCF patrili vo väčšine povodí medzi najcitlivejšie aj parameter FC, určujúci maximálnu vodnú kapacitu pôdy.

Podľa koeficientu účinnosti modelu Nash-Sutcliffe boli vyhodnotené aj 4 najmenej citlivé parametre. CFLUX

sa ukázal ako najmenej citlivý parameter až v troch povodiach po predpovedné profily: Liptovská Ondrašová, Spišská Nová Ves a Bohdanovce. Zmena tohto parametra, charakterizujúceho kapilárny tok vody z hornej odtokovej nádrže do pôdy, výsledok NSE vo väčšine prípadov ovplyvnila len minimálne. Celkovo reagovali veľmi slabo povodia aj na parametre LP (určujúceho limit pre potenciálnu evapotranspiráciu), K4 (sklon základného odtoku) a DTTM (začiatok topenia snehu).

Kalibrácia modelu za celé obdobie

Výsledky kalibrácie modelu HBV vo vybraných povodiach za obdobie od 1.8.2016 do 31.12.2019 sú v Tab. 6. Uvedená tabuľka prináša aj porovnanie s výsledkami validácie pôvodných parametrov odvodených pre obdobie 2009–2013, kedy základom pre výpočet plošných priemerov zrážkových vstupov boli údaje zo siete zrážkomerných staníc SHMÚ. Pre rekalibráciu boli použité zrážkové vstupy odvodené zo zlúčenej informácie radarových a pozemných meraní, ktoré v súčasnosti operatívna hydrológia v prevádzke používa. Pre dve povodňové udalosti počas septembra 2017 a júla 2018 boli vo vysokohorských povodiach po detailnej analýze zrážkovo-odtokových situácií korigované zrážky produktu qPrec. Výsledky rekalibrácií sú v Tab. 6 pre tieto povodia uvedené po korekcii zrážok, podobne aj výsledky kalibrácií a validácií počas čiastkových sezón v časti výsledkov Letné a zimné kalibrácie.

Ako je zrejmé z tabuľky 6, rekalibráciou sa podarilo zlepšiť predchádzajúce koeficienty NSE na všetkých šiestich povodiach. Najvýznamnejšia bola táto zmena na vodomernej stanici Hronec, kde táto hodnota predtým dosahovala len -0,84, pričom vylepšiť sa ju podarilo na 0,81. Ďalšia najvýznamnejšia zmena sa podarila pri Vieske nad Žitavou, kde predtým Nash-Sutcliffov koeficient dosahoval taktiež zápornú hodnotu. Pri Liptovskej Ondrašovej a Spišskej Novej Vsi nie sú tieto rozdiely až také veľké, no napriek tomu sa výsledok aj na týchto dvoch staniách o čosi zlepšil. Aj keď novozískané parametre po rekalibrácii ešte neboli validované aj na modelové predpovede, zlepšením týchto výsledkov očakávame tiež zlepšenie predpovedných schopností modelu HBV, aspoň čo sa týka uvedených šiestich povodí.

Okrem koeficientu NSE boli zhodnotené aj samotné priebehy meraných a simulovaných prietokov. Dôležité boli aj ďalšie premenné, ktoré model nasimuloval: vodná hodnota snehu, vlhkosť pôdy, zásoba vody v hornej a dolnej modelovej nádrži, predstavujúca rýchlu zložku povrchového a podpovrchového odtoku a pomalú zložku podzemného odtoku v podloží. Pre operatívnu hydrológiu je okrem iného veľmi dôležité, aby model dokázal dobre simulovať povodňové vlny, ktoré zodpovedajú stupňom povodňovej aktivity. Preto boli niektoré kalibrácie ešte dodatočne manuálne upravené s cieľom lepšej simulácie maximálnych prietokov aj za cenu zhoršenia koeficientu NSE.

Priebeh meraných, simulovaných prietokov, meraných zrážok, simulovanej vodnej hodnoty snehu (VHS) a meranej teploty vzduchu, simulovanej vlhkosti pôdy (Sm), simulovanej zásoby vody v hornej (Uz) a dolnej (Lz) modelovej nádrži vody pre jednotlivé vodomerné stanice je na obrázkoch 3 až 5. SPA označuje stupne povodňovej aktivity. Absolútne hodnoty simulovaných charakteristík, sú v značnej miere ovplyvnené nastavením kalibrovaných parametrov, preto nie je vhodné niektoré charakteristiky (napr. Sm, Uz, Lz) vzájomne medzi povodiami porovnávať. Ich priebeh (vzostupy/poklesy) sú však dôležitou informáciou o dynamike prebiehajúcich procesov a môžu naznačovať zmenu vodného režimu (podpovrchovej a podzemnej vody). Obr. 3 napríklad ukazuje, že zásoby vody v dolnej nádrži sa v stanici Vieska nad Žitavou s ich typickým priebehom dopĺňania na konci zimnej a začiatkom jarnej sezóny výrazne odlišujú od priebehu tejto charakteristiky v stanici Bohdanovce. Výsledky v Bohdanovciach indikujú kontinuálny pokles zásob vody v podloží, čo je nepriaznivý stav pre dané povodie. Prvé dve zimné sezóny tieto zásoby iba mierne zvýšili. Zásoby vody v snehu z tretej zimnej sezóny sa neprejavili výrazne ani v jarnej odtoku, ani v zvýšení zásob vody v dolnej nádrži. Príčinou môže byť vysoký výpar počas výskytu snehovej pokrývky (sublimácia) a na začiatku jari (vysoké kladné teploty vzduchu). Leto 2018 sa vyznačovalo veľmi nízkymi úhrnmi zrážok, čo ešte viac zhoršilo nepriaznivú situáciu v danom povodí. Stav zásob vody v podloží v povodí Oľšava si vyžaduje hlbšiu analýzu, napr. vlastností pôdných charakteristík a geologickej štruktúry povodia.

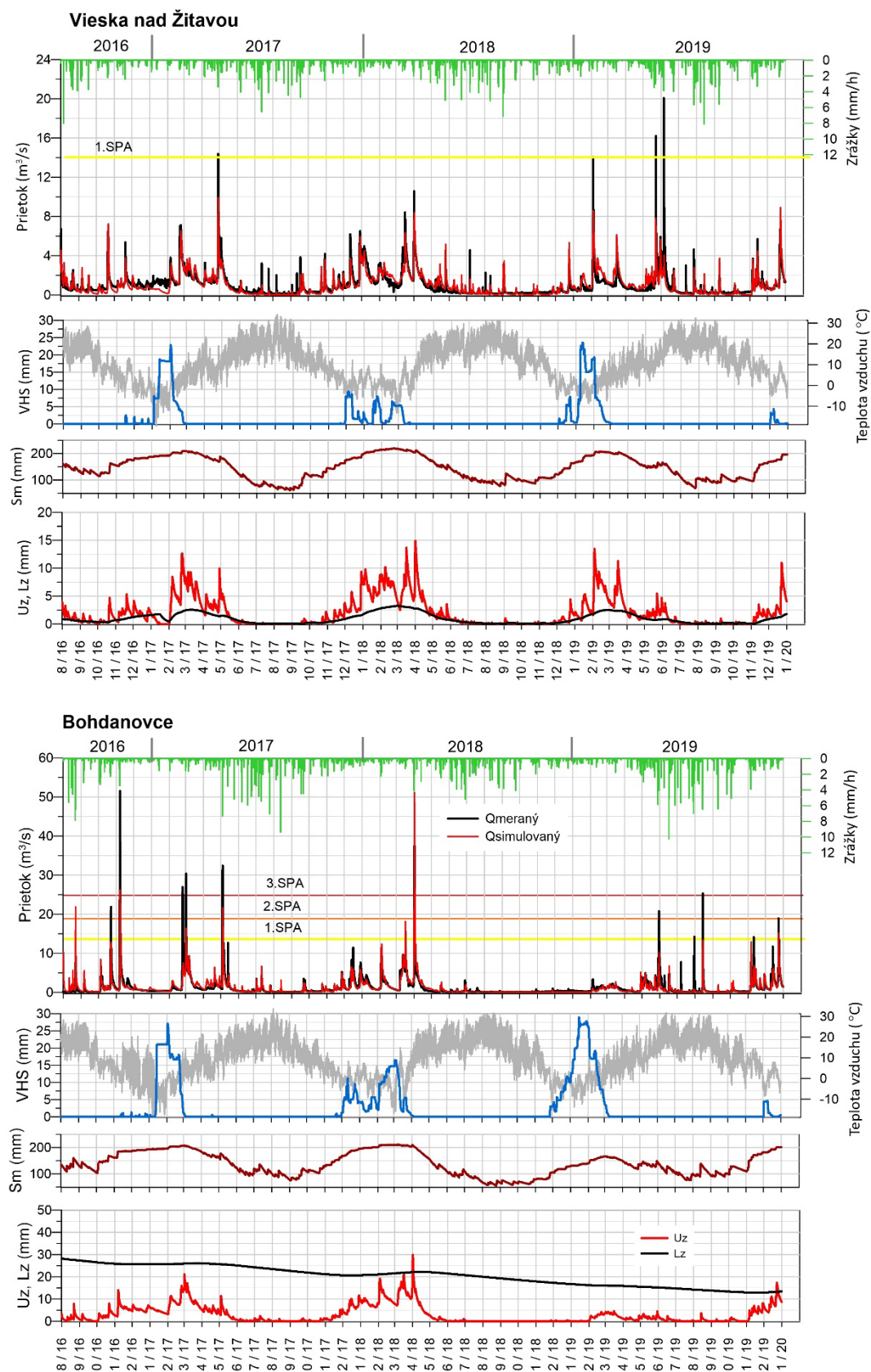
Tabuľka 6. Porovnanie validácie pôvodných parametrov s výsledkami rekalibrácie za obdobie 1.8.2016–31.12.2019 pomocou Nash-Sutcliffova koeficientu (NSE), *NSE po korekcii zrážok pre dve povodňové udalosti.

Table 6. Comparison of the validation of original parameters with the results of the recalibration for the period 1.8.2016–31.12.2019 according to the Nash-Sutcliffe coefficient (NSE). *NSE after precipitation correction for two flood events.

Predpovedný profil	NSE po validácii pôvodných parametrov	NSE po rekalibrácii
Vieska nad Žitavou – Žitava	-0,08	0,75
Bohdanovce – Oľšava	0,28	0,73
Hronec – Čierny Hron	-0,84	0,81
Spišská Nová Ves – Hornád	0,79	0,87
Oravský Biely Potok – Studený potok	0,50*	0,78*
Liptovská Ondrašová – Jalovský potok	0,79*	0,82*

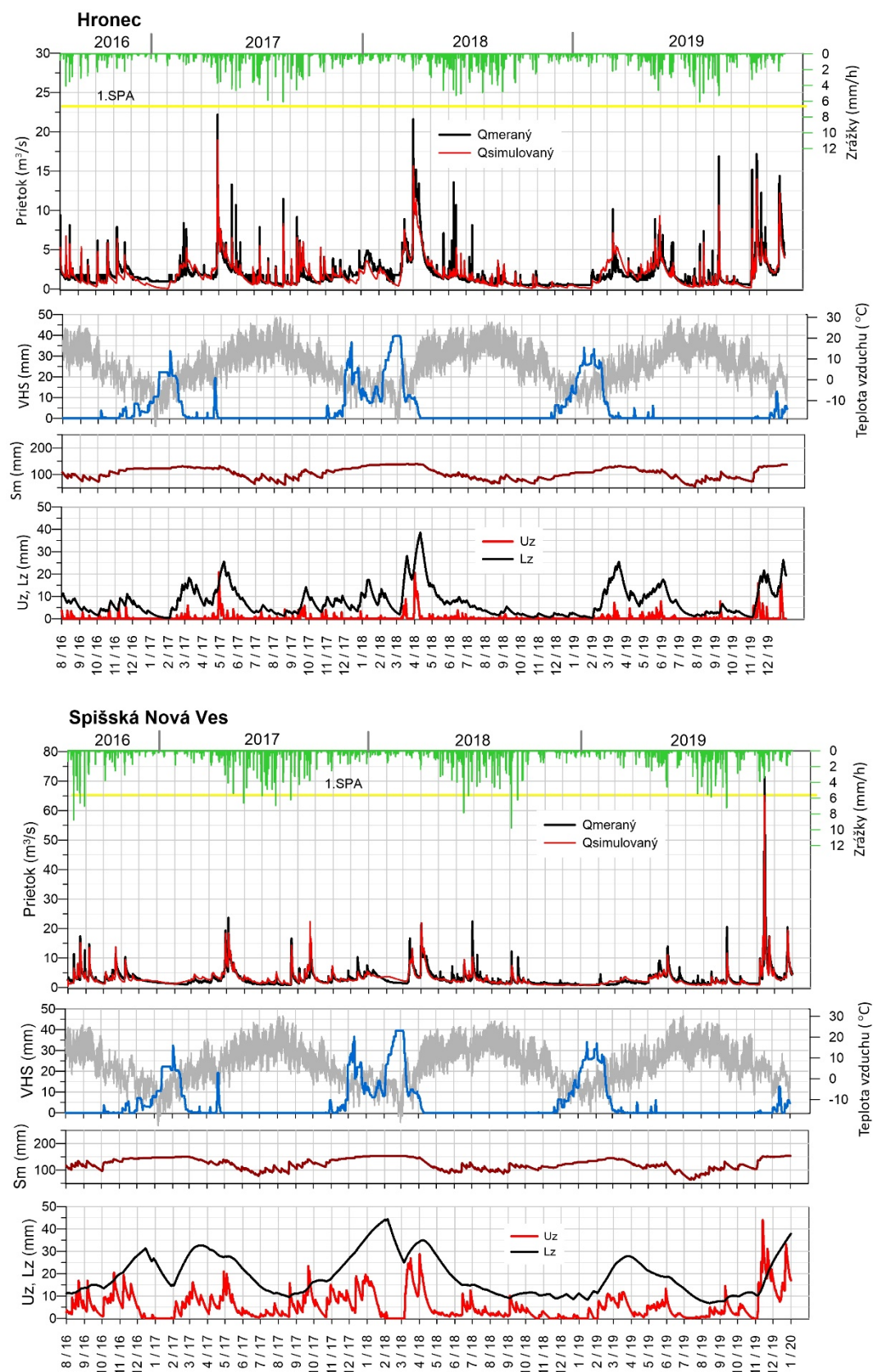
Obrázok 3. Pribeh meraných a vybraných simulovaných charakteristík pre vodomerné stanice nížinných povodí.

Figure 3. Time series of selected measured and simulated characteristics for gauging stations in lowland catchments.



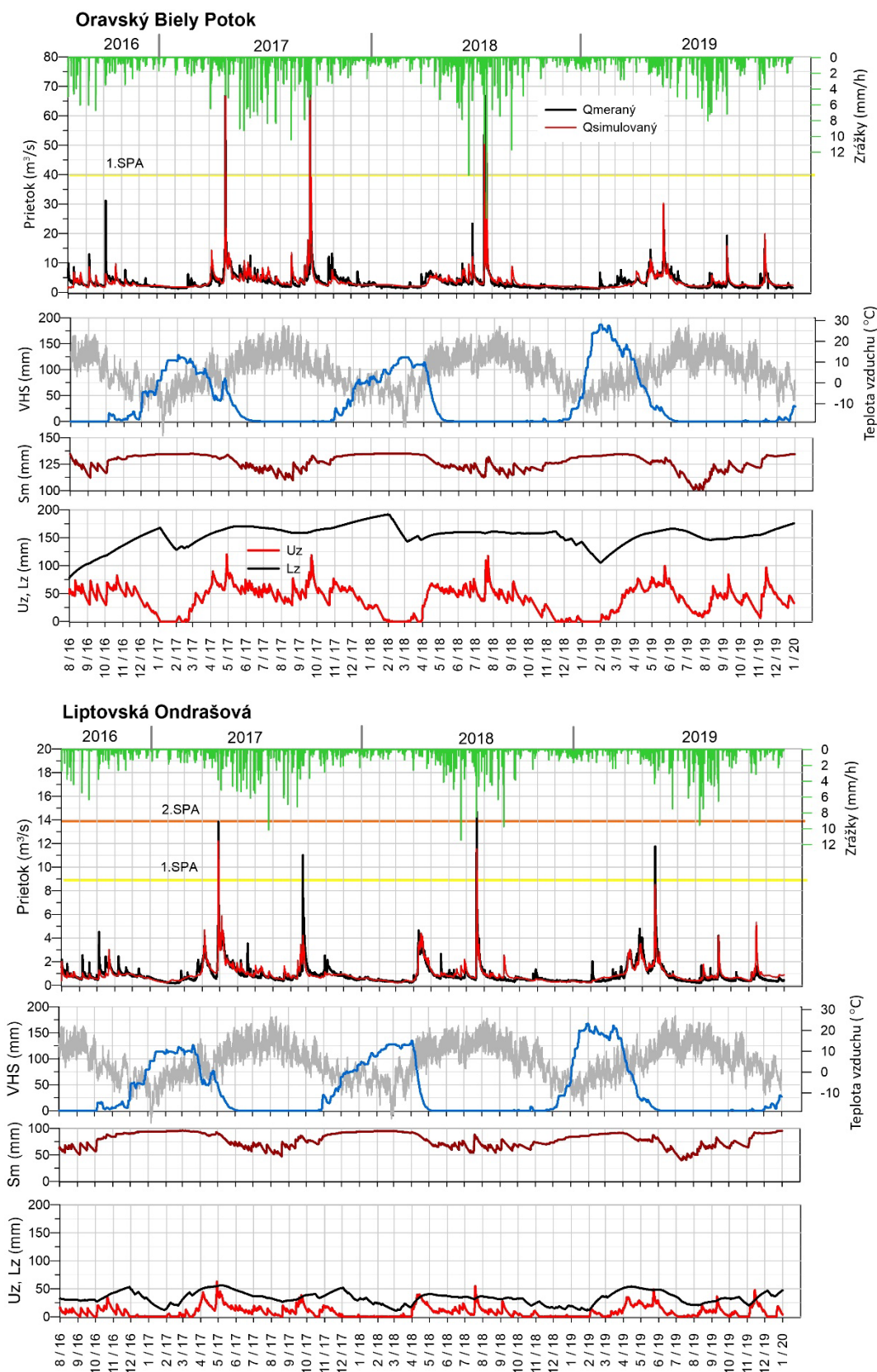
Obrázok 4. Pribeh meraných a vybraných simulovaných charakteristík pre vodomerné stanice stredohorských povodí.

Figure 4. Time series of selected measured and simulated characteristics for gauging stations in the middle mountain catchments.



Obrázok 5. Pribeh meraných a vybraných simulovaných charakteristík pre vodomerné stanice vysokohorských povodí.

Figure 5. Time series of selected measured and simulated characteristics for gauging stations in the high mountain catchments.



Letné a zimné kalibrácie

Nížinné povodia

Žitava po Viesku nad Žitavou

V tomto povodí má zima 1 a 3 podobný charakter: jednu významnú akumuláciu snehu a jeden odtok, na rozdiel od zimy 2, kde sa strieda viac období s akumuláciou a topením snehu. Letá boli svojím charakterom veľmi rozdielne. V druhom lete sa nevyskytla žiadna významná vlna, bolo to leto s nízkymi prietokmi. Aj to je zrejme dôvod, prečo sada parametrov z tohto obdobia kalibrácie nedokázala dobre simulovať ostatné letá (Tab. 7). V lete 1 sa vyskytla iba jedna vlna v máji, potom nasledovalo obdobie s nízkymi prietokmi bez významnej vlny. Leto 3 bolo z pohľadu vodnosti najdynamickejšie, vyššie prietoky sa vyskytli v máji až júni, potom nasledovalo niekoľko menších prietokových vln. Parametre z celkového obdobia kalibrácie sa dajú vhodne použiť aj na čiastkové obdobia, čo dokumentujú výsledky validácií (Tab. 7). Napriek tomu zaujímavý výsledok poskytli parametre z leta 3 a zimy 1. Je možné, že zima 1 predstavuje pre toto povodie akýsi prototyp ideálnej zimy s jednou akumuláciou snehu a následným odtokom na konci zimného obdobia? Parametre z tejto zimy sa dajú úspešne použiť aj na ostatné zimné sezóny. Podobne aj leto 3, v ktorom sa vyskytlo niekoľko vln počas sezóny. Parametre z leta 3 sú dobre použiteľné na ostatné letá. Túto hypotézu by bolo potrebné overiť na ďalších zimných a letných obdobiach. Zimné a letné kalibrácie sa najviac odlišovali parametrom BETA, ktorý pre letné obdobia mal vyššie hodnoty (3,9–4,8) ako v zimnom období (2,6–3,6).

Tabuľka 7. Hodnoty Nash-Sutcliffových koeficientov po sezónnych rekalibráciach a krížových validáciach (v rovnakom riadku), ako aj po validácii parametrov z celkového obdobia na čiastkových obdobiach pre povodie Žitavy po Viesku nad Žitavou.

Table 7. The Nash-Sutcliffe coefficients after seasonal recalibrations and cross-validations (at the same line), as well as after validation of the parameters from the total calibration period for the sub-periods for the Žitava river basin up to the gauging station Vieska nad Žitavou.

Zima	Z1	Z2	Z3	Leto	L1	L2	L3
Z1	0,82	0,81	0,52	L1	0,94	0,22	0,56
Z2	0,45	0,92	0,21	L2	0,60	0,67	0,41
Z3	0,61	0,58	0,89	L3	0,84	0,44	0,67
2016–2019	0,67	0,84	0,53	2016–2019	0,86	0,59	0,61

Z1 – zima č. 1, L1 – leto č. 1

Olšava po Bohdanovce

Letá aj zimy sú v Bohdanovciach svojím charakterom veľmi podobné ako vo Vieske nad Žitavou. V prvom lete sa vyskytla iba jedna vlna v máji, potom nasledovalo pomerne suché 2. leto bez významnej vlny, v treťom lete sa vyskytlo niekoľko menších prietokových vln, predovšetkým v prvej polovici obdobia. Prvá a tretia zima sa vyznačovala jednou akumuláciou snehu a následným odtokom na konci zimy, v druhej zime sa prerušovane vytvárali a topili zásoby snehu, čo dokumentuje aj niekoľko prietokových vln z topenia snehu. V tretej zime, hoci boli snehové zásoby porovnateľné s prvou zimou, nedošlo k výraznému jarnému odtoku.

Zásoby podzemnej vody sa zvýšili iba nepatrne. Zdá sa, že väčšina zásob vody v snehu sa stratila výparom. Zimné obdobie bolo zrážkovo podnormálne, teplotne nadnormálne a nadpriemerne bolo aj trvanie slnečného svitu. Tretia zima nasledovala po veľmi suchom druhom lete, trend poklesu zásob podzemnej vody pri slabšej tretej zime z pohľadu veľkosti jarného odtoku pokračoval (Obr. 3). Celoročné parametre dobre simulujú obdobia jednotlivých sezón (Tab. 8). Porovnateľný výsledok s parametrami z celkového obdobia kalibrácie poskytla iba sada parametrov získaná pre zimu 2 na zimu 3. Parametre zo zimy 1 naakumulovali najvyššie zásoby vody v snehu, vyššie oproti získaným z celkového obdobia kalibrácie. Na letných kalibráciách a následne validáciách je vidieť, podobne ako u Viesky nad Žitavou, že parametre z tretieho leta s viacerými vlnami lepšie simulovali prvé leto s jednou prietokovou vlnou, než parametre získané z druhého suchého leta.

Tabuľka 8. Hodnoty Nash-Sutcliffových koeficientov po sezónnych rekalibráciach a krížových validáciach (v rovnakom riadku), ako aj po validácii parametrov z celkového obdobia na čiastkových obdobiach pre povodie Olšavy po Bohdanovce.

Table 8. The Nash-Sutcliffe coefficients after seasonal recalibrations and cross-validations (at the same line), as well as after validation of the parameters from the total calibration period for the sub-periods for the Olšava river basin up to the gauging station Bohdanovce.

Zima	Z1	Z2	Z3	Leto	L1	L2	L3
Z1	0,89	-0,16	0,11	L1	0,93	0,21	0,48
Z2	0,64	0,90	0,55	L2	0,43	0,73	0,55
Z3	0,30	0,40	0,85	L3	0,79	0,02	0,82
2016–2019	0,72	0,69	0,47	2016–2019	0,83	0,52	0,65

Stredohorské povodia

Hornád po Spišskú Novú Ves

Charakter odtoku prvej a tretej zimy bol podobný, aj keď počas prvej zimy spadlo v priemere o 100 mm zrážok viac ako v tretej zime. Vyššie zrážkové úhrny však boli sústredené na začiatok a na koniec sezóny a na významnejšiu akumuláciu nemali vplyv. Topenie snehových zásob bolo počas oboch zim pozvoľné a na vodných tokoch došlo iba k miernemu zvýšeniu prietokov. Podobnosť sezón sa prejavila aj pri i krížovej validácii (Tab. 9). Dosiahnuté hodnoty NSE sú porovnateľné a dávajú uspokojivé výsledky. Druhá zima mala odlišný priebeh akumulácie a topenia snehu. Zásoby vody v snehu boli najvyššie zo sledovaných troch zim. Po prechodnom oteplení došlo k ich úbytku a k opätovnej akumulácii. Dynamika vo vývoji snehových zásob sa prejavila aj v dynamike odtoku v podobe niekoľkých vln. Pri krížovej validácii sa následne ukázalo, že parametre odvodené pre druhú dynamickú zimu nie sú vhodné pre simuláciu procesov topenia sa snehu, ktoré sa neperjavia na významnejšej zmene odtoku.

Letné obdobia sa vyznačovali podobným charakterom odtoku: niekoľko zrážkovo-odtokových vln, ktoré nedosiahli hladiny zodpovedajúce 1. SPA. Počas prvého leta sa vlny vyskytli ku koncu obdobia, v druhom lete priebežne počas celého obdobia a v treťom na začiatku a na konci obdobia. Z čiastkových kalibrácií boli najlepšie vý-

sledky dosiahnuté v treťom lete (Tab. 9). Nasledujúce krížové validácie však priniesli najvyššie hodnoty NSE pre druhé leto, aj keď jeho kalibrácia dopadla najhoršie. Výsledky validácie parametrov druhého leta na treťom sú lepšie ako výsledky samotnej kalibrácie druhého leta. Hodnota validačného NSE je vyššia ako hodnota NSE kalibrácie druhého leta. Validácia kalibračných parametrov na čiastkových letných a zimných obdobiach potvrdila ich univerzálnosť s výnimkou validácie prvého leta. Nízka hodnota NSE bola ovplyvnená chybne nasimulovanou (nadhodnotenou) vlnou na konci obdobia.

Tabuľka 9. Hodnoty Nash-Sutcliffových koeficientov po sezónnych rekalibráciach a krížových validáciach (v rovnakom riadku), ako aj po validácii parametrov z celkového obdobia na čiastkových obdobiach pre povodie Hornádu po Spišskú Novú Ves.

Table 9. The Nash-Sutcliffe coefficients after seasonal recalibrations and cross-validations (at the same line), as well as after validation of the parameters from the total calibration period for the sub-periods for the Hornád river basin up to the gauging station Spišská Nová Ves.

Zima	Z1	Z2	Z3	Leto	L1	L2	L3
Z1	0,94	0,27	0,79	L1	0,84	0,60	0,54
Z2	0,66	0,88	0,45	L2	0,47	0,68	0,86
Z3	0,74	0,25	0,83	L3	0,37	0,50	0,93
2016–2019	0,88	0,83	0,63	2016–2019	0,34	0,65	0,82

Čierny Hron po Hronec

Počas prvých dvoch zím bol zaznamenaný zvýšený jarný odtok, aj keď hladiny zodpovedajúce SPA neboli prekročené. Počas jarného odtoku prvej zimy prevládala pri tvorbe odtoku vplyv tekutých zrážok nad topiacim sa snehom. V druhej zime sa vytvoril klasický jarný odtok spojený s topením sa snehu. Posledná tretia zima bola najmiernejšia a zrážkovo najsuchšia, čo sa prejavilo aj na chýbajúcom jarnom odtoku. Čiastkové zimné kalibrácie priniesli štatisticky aj vizuálne dobré výsledky. Hodnoty Nash-Sutcliffových koeficientov sa pohybovali v intervale 0,82 až 0,94 (Tab. 10). Nasledujúce krížové validácie však nepotvrdili výsledky kalibrácií. Hodnoty Nash-Sutcliffových koeficientov boli väčšinou nízke. Dôvodom bol rozdielny priebeh odtoku čiastkových zím, kedy nebolo možné pomocou odvodených parametrov uspokojivo nasimulovať ostatné zimné sezóny.

Jednotlivé letné sezóny sa vyznačovali rovnakým charakterom odtoku. Zaznamenali sme viacero zrážkovoo-odtokových udalostí, počas ktorých neboli dosiahnuté hladiny zodpovedajúce SPA. Rozdiely medzi sezónami boli zjavné v ich úvode. Meraný odtok vo vodomernom profile v úvode prvého leta mierne klesal, na začiatku druhého leta prevládala ustálenosť a tretie sa vyznačovalo rozkolísanosťou odtoku v dôsledku opakujúcich sa zrážkových epizód. Parametre získané pri čiastkových kalibráciách prvého a tretieho leta simulovali zrážkovoo-odtokový proces letných sezón uspokojivo. Hodnoty NSE boli 0,81, resp. 0,86. Kalibrácia druhého leta nezachytala uspokojivo dynamiku odtoku, niekoľko vln, najmä v júni, bolo podhodnotených. Hodnota NSE bola 0,53. Dôvodom

môžu byť podhodnotené atmosférické zrážky vstupujúce do simulácie.

Vzájomné krížové validácie prvého a tretieho leta priniesli, štatisticky aj vizuálne, veľmi dobré výsledky. Hodnota NSE bola 0,86 v prípade validácie prvého leta na treťom a 0,78 pri validácii tretieho leta na prvom. Dokonca validácia prvého leta na treťom bola podľa sledovanej štatistiky lepšia ako samotná kalibrácia. Validácie prvého a tretieho leta na druhom neboli uspokojivé, NSE nadobúdalo hodnoty 0,46, resp. 0,40. Krížové validácie druhého leta na prvom, resp. treťom lete boli štatisticky lepšie ako samotná kalibrácia druhého leta. NSE pri validácii dosiahli hodnoty 0,69, resp. 0,77, zatiaľ čo pri kalibrácii 0,53.

Validácia celkových kalibračných parametrov na čiastkových zimných a letných sezónach poukázala na dobré výsledky v prvej a druhej zime a v treťom lete. Hodnoty NSE sa pohybovali od 0,76 do 0,86. Neuspokojivé výsledky sme zaznamenali v tretej zime a v prvom a druhom lete. Hodnoty NSE boli v letách nízke, v zime dokonca záporné.

Tabuľka 10. Hodnoty Nash-Sutcliffových koeficientov po sezónnych rekalibráciach a krížových validáciach (v rovnakom riadku), ako aj po validácii parametrov z celkového obdobia na čiastkových obdobiach pre povodie Čierneho Hrona po Hronec.

Table 10. The Nash-Sutcliffe coefficients after seasonal recalibrations and cross-validations (at the same line), as well as after validation of the parameters from the total calibration period for the sub-periods for the Čierny Hron river basin up to the gauging station Hronec.

Zima	Z1	Z2	Z3	Leto	L1	L2	L3
Z1	0,82	0,57	0,09	L1	0,81	0,46	0,86
Z2	0,10	0,94	-2,08	L2	0,69	0,53	0,77
Z3	-0,20	0,44	0,91	L3	0,78	0,40	0,86
2016–2019	0,76	0,86	-0,15	2016–2019	0,56	0,40	0,79

Vysokohorské povodia

Studený potok po Oravský Biely Potok

Prvá zima sa od zostávajúcich dvoch líšila priebehom odtoku. V dôsledku topenia sa snehových zásob v kombinácii s tekutými zrážkami bol v druhej polovici apríla prekročený 1. SPA. Aj v ostatných dvoch zimách sa naakumulovali dostatočné zásoby vody v snehu, v tretej zime dokonca najvyššie za celé analyzované obdobie (Obr. 5). Významný jarný odtok sa však nevytvoril.

Kalibrácie čiastkových zím priniesli štatisticky aj vizuálne dobré výsledky (podobne aj v druhom vysokohorskom povodí). Z krížových validácií najlepší výsledok dosiahla validácia parametrov druhej zimy. Počas prvej zimy parametre dobre zachytili dynamiku odtoku, ale nie samotnú veľkosť kulminácie povodňovej vlny. Tretia zima mala podobný charakter odtoku ako druhá, takže aj validácia parametrov na tejto zime priniesla uspokojivé výsledky. Štatisticky aj vizuálne najhoršie dopadla validácia parametrov prvej zimy. Parametre odvodené pre obdobie s povodňovou situáciou si nedokázali uspokojivo poradiť so simuláciou zím, kedy sa významný jarný odtok nevytvoril.

Napr. je vidieť rozdiel medzi simulovanými a meranými prietokmi v apríli druhej zimy. Simulovaný prietok výrazne podhodnocuje reálny odtok. Príčina môže byť v hodnotách pôdných parametrov. Parameter maximálnej vodnej kapacity pôdy odvodený pre prvú zimu je výrazne vyšší ako získaný počas druhej zimy. Pri krížovej validácii tak pôda s vyššou kapacitou dokázala absorbovať viac vody, ktorá následne chýbala v priamom odtoku.

V letných obdobiach počas prvého a druhého leta (september 2017 a júl 2018) sa vyskytli výdatné zrážky z cyklonálnych situácií, ktoré zlúčený zrážkový produkt qPrec nedokázal v povodiach Studeného a Jalovského potoka dobre zachytiť. Dôkazom boli nízke úhrny zrážok (približne o polovicu) v porovnaní s reálne spadnutými zrážkami zo zrážkomernej siete, ako aj výrazne podhodnotené simulácie povodňových vln. Príčinou môže byť predovšetkým orografia vysokoohorskej časti analyzovaných povodí a typ cyklonálnych situácií, ktoré rádiolokátor nedokáže dobre zachytiť. Po 2-násobnom navýšení zrážok počas udalostí v období 19. 9. – 24. 9. 2017 a 16. 7. – 24. 7. 2018 model dokázal uspokojivo nasimulovať povodňové vlny. Pri simulácii týchto zrážkovo-odtokových udalostí nebolo možné získať dobrý výsledok simulácie iba úpravou parametrov modelu. Po korekcii zrážok kalibrácie aj validácie parametrov na letných sezónach poskytli uspokojivé výsledky (Tab. 11). Validácie parametrov z prvého povodňového leta na relatívne suchšom treťom lete dosiahli štatisticky aj vizuálne uspokojivé výsledky. Krížová validácia parametrov z druhého povodňového leta na treťom lete dopadla štatisticky najhoršie. Vizuálne sa však ukázalo, že dynamika odtoku bola nasimulovaná korektne, aj keď nevýznamné zrážkovo-odtokové vlny boli systematicky nadhodnocované. Celkové kalibračné parametre validované na čiastkových letných a zimných obdobiach potvrdili svoju univerzálnosť najmä v zimnom období a počas prvého leta.

Tabuľka 11. Hodnoty Nash-Sutcliffových koeficientov po sezónnych rekalibráciach a krížových validáciach (v rovnakom riadku), ako aj po validácii parametrov z celkového obdobia na čiastkových obdobiach pre povodie Studeného potoka po Oravský Biely Potok.

Table 11. The Nash-Sutcliffe coefficients after seasonal recalibrations and cross-validations (at the same line), as well as after validation of the parameters from the total calibration period for the sub-periods for the Studený creek basin up to the gauging station Oravský Biely Potok.

Zima	Z1	Z2	Z3	Leto	L1	L2	L3
Z1	0,91	0,46	0,67	L1	0,92	0,60	0,57
Z2	0,69	0,87	0,77	L2	0,74	0,75	0,68
Z3	0,72	0,53	0,92	L3	0,81	0,73	0,86
2016–2019	0,86	0,52	0,85	2016–2019	0,88	0,61	0,59

Jalovský potok po Liptovskú Ondrašovú

Povodie Jalovského potoka má podobný odtokový režim ako susedné povodie Studeného potoka. Rozdiel je v orientácii povodia, ktorá je juhozápadná, čo sa prejavilo aj v nižších úhrnoch zrážok takmer vo všetkých čiastkových obdobiach oproti úhrnom v povodiu Studeného potoka.

Zimy boli, podobne ako v predchádzajúcom povodí, typické vysokými zásobami vody v snehu. V kombinácii s kvapalnými zrážkami a topením snehu bol dosiahnutý 1. SPA na konci prvej, ale aj tretej zimy. Najnižší odtok bol zaznamenaný počas druhej zimy, čo bolo dané aj najnižším úhrnom zrážok počas tohto zimného obdobia. V tomto povodí sa ukázalo, že model dokáže veľmi dobre simulovať zimné obdobia s rôznymi sadami parametrov, čo preukázali aj grafické a štatistické výsledky kalibrácií a validácií. Koeficient NSE sa pohyboval v rozsahu 0,80 až 0,95 (Tab. 12).

V letných obdobiach, podobne ako v povodí Studeného potoka, model nezachytil povodňovú vlnu v septembri 2017 a v júli 2018. Až po 2,5-násobnom navýšení zrážok počas udalosti 15. 7. – 20. 7. 2018 model dokázal uspokojivo nasimulovať povodňovú vlnu. Úpravou jednotlivých parametrov nebolo možné získať dobrý výsledok simulácie. Najnižšie úhrny zrážok, ako aj odtok z povodia, sa vyskytli počas tretieho leta. Parametre z celkového obdobia boli dobre použiteľné pre čiastkové obdobia okrem tretieho leta. Pre tretie leto poskytli parametre z druhého leta lepší výsledok, ako parametre z celkového obdobia. Zaujímavým výsledkom boli hodnoty parametra FC získané z jednotlivých kalibrácií. V druhom lete po navýšení úhrnu zrážok počas letnej povodňovej vlny tento parameter poklesol z hodnoty 203 mm na 66 mm. V praxi to znamená, že sa znížila kapacita pôdy prijímať zrážky, čím sa väčšie množstvo vody môže dostávať do odtoku a nepodiele sa na zvyšovaní pôdnej vlhkosti.

Tabuľka 12. Hodnoty Nash-Sutcliffových koeficientov po sezónnych rekalibráciach a krížových validáciach (v rovnakom riadku), ako aj po validácii parametrov z celkového obdobia na čiastkových obdobiach pre povodie Jalovského potoka po Liptovskú Ondrašovú

Table 12. The Nash-Sutcliffe coefficients after seasonal recalibrations and cross-validations (at the same line), as well as after validation of the parameters from the total calibration period for the sub-periods for the Jalovský creek basin up to the gauging station Liptovská Ondrašová

Zima	Z1	Z2	Z3	Leto	L1	L2	L3
Z1	0,93	0,90	0,86	L1	0,72	0,80	0,38
Z2	0,89	0,95	0,82	L2	0,40	0,90	0,76
Z3	0,83	0,80	0,95	L3	0,40	0,72	0,88
2016–2019	0,89	0,89	0,90	2016–2019	0,55	0,84	0,34

Pri kalibrácii hydrologického modelu sa vo všeobecnosti používa čo najdlhší, dostupný a súvislý časový rad kalibračných údajov. Pri modeli HBV sa odporúča minimálna dĺžka kalibračného obdobia 10 rokov (SMHI, 2014). Dôvodom je maximálne využitie vstupných údajov s cieľom nájsť čo najvhodnejšie parametre (Gibbs et al., 2018).

Dôležitá však nie je dĺžka použitého časového radu, ale informácie v ňom obsiahnuté a efektívnosť, s akou sa tieto informácie získavajú (Sorooshian et al. 1983). Mnohí vedci dospeli k záveru, že dlhšie kalibračné obdobie nemusí nevyhnutne viesť k lepšej výkonnosti modelu. Týka sa to napr. kontrastných klimatických období pre obdobie kalibrácie a validácie (Duethmann et al., 2020, Slezciak et al., 2019).

Z pohľadu operatívnej hydrológie je dôležité, aby kalibračné obdobie zahŕňalo rôzne zrážkovo-odtokové udalosti, vrátane tých povodňových. Model vhodný do operatívnej prevádzky by mal byť trénovaný na podmienkach, aké očakávame v čase vydania hydrologických predpovedí. Napr. model trénovaný na období nízkej vodnosti nemusí dostatočne spoľahlivo simulovať a predpovedať odtok z povodí v období zvýšenej vodnosti.

V našom prípade bol výber kalibračného obdobia limitovaný dobudovaním a sprevádzkovaním rádiolokačnej siete v období rokov 2013–2016 v rámci projektu POVAPSYS. Nami zvolená dĺžka kalibračného obdobia bola kompromisom medzi tým, aké vstupné dáta sa používajú na OHPaV pri prevádzke hydrologických modelov a dĺžkou obdobia, pre ktoré sú k dispozícii súvislé časové rady týchto dát.

Vzhľadom k tomu, že pri kalibrácii hydrologických modelov sa uplatňuje princíp ekvifinality (napr. Beven a Freer, 2001), t. j. rôzne sady parametrov dávajú podobné výsledky, nie je možné z hľadiska výkonnosti modelu identifikovať jednu najoptimálnejšiu (univerzálnu) sadu parametrov. Pre operatívnu hydrológiu je tak výhodné mať k dispozícii viacero sád parametrov, napr. pre určitý typ sezóny alebo pre podobný charakter tvorby odtoku.

Napriek neustálemu napredovaniu poznatkov o hydrologických procesoch obsahujú hydrologické modely niekoľko neistôt, ktoré vyplývajú zo vstupných údajov, kalibračných údajov, štruktúry modelu a nastavenia vhodných parametrov (Moges et al., 2021). Za významný zdroj neistôt sú v hydrologickom modelovaní vo všeobecnosti považované atmosférické zrážky. Bárdossy et al. (2022) uvádza, že neistota spadnutých zrážok, vstupujúcich do modelu, môže zodpovedať za neistotu výstupných údajov (simulovaných prietokov) až do 50 % jej výšky, dokonca aj v povodiach s hustou sieťou zrážkomerných staníc.

Počas rekalibrácií modelu boli vo vysokohorských povodiach identifikované dve zrážkové udalosti, ktoré poukazujú na neistotu plošných zrážkových údajov produktu qPrec. Informácie o zrážkach, získané na základe radarových meraní, majú svoje obmedzenia (Méri et al., 2021). Analýza spadnutých, ako aj predpovedaných zrážok vstupujúcich do hydrologických modelov je pre OHPaV dôležitým krokom ako zlepšiť výkonnosť modelov pri samotnom procese simulácie a predpovedaní hydrologickej odozvy. V tejto práci sa spomínanej problematike venujeme iba okrajovo, hoci vzhľadom na svoju komplexnosť si určite zaslúži väčšiu pozornosť. V ďalšom smerovaní sa preto chceme zamerať na neistoty spojené s atmosférickými zrážkami ako vstupmi do hydrologických modelov.

ZÁVER

Dobré poznanie geomorfologických a hydrologických vlastností povodí a odtokových procesov, ktoré v nich prebiehajú, sú predpokladom úspešného hydrologického modelovania. Príspevok preto okrem samotného hydrologického modelovania dokumentuje aj morfolometrické a hydrologické charakteristiky 6 povodí s rozdielnym odtokovým režimom.

Rekalibrácia HBV modelu pre obdobie 1.8.2016 – 31.12.2019 s použitím zlúčenej informácie o zrážkach priniesla nové sady parametrov, ktoré zlepšili simulácie modelu, v porovnaní s pôvodnými parametrami. Najvýznamnejšie zlepšenie bolo dosiahnuté v nížinných povodiach a v stredohorskom povodí Čierneho Hrona po vodomernej stanici Hronec.

Najcitlivejším parametrom bol pre stredohorské a vysokohorské povodia recesný koeficient pre priamy odtok KHQ, ktorý určuje výšku kulminácií a tvar výtokovej čiary. V nížinných povodiach to bol korekčný faktor kvapalných zrážok RCF, ktorého výsledkom je systematické nadhodnotenie alebo podhodnotenie simulovaných prietokov. Najmenej citlivým parametrom v troch povodiach bol parameter CFLUX, ktorý určuje intenzitu kapilárneho toku vody z hornej modelovej nádrže do pôdneho modulu. V dvoch povodiach to bol parameter pôdneho modulu LP a v jednom povodí recesný koeficient pre základný odtok K4.

Parametre z celkového obdobia kalibrácie dávali väčšinou uspokojivé výsledky aj pre čiastkové obdobia kalibrácie letných a zimných sezón. Avšak parametre získané na čiastkových letných a zimných sezónach poskytli podľa očakávania väčšinou ešte lepšie výsledky pre danú konkrétnu sezónu, oproti parametrom z celkového obdobia. Napriek tomu ich aplikovateľnosť na iné letné alebo zimné sezóny nemohla byť dostatočne dobre preukázaná z dôvodu malého počtu čiastkových sezón. Príčinou bola aj vzájomná odlišnosť v meteorologických a hydrologických podmienkach jednotlivých sezón. Aplikovateľnosť špecifických sád parametrov bude v budúcnosti skúmaná na ďalších sezónach, čo môže viesť k zlepšeniu predpovedí na daných povodiach.

Podakovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-19-0340.

LITERATÚRA

- Arheimer, B.–Lindström, G.–Olsson, J., 2011. A systematic review of sensitivities in the Swedish flood-forecasting system, *Atmospheric Research*, 100 (2–3), 275–284.
- Bárdossy, A.–Kilsby, C.–Birkinshaw, S.–Wang, N.–Anwar, F., 2022, Is precipitation responsible for the most hydrological model uncertainty? *Front. Water* 4:836554, doi: 10.3389/frwa.2022.836554.
- Bergström, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, *SMHI, Norrköping, Sweden, No. RHO 7*, 134 pp.
- Bergström, S., 1992, *The HBV model - its structure and applications*, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, SMHI Reports Hydrology, RH No. 4, Norrköping, 32 pp.
- Beven, K.J.–Freer, J., 2001, Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modeling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *J. Hydrol.*, 105, 157–172.

- Driessen, T.L.A.–Hurkmans, R.T.W.L.–Terink, W.–Hazenberg, P.–Torfs, P.J.J.F.–Uijlenhoet, R., 2010, The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modelled by the HBV model, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 651 – 665, doi.org/10.5194/hess-14-651-2010.
- Dub, O., 1963, *Hydrológia, hydrografia, hydrometria*. Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, Bratislava, pp. 528.
- Duethmann, D.–Blöschl, G.–Parajka, J., 2020, Why does a conceptual hydrological model fail to predict discharge changes in response to climate change? *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 3493–3511.
- Gibbs, M.S.–McInerney, D.–Humphrey, G.–Thyer, M.A.–Maier, H.R.–Dandy, G.C.–Kavetski, D., 2018, State updating and calibration period selection to improve dynamic monthly streamflow forecasts for an environmental flow management application. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 871 – 887.
- Gupta, H.V.–Kling, H.–Yilmaz, K.K.–Martinez, G.F., 2009, Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1 – 2), 80 – 91.
- Jeníček, M.–Ledvinka, O., 2020, Importance of snowmelt contribution to seasonal runoff and summer low flows in Czechia, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 3475 – 3491.
- Kopáčiková, E.–Hlaváčiková, H.–Lešková, D., 2020, Climate change impact study on 100-year floods of selected Slovak catchments, *Acta Hydrologica Slovaca*, 21(2), 160 – 171.
- Lindström, G., 1997, A Simple Automatic Calibration Routine for the HBV Model. *Nordic Hydrology*, 28 (3), 153 – 168.
- Méri, L.–Gaál, L.–Bartok, J.–Gažák, M.–Gera, M.–Jurašek, M.–Kelemen, M., 2021, Improved Radar Composites and Enhanced Value of Meteorological Radar Data Using Different Quality Indices. *Sustainability*, 13, 5285.
- Moges, E.–Demissie, Y.–Larsen, L.–Yassin, F., 2021, Review: Sources of Hydrological Model Uncertainties and Advances in Their Analysis. *Water*, 13(1), 28.
- Moriasi, D.N.–Arnold, J.G.–van Liew, M.W.–Bingner, R.L.–Harmel, R.D.–Veith, T.L., 2007, Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885 – 900.
- Nash, J.E.–Sutcliffe, J.V., 1970, River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282 – 290.
- Rango, A.–Martínez, J., 1995, Revisiting the degree-day method for snowmelt computations. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 31, 657 – 669.
- Seibert, J.–Bergström, S., 2021, A retrospective on hydrological modelling based on half a century with the HBV model, *Discussions, Hydrology and Earth System Sciences*, doi.org/10.5194/hess-2021-542.
- Seibert, J.–Vis, M.J.P., 2012, Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3315 – 3325, doi.org/10.5167/uzh-67295.
- Sleziak, P.–Danko, M.–Holko, L., 2019, Testing of an alternative approach to calibration of a hydrological model under varying climatic conditions, *Acta Hydrologica Slovaca*, 20(2), 131 – 138.
- SMHI, 2014, *Integrated Hydrological Modelling System, Manual*, ver. 6.4, approved by B. Johansson, Dnr: 2013/299/2.10.1, SMHI, pp. 140.
- Sooroshian, S.–Gupta, K.G.–Fulton, J.L., 1983, Evaluation of Maximum Likelihood Parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models: Influence of calibration data variability and length on model credibility, *Water Resources Research*, 19(1), 251 – 259.

DENNÝ CHOD KONCENTRÁCIÍ NO₂, NO A O₃ NA STANICIACH NÁRODNEJ MONITOROVACEJ SIETE KVALITY OVZDUŠIA V ROKOCH 2010 – 2020

DUŠAN ŠTEFÁNIK¹, TEREZA ŠEDIVÁ^{1,2}

¹ Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15, Bratislava, Odbor Monitorovanie kvality ovzdušia, dusan.stefanik@shmu.sk, tereza.sediva@gmail.com

² Fakulta Matematiky, Fyziky a Informatiky Univerzity Komenského v Bratislave Mlynská dolina F1, 842 48, Bratislava

Mean diurnal profiles of pollutants NO₂, NO and O₃ obtained from long-term measurements at stations of National air-quality monitoring stations (NMSKO) operated by SHMÚ are presented. The mean diurnal profile of pollutant concentrations is determined by changes in meteorological and chemical conditions of the atmosphere, as well as the diurnal variability of the emission size. The impact of these factors on the mean diurnal concentration profile is analysed. It was shown that the traffic stations can be distinguished from the background stations, and that the mountain stations (positioned on the mountain peaks) can be distinguished from other stations, based on the diurnal profile of NO₂. The background stations (apart from mountain stations) can be divided into two categories based on their diurnal profile of NO₂: the ones with change in NO₂ concentrations caused primarily by emissions from traffic, and the ones with emissions dominantly from industry and agriculture, which have a less distinct diurnal emission profile compared to traffic. It was also shown that the traffic stations are easily distinguishable from the regional background stations by comparison of their NO and NO₂ diurnal profiles. Based on the mean diurnal profile of ozone at analysed stations, it is possible to determine whether the station is positioned on a mountain peak or not. Long-term averages of the diurnal profiles of pollutants, mainly NO₂, might be helpful in facilitating the intention of accurate quantification of representativeness of the air quality stations. Analysis of diurnal profiles of pollutants might also be relevant for quality control of data from low-cost sensors. These sensors are currently gaining popularity, but their contribution is questionable due to doubts about the quality of the provided data. The analysis of the mean diurnal profiles of pollutants might also facilitate detection of anomalies in measurements.

Prezentované sú priemerné denné chody koncentrácií znečisťujúcich látok NO₂, NO a O₃ získané z dlhodobých meraní na staniciach Národnej monitorovacej siete kvality ovzdušia (NMSKO) prevádzkovanéj SHMÚ. Priemerný denný chod koncentrácií je ovplyvnený zmenou meteorologických a chemických podmienok v atmosfére a tiež zmenou množstva emisií počas dňa. Analyzovaný bol vplyv uvedených faktorov na denný chod. Bolo ukázané, že podľa denného chodu koncentrácií NO₂ sa dajú odlišiť dopravné stanice od pozad'ových a vysokohorské (v zmysle umiestnenia na vrchu hory) od ostatných. Taktiež pozad'ové stanice (okrem vysokohorských) sa pomocou denného chodu NO₂ dali rozdeliť na dve skupiny: na tie, kde predpokladáme, že koncentrácie NO₂ sa menia primárne vplyvom zmien emisií z dopravy; a na tie, kde predpokladáme dominanciu emisií z priemyslu a poľnohospodárstva, ktoré majú menej výrazný denný chod ako doprava. Taktiež bolo ukázané, že porovnaním denných chodov koncentrácií NO a NO₂ je možné dobre odlišiť dopravnú stanicu od regionálnej pozad'ovej stanice. Na základe denného chodu ozónu na analyzovaných staniciach možno usúdiť, či je stanica vysokohorská alebo nie. Dlhodobé priemery denných chodov znečisťujúcich látok, najmä NO₂, by nám mohli pomôcť pri úsilí vedecky kvalifikovať reprezentatívnosť staníc kvality ovzdušia. Štúdium denných chodov koncentrácií znečisťujúcich látok by mohlo byť tiež významné aj pri kontrole kvality dát z nízkonákladových senzorov, ktoré v súčasnosti zažívajú rozmach, avšak stále bez viditeľných úspechov, kvôli pochybnostiam o ich poskytovanej kvalite údajov. Analýza denných chodov koncentrácií znečisťujúcich látok môže tiež pomôcť pri odhaľovaní anomálnych dát v meraniach.

Key words: air quality monitoring, diurnal variation, NO₂, O₃, air pollution, chemical-transport model

1 ÚVOD

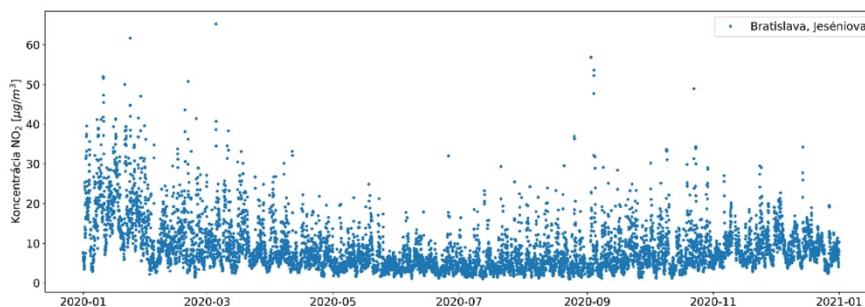
Časový rad koncentrácií znečisťujúcich látok v ovzduší sa nám pri prvom pohľade javí ako náhodný sled čísel – pozrime sa napríklad na hodinové koncentrácie NO₂ v roku 2020 na stanici Bratislava, Jeséniova na Obr. 1.1. Pri pozornejšej analýze dát si však môžeme všimnúť ich určité periodické vlastnosti ako sú – ročná variabilita (súvisí s chodom ročných období, zreteľne to vidieť pri dlhších časových radoch ako na Obr. 1.2), týždenná variabilita (súvisí so zmenami správania sa spoločnosti počas týždňa) a denný chod (súvisí so striedaním sa dňa a noci). Hoci na dlhších časových radoch dennú variabilitu nevidno, ak spravíme priemerné koncentrácie NO₂ pre jednotlivé hodiny dňa z dát na Obr. 1.2, dostaneme priemerný denný chod

na Obr. 1.3¹. Vidíme, že minimum koncentrácií NO₂ sa na danej stanici dosahuje okolo 02:00 UTC a podobné minimum taktiež okolo 12:00 UTC. Tieto minimá striedajú dve významnejšie maximá, ranné okolo 06:00–07:00 a večerné okolo 17:00 až 18:00 UTC. Denná variabilita koncentrácií znečisťujúcich látok je vo všeobecnosti spôsobená dvoma faktormi – meteorologickými (teplota, stabilita hraničnej vrstvy atmosféry, slnečné žiarenie) a správaním sa spoločnosti (emisie z dopravy najmä v ranej a dopravnej špičke, emisie z kúrenísk). V predloženej práci

¹ Vo všetkých grafoch pre denné chody v tejto práci znamená 0 na osi x – priemerné hodnoty medzi nultou a prvou hodinou (0:00–0:59), 1 – priemerné hodnoty medzi prvou a druhou hodinou (1:00–1:59), atď.

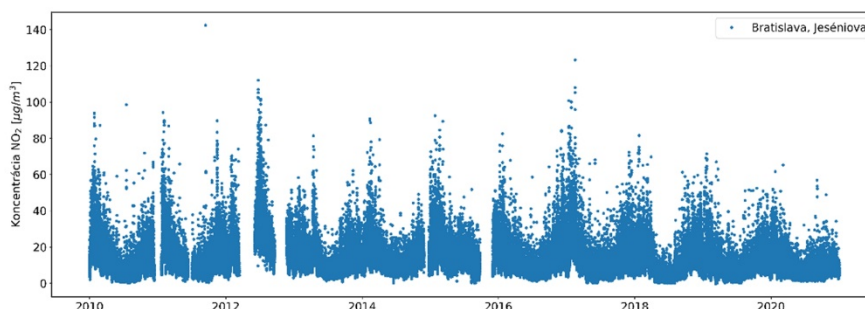
Obrázok 1.1.
Priemerné hodinové koncentrácie NO₂ na stanici Bratislava, Jeséniova počas roku 2020.

Figure 1.1.
Mean hourly concentrations of NO₂ at Bratislava, Jeséniova station, in 2020.



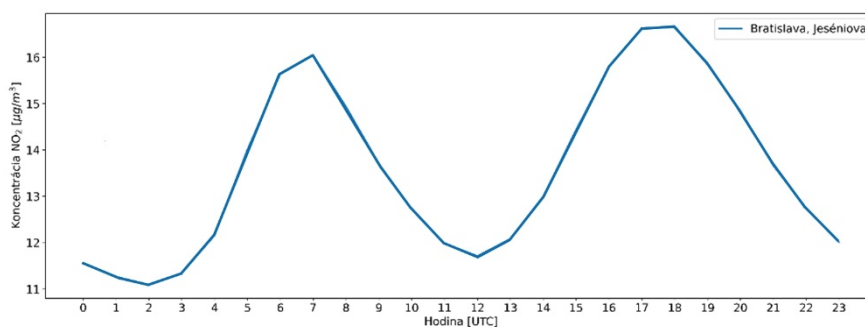
Obrázok 1.2.
Priemerné hodinové koncentrácie NO₂ na stanici Bratislava, Jeséniova počas rokov 2010 – 2020. Zreteľne vidieť ročnú variabilitu.

Figure 1.2.
Mean hourly concentrations of NO₂ at Bratislava, Jeséniova station, 2010 – 2020 period with distinct annual variation.



Obrázok 1.3.
Priemerný denný chod koncentrácie NO₂ na stanici Bratislava, Jeséniova počas rokov 2010 – 2020.

Figure 1.3.
Mean diurnal profile of NO₂ concentrations at Bratislava, Jeséniova station, 2010 – 2020 period.



sa sústreďujeme na denné chody koncentrácií znečisťujúcich látok, najmä pre NO₂ a O₃, a v menšej miere pre NO. Pôvodne sme zvažovali zahrnúť aj analýzu pre pevné častice PM₁₀ a PM_{2,5}, avšak pre náročnosť analýz sme boli nútení rozdeliť uvedenú prácu na dve a pevným časticám sa budeme venovať v ďalšom čísle časopisu. Uvedené látky patria medzi najzávažnejšie znečisťujúce látky v ovzduší na Slovensku, ktoré sa merajú kontinuálne, teda sú dostupné ich priemerné hodinové koncentrácie. Ich koncentrácie často prekračujú limitné hodnoty EÚ (SHMÚ, 2021) a majú závažný vplyv na ľudské zdravie a životné prostredie (EEA, 2019). Hlavným cieľom práce je určenie priemerých denných chodov (profilov) pre vybrané znečisťujúce látky pomocou dlhodobých hodinových meraní na staniciach NMSKO, ktoré prevádzkuje SHMÚ; kategorizácia staníc podľa jednotlivých typov denných profilov a vysvetlenie tvaru daných profilov na základe meteorologických a ľudských vplyvov.

Denné chody boli počítané z meraných hodinových koncentrácií na staniciach NMSKO uvedených v Tab. 1 (SHMÚ, 2021). V tabuľke je taktiež uvedená lokalita a typ stanice. Slovné definície týchto charakteristík, ktoré umožňujú istú formu ľubovôle pri určení typu a lokality stanice, sú uvedené vo vykonávacom rozhodnutí Komisie

2011/850/EU (EIONET, 2016). V predloženej publikácii sa snažíme kategorizovať stanice pomocou tvaru denného chodu koncentrácií vypočítaného z dlhodobých meraní a konfrontovať túto kategorizáciu so zaužívanou kategorizáciou lokalita/typ uvedenou v Tab. 1.

Priemerné denné chody koncentrácií znečisťujúcich látok na staniciach NMSKO ešte neboli publikované. V zahraničnej literatúre sa tvar denných chodov diskutuje najmä v súvislosti s validáciou modelových simulácií, ako napríklad v publikáciách (Norena, 2022; Li 2021). V práci Norena, (2022) taktiež porovnávajú vplyv denného chodu emisií voči konštantnému chodu emisií na výsledný modelový chod koncentrácie. Warneck (1988) uvádza denné chody maximálnych ozónových koncentrácií pre 3 rôzne stanice – vysokohorskú, nížinnú a pobrežnú. Tieto denné chody boli získané priemerovaním len počas 90 dní, preto vykazujú značný rozptyl ovplyvnený náhodnou fluktuáciou dát. Napriek tomu, na tvare týchto profilov je vidno vplyv horského a údolného vetra, brízy a výšky hraničnej vrstvy atmosféry. V článku Voiculescu, (2020) analyzovali denný chod koncentrácií NO₂, pričom pozorovali dve maximá, ktorých pôvod stotožnili s maximami emisií v doprave (Kendrick, 2015). Autori uvádzajú denné profily pre rôzne sezóny, ktoré však vždy nie sú totožné s jednotlivými

Tabuľka 1.

Stanice NMSKO zahrnuté v analýze.

(lokalita:

U – mestská stanica,

S – predmestská,

R – vidiecka (regionálna);

typ:

B – pozad'ová,

T – dopravná;

NO_x, O₃:

1 – látka sa meria,

0 – nemeria).

Table 1.

NMSKO stations in analysis.

(location:

U – urban station,

S – suburban,

R – rural;

type:

B – background,

T – traffic;

NO_x, O₃:

1 – pollutant is measured,

0 – not measured).

Názov stanice Station name	zem. dĺžka longitude	zem. šírka latitude	výška elevation	lokalita location	typ type	NO _x	O ₃
Banská Bystrica, Zelená	19,115325	48,733486	422	U	B	1	1
Banská Bystrica, Štefánik. náb.	19,154985	48,735110	340	U	T	1	0
Bratislava, Jeséniova	17,106209	48,167952	283	S	B	1	1
Bratislava, Mamateyova	17,125400	48,124692	134	U	B	1	1
Bratislava, Trnavské Mýto	17,128891	48,158359	140	U	T	1	0
Chopok, EMEP	19,589236	48,943620	1958	R	B	1	1
Gánovce, Meteo. st.	20,322844	49,034601	682	R	B	1	1
Humenné, Nám. slobody	21,913688	48,930897	145	U	B	1	1
Jelšava, Jesenského	20,240498	48,631194	271	U	B	1	1
Kojšovská hoľa	20,987112	48,782875	1230	R	B	1	1
Košice, Ďumbierska	21,245000	48,753055	202	U	B	0	1
Košice, Štefánikova	21,258902	48,726310	211	U	T	1	0
Krompachy, SNP	20,873901	48,915658	371	U	T	1	0
Malacky, Mierové námestie	17,019052	48,436843	165	U	T	1	0
Martin, Jesenského	18,921378	49,059630	397	U	T	1	0
Nitra, Janíkovce	18,140716	48,283059	140	U	B	1	1
Nitra, Štúrova	18,076870	48,309436	151	U	T	1	0
Prešov, arm. gen. L. Svobodu	21,266767	48,992475	244	U	T	1	0
Prievidza, Malonecpalská	18,628071	48,782641	269	U	B	1	1
Ružomberok, Riadok	19,302536	49,079025	479	U	B	1	1
Starina, Vodná nádrž, EMEP	22,260012	49,042734	324	R	B	1	1
Stará Lesná, AÚ SAV, EMEP	20,289529	49,151384	808	R	B	1	1
Topoľníky, Aszód, EMEP	17,860238	47,959423	109	R	B	1	1
Trenčín, Hasičská	18,041240	48,896419	216	U	T	1	0
Trnava, Kollárova	17,584926	48,371385	144	U	T	1	0
Žilina, Obežná	18,771289	49,211470	357	U	B	1	1

meteorologickými alebo kalendárnymi obdobiami. Typický denný chod môže byť ovplyvnený nielen obdobím v ktorom sa meria, ale aj dňom v týždni (iný môže byť pre pondelok, piatok, či sobotu). V predloženej publikácii získavame priemerný dlhodobý profil priemerovaním hodnôt cez všetky obdobia a dni v týždni, s cieľom získať čo najhladší priebeh denného chodu, na ktorom sa ukážu charakteristiky danej stanice. V sekciách 2.2 a 3.2 diskutujeme, že pre uvedené látky denný chod získaný z dlhodobých, niekoľkoročných dát, dobre zodpovedá dennému chodu získanému len z ročných dát. Taktiež diskutujeme ako sa mení denný chod v priebehu roka. Dôvody, prečo uprednostňujeme uvádzanie denných chodov z priemerných dlhodobých dát namiesto sezónnych sú nasledovné: a) získame jeden profil, ktorý charakterizuje danú stanicu b) vyhýbame sa nejednoznačnosti definície priemerovacieho obdobia (určenia sezóny); aj priemerný sezónny profil necharakterizuje každý deň rovnako dobre, taktiež začiatok mesiaca má iné podmienky ako koniec mesiaca atď. c) výpočet je jednoduchý a pre znečisťujúce látky diskutované v tejto práci sa ukazuje, že tvar denného chodu získaného z dlhodobého priemeru postačuje na kategorizáciu stanice. Samozrejme aj denné profily pre jednotlivé sezóny, prípadne mesiace majú svoj význam, a preto ich čiastočne uvádzame v sekciách 2.2 a 3.2. Kategorizácia staníc podľa tvaru denných profilov znečisťujúcich látok (z ročných údajov) bola využitá pre dánske meteorologické stanice (Nguyen, 2009). V roku 2004 bola pomocou pomeru NO₂/NO kategorizovaná európska sieť staníc kvality ovzdušia (Snel, 2004). Stanice NMSKO doposiaľ neboli kategorizované na základe denného chodu koncentrácií znečisťujúcich látok.

2 DENNÁ VARIABILITA KONCENTRÁCIÍ NO₂

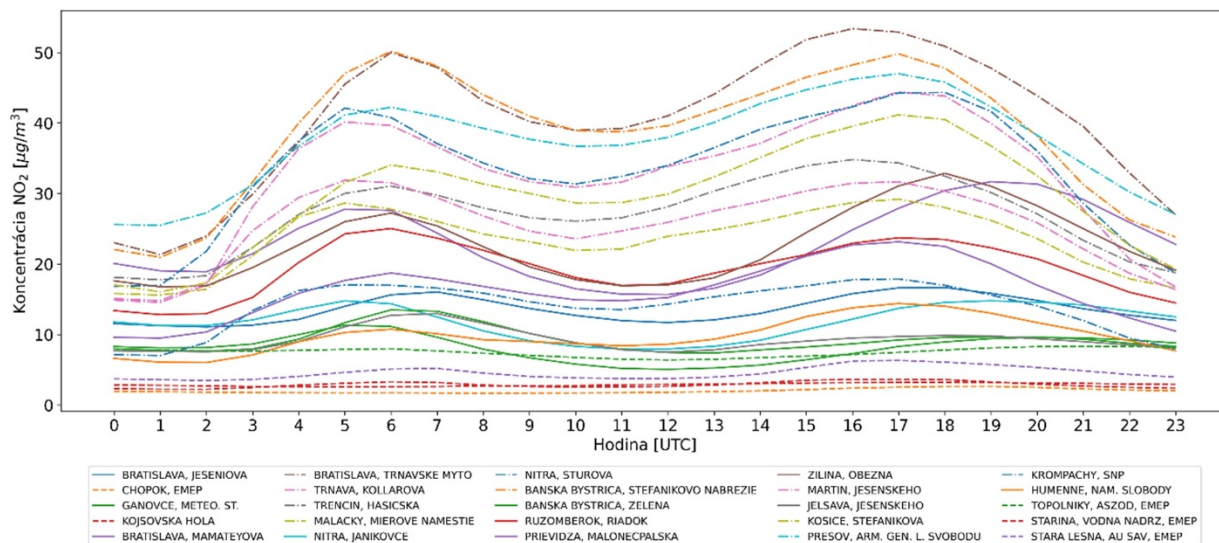
2.1 Denná variabilita na meracích staniciach NMSKO a kategorizácia staníc pomocou profilov

Pri pohľade na denné chody koncentrácií NO₂, ktoré sa získali priemerovaním z nameraných hodinových koncentrácií pre jednotlivé stanice NMSKO z rokov 2010–2020 na Obr. 2.1 vidíme, že mnohé majú spoločné črty. Na základe podrobnej analýzy sme určili štyri základné typy profilov na staniciach, podľa ktorých sme stanice zakategorizovali do nasledujúcich skupín:

- Profil s denným minimom v nočných hodinách okolo 00:00–01:00 UTC, s dvoma maximami okolo 5:00–6:00 UTC a 17:00–18:00 UTC, pričom večerné maximum je o čosi širšie. Lokálne minimum medzi dvoma spomenutými maximami sa dosahuje okolo 10:00–11:00 UTC a dosahuje úroveň zhruba 0,6 maximálnej hodnoty. Denné chody pre stanice, ktorým sme prisúdili Profil A sú zakreslené na Obr. 2.2, pričom kvôli vyniknutiu charakteristík profilu, sú denné chody na obrázku preškálované od 0 do 1. Do tejto skupiny patria všetky dopravné stanice.
- Profil s denným minimom v nočných hodinách okolo 00:00–02:00 UTC, s dvoma maximami okolo 6:00 UTC a 17:00–18:00 UTC. Lokálne minimum medzi dvoma spomenutými maximami sa dosahuje okolo 10:00–12:00 UTC a je hlbšie ako v prípade Profilu A. Preškálované denné chody staníc, ktorým sme prisúdili Profil B sú zakreslené na Obr. 2.3, pričom sem patria pozad'ové stanice rôzneho umiestnenia – predmestské, mestské ako i regionálne.

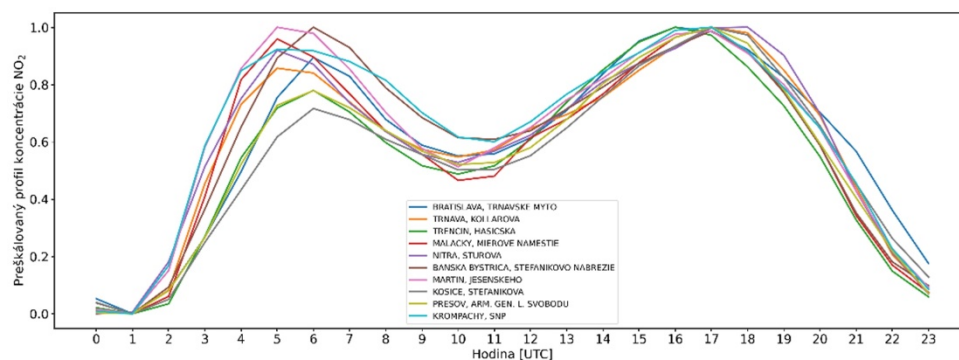
Obrázok 2.1. Priemerné denné chody koncentrácie NO₂ na staniciach NMSKO. Bodkočiarkovane sú označené mestské dopravné stanice, plnou čiarou predmestské a mestské pozad'ové stanice, čiarkovane regionálne pozad'ové stanice.

Figure 2.1. Mean diurnal profiles of NO₂ concentrations at NMSKO stations. Urban traffic stations – dash-dotted line, suburban and urban background stations – solid line, regional background stations – dashed line.



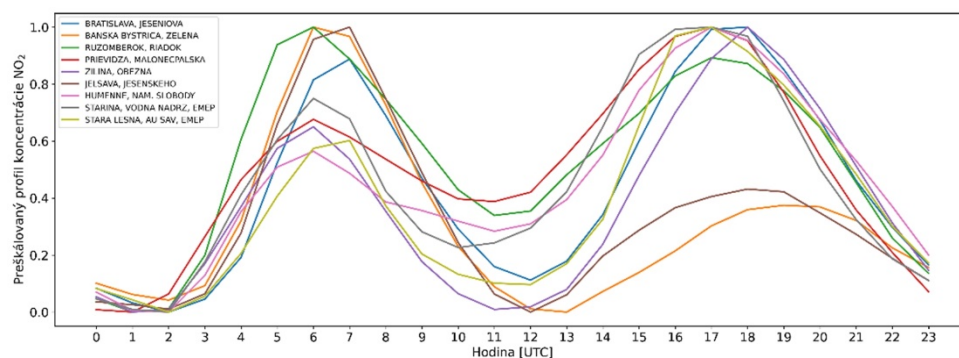
Obrázok 2.2. Stanice s Profilom A preškálovaným od 0 po 1.

Figure 2.2. Stations with A profile, scaled from 0 to 1.



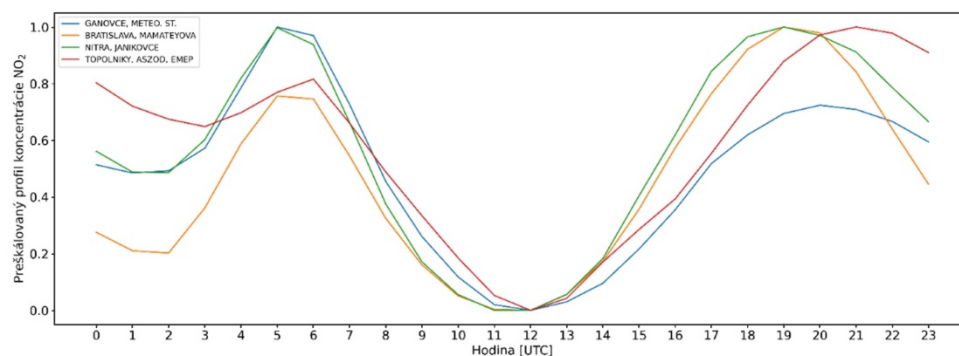
Obrázok 2.3. Stanice s Profilom B preškálovaným od 0 po 1.

Figure 2.3. Stations with B profile, scaled from 0 to 1.



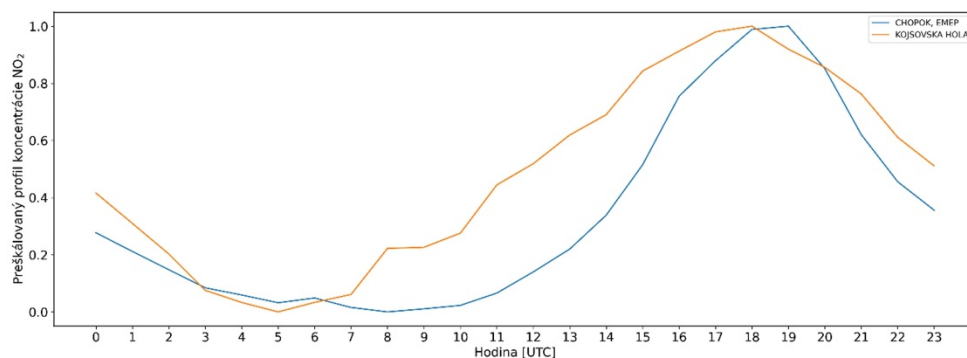
Obrázok 2.4. Stanice s Profilom C preškálovaným od 0 po 1.

Figure 2.4. Stations with C profile, scaled from 0 to 1.



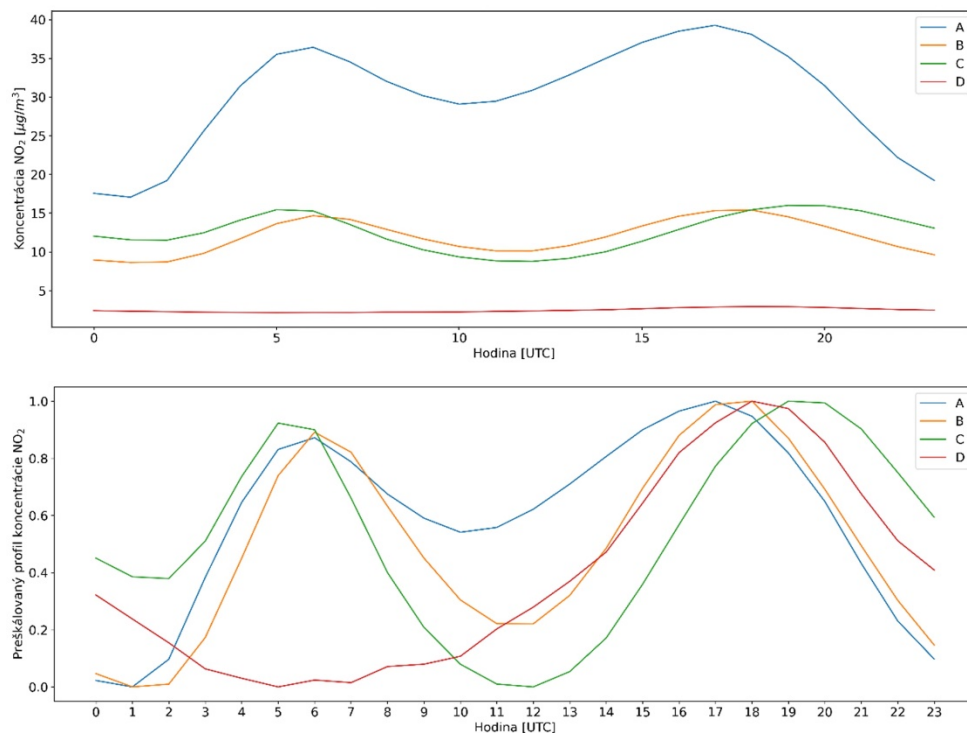
Obrázok 2.5.
Stanice s Profilom D
preškáľovaným
od 0 po 1.

Figure 2.5.
Stations with D profile,
scaled from 0 to 1.



Obrázok 2.6.
Denný profil
koncentrácií NO₂
pre základné typy (hore)
a preškáľované profily
(dole) .

Figure 2.6.
Diurnal profiles of NO₂
for categories A-D -
mean values (up) and
scaled profiles (down).



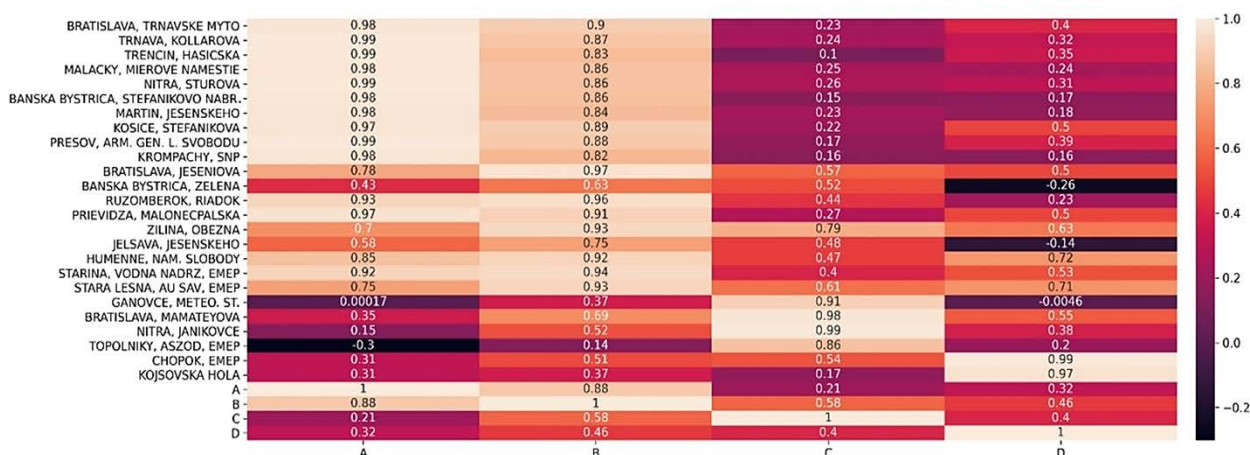
- C. Profil s absolútnym denným minimom koncentrácií okolo poludnia 12:00 UTC a vyššími koncentraciami v noci oproti dennému minimu (tým sa odlišujú od Profilov A a B). Preškáľované denné chody staníc, ktorým sme prisúdili Profil C sú zakreslené na Obr. 2.4, pričom sem patria len štyri pozad'ové stanice – 3 mestské a 1 regionálna.
- D. Posledný typ profilu sa uplatňuje len na dvoch regionálnych pozad'ových stanicích vysokohorského² typu s vysokou nadmorskou výškou – Obr. 2.5. Tento typ profilu má len jedno lokálne minimum v ranných hodinách a jedno maximum vo večerných hodinách.

² Vysokohorskými stanicami nazývame tie stanice, ktoré sa nachádzajú na vrchole významnejšej hory. V tejto práci ide o stanice Chopok-EMEP a Kojšovská hoľa. Pod pojmom nížinné stanice, v tejto práci myslíme všetky ostatné stanice, teda tie, ktoré sa nenachádzajú na vrchole hôr, hoci ich nadmorská výška môže byť pomerne vysoká (napr. Stará Lesná).

Denné chody pre NO₂ sme zoradili do štyroch kategórií. Ako reprezentanta kategórie vezmeme priemer chodov v danej kategórii, vzniknú nám tak štyri profily ako na Obr. 2.6. Aby sme vedeli, nakoľko dobre vystihuje daný profil konkrétne stanice, uvádzame korelačnú tabuľku na Obr. 2.7. Vidíme, že najviac medzi sebou korelujú profily A a B. Všetky dopravné stanice najlepšie vystihuje Profil A. Niektoré stanice, ktoré sme zaradili do Profilu B – Prievidza, Ružomberok, Starina (regionálna pozad'ová stanica) a Humenné, majú aj vysokú koreláciu s Profilom A, čo by mohlo indikovať, že doprava je hlavným zdrojom koncentrácií NO₂ aj na týchto stanicích (V prípade staníc Prievidza a Ružomberok je to zjavné, čo podporuje aj to, že na oboch sú dosahované vysoké koncentrácie NO. V prípade stanice Starina sú dosahované veľmi nízke koncentrácie NO₂ ako aj NO. Avšak vo vzdialenosti 100 m od stanice sa nachádza nevýznamná cestná komunikácia 558, ktorá je asi jediným blízkym zdrojom oxidov dusíka, hoci veľmi nevýrazným). Možno povedať, že zatiaľ čo stanice s Profilom A, sú dominantne ovplyvňované hlavne emisiami z blízkych ciest, stanice s Profilom B sú ovplyv-

Obrázok 2.7. Korelácia denných chodov NO₂ zo staníc so základnými typmi profilov.

Figure 2.7. Correlation of diurnal profiles of NO₂ at stations with profiles A–D.



ňované najmä mestským pozadím, teda kombináciou emisií zo vzdialenejších ciest, lokálnych kúrenísk a priemyslu, pričom rovnako ako v prípade staníc s Profilom A aj tieto majú výraznejšie maximá v ranných a večerných špičkách. Stanicu Prievidza, nechávame, kvôli optickej príbuznosti v Profile B, aj keď lepšie koreluje s Profilom A. Medzi stanicami, ktorým sme priradili Profil B, najmenej korelujú s týmto profilom Jelšava a Banská Bystrica-Zelená, ktoré majú výrazne nižšie večerné maximum oproti ránnému. Toto môže byť spôsobené tým, že emisie z dopravy tu majú omnoho menší vplyv ako napr. emisie z lokálnych kúrenísk. Na štyroch staniach, ktorým sme prisúdili Profil C, sa dosahuje absolútne minimum koncentrácií okolo poludnia, pričom koncentrácie v noci sú tu vyššie ako napoludnie. Ako si ukážeme v podkapitole 2.2 pomocou modelu, takýto profil sa veľmi podobá na denný chod s konštantnými emisiami počas dňa. Stanice Gánovce, Nitra-Janíkovce a Topolníky sú viac vzdialené od zdrojov NO_x s typickým denným chodom emisií (doprava, lokálne vykurovanie), ale sú v blízkosti poľnohospodárskych plôch a zariadení, kde je tok emisií NO_x rovnomernejšie rozložený počas dňa. Rovnako aj na stanici Bratislava-Mamateyova, ktorá je v blízkosti rafinérie Slovnaft, kde sa tiež predpokladá tok emisií NO_x zhruba konštantný počas dňa. Zaujímavosťou je poloha obedného minima koncentrácií, ktorá je v prípade Profilov B a C o 1 až 2 hodiny posunutá oproti minimu v Profile A o 10:00 UTC. Vysokohorské stanice Chopok a Kojšovská hoľa majú korelácie s inými profilmi ako D minimálne. Denná variabilita profilu D je v podstate minimálna, ako možno vidieť na Obr. 2.6 (hore), ale v prípade preškálovania na Obr. 2.6 (dole) je zreteľne vidieť jedno minimum a jedno maximum.

2.2. Časová charakteristika profilu, zmena profilu počas letných a zimných období

Uvedené denné profile na Obr. 2.1 boli získané priemerovaním 5 až 11 ročných časových radov koncentrácií v závislosti od prevádzkového obdobia stanice. Je však otázne, počas akého dlhého obdobia treba dáta priemerovať, aby sa získané chody z nich začali podobať uvedeným priemerným profilom. Pre jednoduchosť sme skúmali kore-

lácie profilov získaných z ročných dát s profilmi získanými za uvažované dlhšie obdobie. Napríklad pre stanicu Chopok sme zistili, že profil pre rok 2020 koreluje s profilom zostaveným z dostupných dát pre túto stanicu z rokov 2016 až 2020 na úrovni R=0,98. Najnižšia korelácia pre túto stanicu s profilom z dostupných dát bola pre rok 2016, kedy R=0,94 a najvyššia pre rok 2019 kedy R=0,99. Všeobecne profil vytvorený z dlhodobých dát koreloval veľmi dobre s profilmi vytvorenými pre jednotlivé roky pre všetky stanice. Väčšina korelácií dosahovala rozpätie od 0,93 do 0,99, len veľmi málo prípadov bolo pod 0,9 (napríklad Malacky).

Pozrime sa ako sa menia denné profile v priebehu roka. Ak zoberieme koreláciu denných profilov v jednotlivých mesiacoch spriemerovanú pre všetky uvažované stanice, dostaneme korelačnú maticu na Obr. 2.8, z ktorej vidno, že zimné mesiace slabšie korelujú s letnými a naopak. Z obrázku tiež možno vidieť, že výrazne korelujú profile v mesiacoch s podobnou dĺžkou dňa, tieto mesiace nemusia nutne patriť do rovnakého meteorologického obdobia. Napríklad denný profil v marci dobre koreluje s profilom vo februári a v apríli, ale aj v septembri. Vysoko sa na seba podobajú denné profile v novembri, decembri a januári. Korelácia denných profilov medzi zimnými a letnými mesiacmi je pomerne slabá, preto nemôžeme používať mesačné profile na klasifikáciu staníc podľa sekcie 2.1. Pre túto klasifikáciu treba požívať denný profil získaný aspoň z jednoročného priemerovania.

Na Obr. 2.9 sú vykreslené denné profile pre dopravné stanice (Profil A) v mesiacoch – január, apríl, júl a október, ktoré dobre charakterizujú zimné, jarné, letné, resp. jesenné obdobie. Poznamenajme, že pri čítaní grafu treba zohľadniť to, že v období januára je u nás SEČ = UTC+1, zatiaľ čo v ostatných mesiacoch je u nás LSEČ = UTC+2. Z obrázku vidno, že vzdialenosť dvoch maxim je najmenšia v zimných mesiacoch, keď je deň kratší, naopak predlžuje sa s dĺžkou dňa a maximum dosahuje okolo júna a júla. Obe maximá sú pomerne nízke v lete, čo je spôsobené tým, že v časoch dopravnej špičky okolo 7–9 h a 16–17 h SEČ sú v letných mesiacoch priaznivé rozptylové podmienky. Výraznejšie večerné maximá oproti ránnym v januári a v októbri, sú spôsobené tým, že počas

celej večernej dopravnej špičky, sú už zhoršené rozptylové podmienky (je už po západe slnka), ale počas rannej špičky vychádza slnko a turbulentný transport sa zväčšuje a koncentrácie klesajú. V mesiaci apríl zapadá slnko neskôr ako počas večernej dopravnej špičky, takže večerné maximum je menšie. Avšak ranné maximum ostáva významné, dokonca je trochu výraznejšie ako októbrové. Keď sa pozrieme na denný chod teploty na Obr. 2.10, vidíme, že v noci a skoro ráno je v apríli priemerne chladnejšie ako v októbri. V apríli relatívne suchý vzduch spolu s vychladeným povrchom, môžu spôsobovať silnejšie inverzie nadránom ako v mesiaci október. Podobná zmena denného profilu v rámci ročných období je aj pre stanice s profilmi B a C, ale pre stručnosť tu príslušné grafy neuvádzame. V prípade Profilu D sú závery ohľadom ročnej zmeny profilu nejasné, keďže na daných staniciach sú veľmi nízke koncentrácie a je ťažké oddeliť trend od neistôt prístroja a náhodnej fluktuácie dát.

2.3. Vysvetlenie profilov pomocou modelovania a fyzikálno-chemických procesov v atmosfére

Na základe kategorizácie v podkapitole 2.2 sa vynárajú otázky ohľadom pôvodu nasledujúcich javov:

1. Existencia obedňajšieho minima v prípade profilov A, B a C
2. Existencia 2 výrazných maxim v ranných a večerných hodinách oproti nočným koncentráciám v prípade profilov A, B, C
3. Vyššie koncentrácie v nočných hodinách ako počas poludnia v prípade profilu C
4. Poloha obedňajšieho minima je o 1–2 hodiny skôr v prípade Profilu A oproti profilom B a C
5. Existencia len jedného minima a maxima v prípade vysokohorských staníc.

Na vysvetlenie niektorých týchto javov si pomôžeme výsledkami z ročnej simulácie chemicko-transportného modelu CMAQ (Byun a Schere, 2006), do ktorého vstupujú meteorologické polia z modelu WRF (Skamarock, 2008). V simulácii bola použitá konfigurácia modelu ako v publikácii Štefánik (2020), ale pre rok 2017. Model bol spustený s dvoma rôznymi časovými chodmi emisií. Prvá simulácia mala časovo rozčlenené emisie so sezónnym aj denným chodom. Druhá simulácia mala konštantný chod emisií počas celého roka. Suma emisií v oboch simuláciách bola rovnaká.

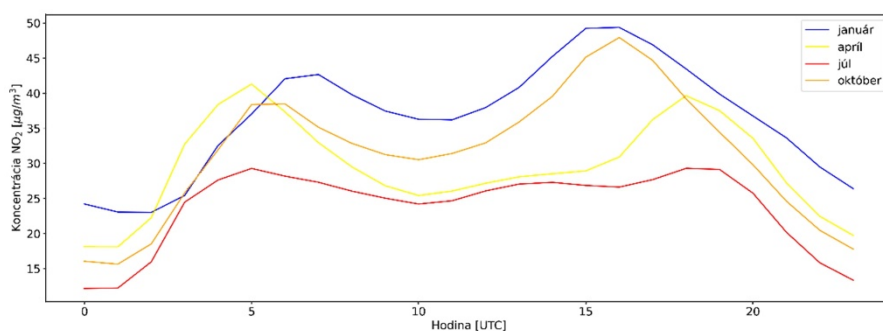
Obrázok 2.8.
Korelácia denných profilov NO_2 počas jednotlivých mesiacov. Uvedená hodnota zodpovedá priemernej korelácii zo všetkých staníc.

Figure 2.8.
Correlation of mean diurnal profiles of NO_2 for months of the year. The displayed values are average correlations for all the stations.



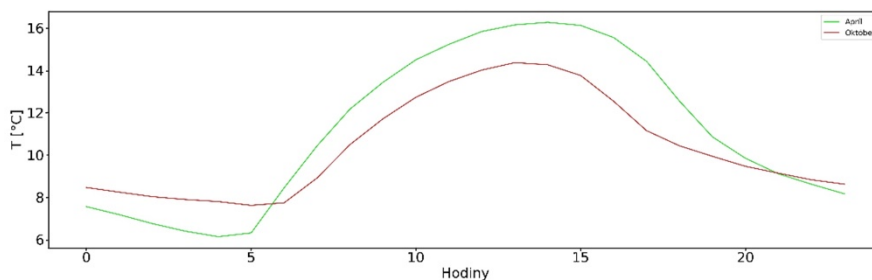
Obrázok 2.9.
Vývoj denného profilu A (dopravné stanice) NO_2 počas roka.

Figure 2.9.
Diurnal profile A (traffic stations) of NO_2 for seasons of the year.



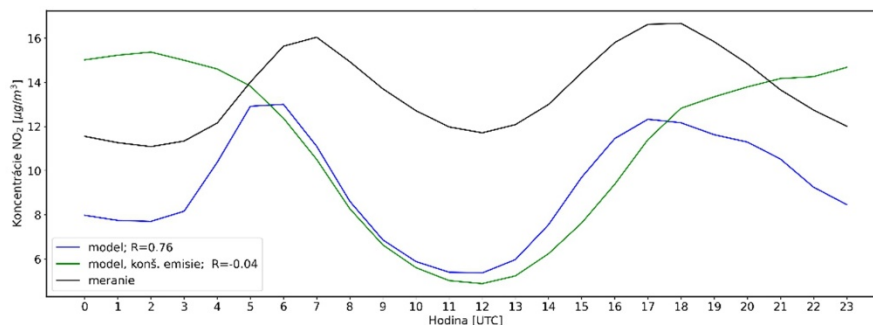
Obrázok 2.10.
Priemerný denný chod teploty na stanici Malacky pre mesiace apríl a október.

Figure 2.10.
Mean diurnal profile of temperature for Malacky station, for April and October.



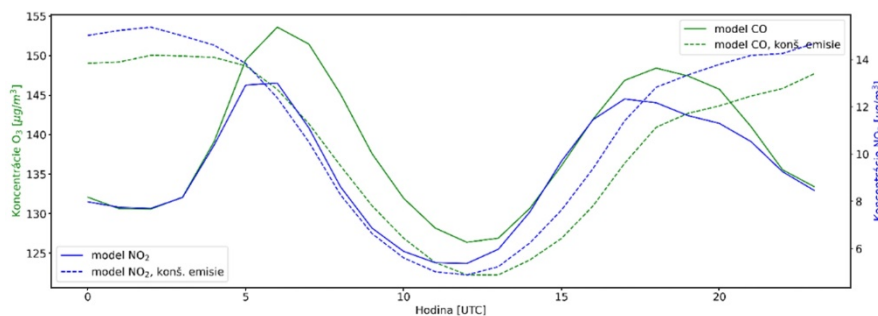
Obrázok 2.11.
Priemerný denný chod koncentrácií NO₂ na stanici Bratislava, Jeséniova z meraní a modelovania.

Figure 2.11. Observed and modelled mean diurnal profile of NO₂ concentrations for Bratislava, Jeséniova station.



Obrázok 2.12.
Priemerný denný chod koncentrácií NO₂ a CO na stanici Bratislava, Jeséniova z modelových simulácií.

Figure 2.12. Modelled mean diurnal profiles of NO₂ and CO concentrations for Bratislava, Jeséniova station.



Opíšme prvé štyri zo spomenutých javov. Pre lepšiu ilustráciu si vezmime situáciu na mestskej pozadovej stanici Bratislava, Jeséniova. Na Obr. 2.11 je znázornený priemerný denný chod koncentrácií NO₂ z meraní; z modelu CMAQ, kde sa uvažoval časový priebeh emisií; a z modelu CMAQ, v ktorom sme uvažovali, že časový priebeh všetkých emisií je konštantný počas celého roka, ale ich celková suma je totožná s predošlou simuláciou. Vidíme, že obe simulácie dosahujú minimum v obedňajších hodinách, zhruba v rovnakom čase ako aj namerané koncentrácie. Existencia tohto minima sa dá dobre vysvetliť pomocou meteorologických podmienok. V čase okolo poludnia je vertikálny turbulentný transport znečisťujúcich látok v hraničnej vrstve najväčší, a preto aj koncentrácie NO₂ sú v tejto dobe nižšie. Taktiež emisie sú v dobe okolo poludnia nižšie ako počas rannej a večernej špičky, čo tiež ovplyvňuje výšku koncentrácií počas poludnia. Ako však vidíme aj zo simulácie s konštantnými emisiami, minimum koncentrácie počas poludnia, t. j. v dobe štatisticky najpriaznivejších rozptylových podmienok by existovalo aj bez poklesu emisií medzi dvoma špičkami. Poznamenajme tiež, že NO₂ je veľmi reaktívna látka a jej koncentrácie úzko súvisia s koncentraciami NO a O₃, ako aj rôznymi reaktívnymi organickými zlúčeninami. Preto uvažujeme aj denný chod pomerne nereaktívnej látky CO. Na Obr. 2.12 je denný chod z dvoch modelových simulácií pre NO₂ a aj pre CO, pričom vidíme, že v oboch prípadoch sú koncentrácie minimálne približne v ten istý čas, avšak minimum koncentrácií pomerne málo reaktívneho CO nastáva o čosi neskôr aj pre simuláciu s konštantnými emisiami. To indikuje, že chemické reakcie môžu mierne ovplyvňovať polohu denného minima v chode NO₂ k skorším hodinám. V okolí dopravných staníc, sú zvýšené koncentrácie NO, NO₂ a ROG, a preto je tu vplyv chemických reakcií na koncentrácie ešte zásadnejší ako pri

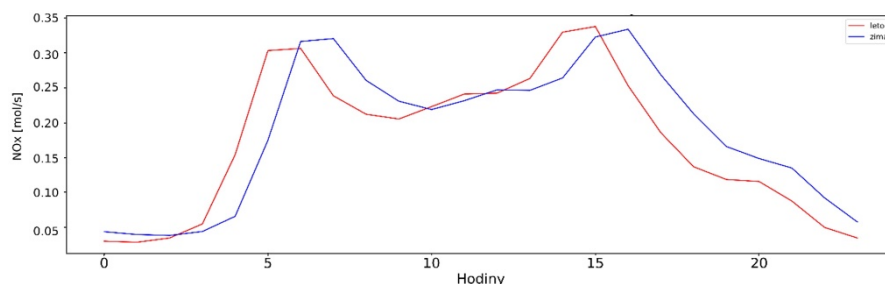
pozaďových staniciach. Toto by mohlo indikovať prečo je poloha obedňajšieho minima o 1–2 hodiny skôr v prípade Profilu A oproti profilom B a C, v ktorých je minimum dosahované v čase najpriaznivejších rozptylových podmienok. Ďalším dôvodom môže byť rozloženie emisií počas dňa a ich okamžitý prejav na dopravných staniciach a oneskorený na pozaďových. Nie je vylúčená ani kombinácia oboch dôvodov. Na opísanie tohto javu by sme však potrebovali modelovú simuláciu s detailnejším rozlíšením (na úrovni desiatok až stoviek metrov), nakoľko použitá simulácia s rozlíšením 4,7 km, je nedostatočná pre opis rozptylu znečisťujúcich látok v blízkosti ciest.

Z Obr. 2.11 ďalej vidíme, že modelová simulácia s konštantnými emisiami dosahuje len jedno maximum v nočných hodinách. V skutočnosti výsledky tejto simulácie vystihujú niektoré vlastnosti Profilu C, ktorý popisuje merania na staniciach, pri ktorých je nevýrazný chod emisií NO_x počas dňa. Konštantný tok emisií spôsobuje v noci nárast koncentrácií v dôsledku nízkej stabilnej prízemnej vrstvy. Tieto koncentrácie sa pri nezmenenom toku emisií dopoludnia znižujú súbežne s rastom vertikálneho turbulentného premiešavania. Keďže je vertikálny turbulentný transport pri zemi najväčší v čase obeda a potom klesá, koncentrácie budú narastať z obedného minima k nočnému maximu. V realite však emisie nie sú konštantné, a preto aj v profile C, na rozdiel od modelovej simulácie s konštantnými emisiami, existujú dve pomerne výrazné maximá – ranne a poobedné.

Z Obr. 2.11 vidno, že simulácia z modelu CMAQ popisuje denný chod koncentrácií na predmestskej pozadovej stanici BA, Jeséniova pomerne dobre ($R=0,76$). Na Obr. 2.13 je znázornený denný emisný profil NO_x (NO₂+NO) použitý v tejto simulácii v mriežkovom bode, do ktorého spadá stanica BA, Jeséniova. Z porovnania merania a dvoch modelových simulácií na Obr. 2.12 môžeme

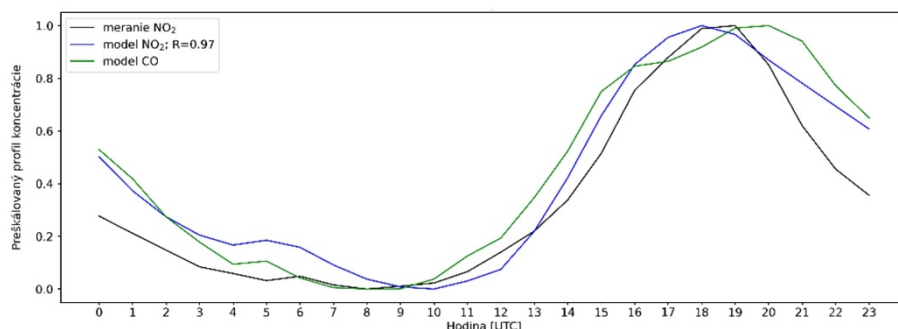
Obrázok 2.13.
Denný chod emisií NO_x v modeli v mriežkovom bode stanice Bratislava, Jeséniova.

Figure 2.13.
Mean diurnal profile of NO_x emissions in Bratislava, Jeséniova station grid cell.



Obrázok 2.14.
Denný chod koncentrácií NO_2 na stanici Chopok z merania a modelu. Na porovnanie aj s denným chodom koncentrácií CO z modelu.

Figure 2.14.
Observed and modelled mean diurnal profiles of NO_2 concentrations at Chopok station. The modelled mean diurnal profile of CO is included for comparison.



povedať, že existencia dvoch výrazných maxím v profiloch A, B a C je spôsobená najmä vyššími emisiami v týchto hodinách spolu s tým, že rozptylové podmienky počas tejto doby nie sú také dobré ako okolo poludnia. V prípade staníc s Profilom C, ktoré sú pravdepodobne najviac ovplyvnené emisiami, ktoré nemajú až taký výrazný denný chod ako emisie z dopravy, sú však tieto maximá menej výrazné v porovnaní s nočnými hodinami.

V poslednom rade je potrebné vysvetliť Profil D na vysokohorských staniciach. Ako vidieť z Obr. 2.14, model CMAQ dokáže zachytiť správanie Profilu D na stanici Chopok, a tento profil dobre koreluje aj pre relatívne stabilné CO. Tento profil by sa dal opísať nasledovne. Vo vysokohorských staniciach nepredpokladáme žiadne emisie NO_x . Ráno a dopoludnia sú tu koncentrácie minimálne. Postupom dňa narastá výška premiešavania a vertikálnym transportom sa znečistenie postupne dostáva z podhorských oblastí aj do vyšších polôh. Koncentrácie mierne narastajú až dosiahnu maximum v skorých večerných hodinách. Po západe Slnka sa pri zemi tvorí stabilná vrstva, ktorá zamedzuje turbulentnému premiešavaniu prízemných emisií do vyšších vrstiev. Nad ňou zostáva reziduálna vrstva, pozostatok premiešavacej vrstvy (Stull, 1988), ktorá priamo ovplyvňuje vysokohorské stanice. V tejto vrstve pokračuje turbulentné premiešavanie, a preto tu koncentrácie klesajú až do ranného minima. Poznamenajme, že koncentrácie NO_2 sú na vysokohorských staniciach veľmi nízke a denný chod koncentrácií je minimálny ako vidieť z Obr. 2.6 (hore).

2.4. Vzťah medzi dennými chodmi NO_2 a NO

Z hľadiska kategorizácie staníc je zaujímavé skúmať aj priemerné denné chody koncentrácií NO a ich porovnanie s dennými chodmi NO_2 . Pribeh koncentrácií NO a NO_2 na typickej pozadovej stanici vidíme na Obr. 2.15 a typickej dopravnej stanici na Obr. 2.16. Väčšina emisií NO_x je vo

forme NO, a preto vidíme vysoké koncentrácie NO na dopravných staniciach, najmä v ranných a večerných hodinách, ktoré sú spôsobené tým, že NO z blízkych emisných zdrojov, sa ešte nestihli transformovať na NO_2 .

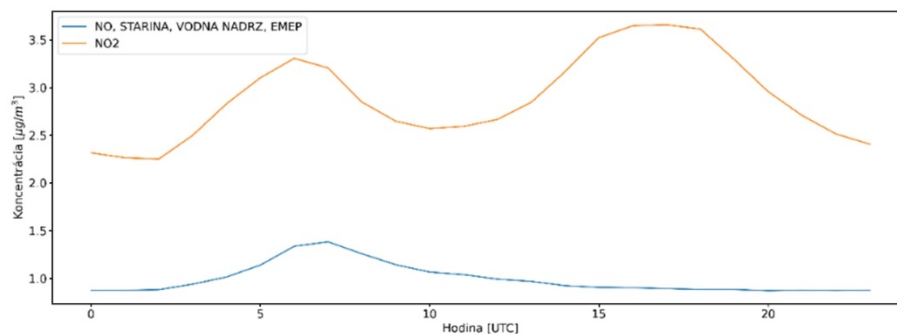
Pre nedostatok miesta neukážeme denné chody koncentrácií NO pre všetky stanice, avšak možno povedať, že všetky chody s výnimkou stanice Chopok-EMEP³, majú absolútne maximum v ranných hodinách. Lokálne večerné maximum, je najvýraznejšie pre stanice v blízkosti zdrojov a je menej významné na pozadových staniciach, pričom v prípade regionálnych pozadových staníc je takmer úplne neprítomné. Koncentrácie NO sú spravidla omnoho nižšie ako NO_2 , výnimku tvoria stanice dopravné, kde sú koncentrácie NO porovnateľné alebo vyššie (najmä v ranných hodinách) ako NO_2 . Klasifikácia resp. reprezentatívnosť staníc by mohla byť stanovená aj na základe porovnania profilov NO_2 a NO; pričom ak by sa ich denný profil podobal tomu na Obr. 2.16 išlo by o dopravnú stanicu, ak na Obr. 2.15 išlo by o regionálnu pozadovú stanicu. Poznamenajme, že takáto kategorizácia platí dobre pre všetky dopravné a regionálne pozadové stanice NMSKO (neukázané v článku).

Zaujímavosťou je ranný nárast koncentrácií NO na všetkých pozadových staniciach, ako vidíme aj na Obr. 2.15. Pokúsme sa vysvetliť tento nárast pomocou základných chemických rovníc vo voľnej (pozadovej)

³ Na stanici Chopok-EMEP sú celkovo veľmi nízke koncentrácie NO a zároveň malá variabilita denného chodu s minimom približne $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a maximom $1,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, preto nie je jasné nakoľko tvar priemerného denného chodu NO určuje neistota meraní. Z tohto dôvodu denný chod NO pre stanicu Chopok-EMEP neanalyzujeme.

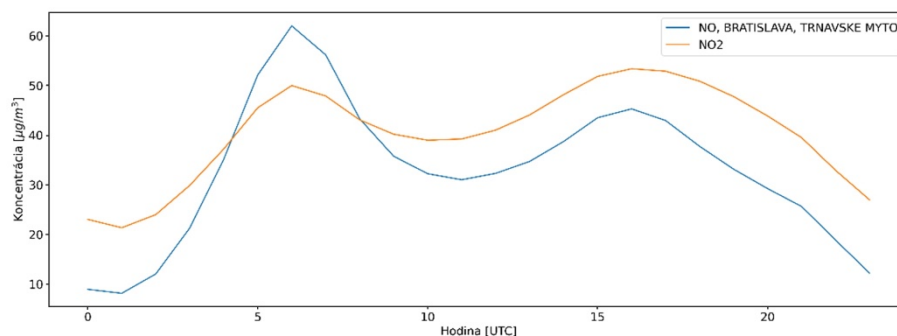
Obrázok 2.15.
Priemerný denný priebeh koncentrácií NO a NO₂ na pozadovej stanici Starina, EMEP.

Figure 2.15.
Mean diurnal profiles of NO and NO₂ at Starina, EMEP background station.



Obrázok 2.16.
Priemerný denný priebeh koncentrácií NO a NO₂ na dopravnej stanici Bratislava, Trnavské mýto.

Figure 2.16.
Mean diurnal profiles of NO and NO₂ at Bratislava, Trnavské mýto traffic station.



troposfére, kde sú dôležité nasledovné reakcie: 1) NO reaguje s ozónom a vzniká NO₂ a O₂, 2) NO₂ sa v prítomnosti slnečného žiarenia rozpadá na NO a O. 3) Z produktov predošlých reakcií vzniká opäť ozón. Tieto reakcie možno zapísať ako



Z rovníc (1) až (3) sa dá odvodiť podmienka pre fotostacionárny stav (Jacobson, 2002), ktorý by mal približne platiť pre koncentrácie vo voľnej troposfére

$$\frac{[\text{NO}_2]}{[\text{NO}]} = \frac{k[\text{O}_3]}{J}, \quad (4)$$

pričom k a J sú konštanty reakcie (1) a (2). Konštanta k závisí od teploty (Jacobson, 2002) a konštanta J od intenzity slnečného žiarenia (Parrish, 1982). V noci je reakcia (2) zastavená, a žiadne NO, O, a teda ani O₃ nie sú produkované chemicky. Preto sú v noci prakticky všetky NO_x vo forme NO₂, nočné koncentrácie NO sú minimálne a pomer (4) neplatí. Ráno po východe slnka začne prebiehať reakcia (2), čím sa začne produkovať NO. Pomer koncentrácií NO₂ k NO by teraz mal spĺňať rovnicu (4). Lenže pomer NO₂ k NO na ľavej strane rovnice (4) je po noci vyšší ako by mal byť podľa pravej strany rovnice (4), preto v ranných hodinách, aby bola splnená rovnosť (4) narastá koncentrácia NO. Na základe týchto úvah by koncentrácie NO mali narastať počas celého dopoludnia, keďže vtedy narastá aj hodnota konštanty J . Avšak tento nárast koncentrácií pozorujeme len ráno, neskôr koncentrácie NO klesajú, keďže cez deň narastajú koncentrácie ozónu a tiež sa významne zlepšujú rozptylové podmienky. Poobede, s poklesom slnečného žiarenia fotochemická

reakcia (2) slabne, a teda na základe vzťahu (4) by mali koncentrácie NO klesať. Z tohto dôvodu, na skutočne pozadových staniciach pozorujeme len jedno ranné maximum NO a nie večerné.

V prípade dopravných staníc je situácia komplikovanejšia a vzťah (4) odvodený z rovníc (1) až (3) neplatí, pretože v blízkosti ciest sú vysoké emisie NO a reaktívnych organických plynov (ROG), ktoré oxidujú na organické peroxidové radikály a reagujú s NO a ich produktom je NO₂. Typický priebeh koncentrácie NO na dopravnej stanici, ktorý je na Obr. 2.15 má dve výrazné maximá, pričom ranné je výraznejšie ako večerné. Z týchto skutočností sa dá usúdiť, že vo všeobecnosti ranné maximum NO je kombináciou vysokých emisií a chemických procesov. V prípade regionálnych pozadových staníc sú to výlučne chemické procesy ovplyvňujúce ranné maximum, kým v prípade dopravných staníc sú to najmä emisie ale čiastočne aj chemické procesy. Čo sa týka večerného maxima, to je spôsobené výlučne zvýšenými emisiami, a preto jeho hodnoty sú najväčšie na staniciach v blízkosti dopravných zdrojov, a naopak na regionálnych pozadových staniciach sa nepozoruje. Poznamenajme, že simulácia modelom CMAQ nám dokázala dobre popísať denný chod NO len pre regionálnu pozadovú stanicu, čo je zrejme spôsobené použitým rozlíšením 4,5 km, ktoré je nedostatočné na opísanie dopravných staníc.

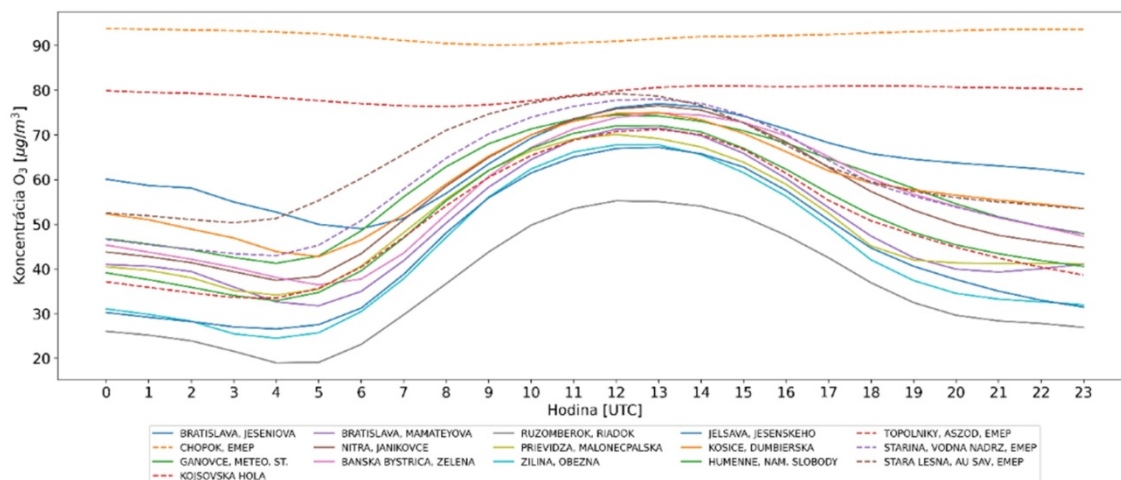
3 DENNÁ VARIABILITA KONCENTRÁCIÍ O₃

3.1 Denná variabilita na meracích staniciach NMSKO a kategorizácia staníc pomocou profilov

Pri pohľade na priemerné denné chody koncentrácií O₃ vytvorené z nameraných hodinových koncentrácií pre jednot-

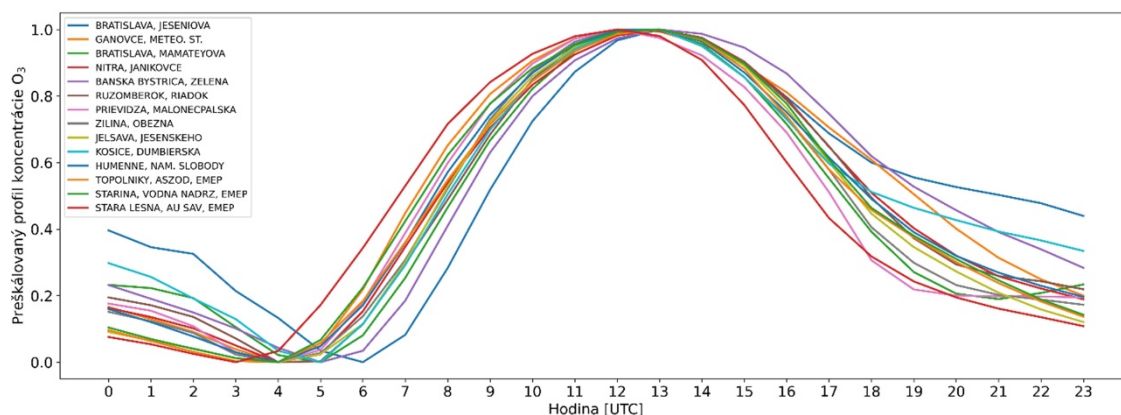
Obrázok 3.1. Priemerné denné chody koncentrácie O_3 na staniciach NMSKO. Plnou čiarou sú označené predmestské a mestské pozad'ové stanice, čiarkovane regionálne pozad'ové stanice.

Figure 3.1. Mean diurnal profiles of O_3 at NMSKO stations. Suburban and urban stations – solid line, regional background stations – dashed line.



Obrázok 3.2. Denný chod O_3 preškálovaný od 0 po 1 pre stanice s Profilom A. Patria sem všetky nížinné stanice.

Figure 3.2. Scaled mean diurnal profiles of O_3 at NMSKO stations. All non-mountain stations are included.



livé stanice NMSKO počas rokov 2010 – 2020 na Obr. 3.1 vidíme, že existujú len dva základné typy profilov⁴:

A. Profil s nízkymi koncentraciami v noci, s minimom nadržanom okolo 04:00-05:00 UTC a maximom okolo poludnia 12:00-13:00 UTC. Preškálované denné chody staníc, ktorým sme prisúdili Profil A sú zakreslené na Obr. 3.2. Do tejto skupiny sme priradili všetky dostupné stanice s výnimkou vysokohorských. Vidíme, že poloha minima a maxima sa pre jednotlivé stanice líši. Hlbšia analýza by i tu mohla odhaliť na základe rozdielov chodov ďalšie rozkategORIZOVANIE staníc, ale v tejto práci sa pre jednoduchosť tomu venovať nebudeme.

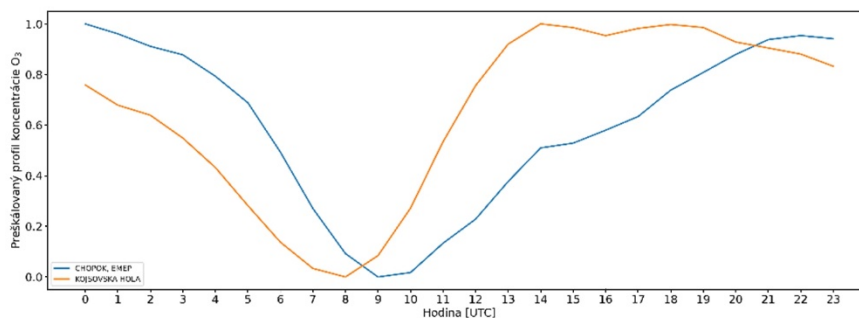
⁴ Z pohľadu predkladanej štúdie je škoda, že na žiadnej z dopravných staníc sa ozón nemeria. Je to kvôli tomu, že hodnoty ozónu sú spravidla na dopravných staniciach veľmi nízke, a teda neprekračujú limitné hodnoty, čím nevzniká povinnosť monitorovať ozón na dopravných staniciach. Nízke hodnoty ozónu sú tu kvôli vysokým emisiám NO a reakcii (1).

B. Rovnako ako v prípade profilov pre NO_2 , aj v prípade ozónu vyčleňujeme samostatný profil pre dve vysokohorské regionálne pozad'ové stanice. Ako vidno z Obr. 3.1 pre tieto stanice sú typické takmer konštantné koncentrácie počas dňa, avšak možno pozorovať drobný pokles koncentrácií okolo 07:00 – 11:00 UTC. Tento pokles je badateľnejší na preškálovaných denných chodoch staníc na Obr. 3.3. Poznamenajme, že podobný pokles je vidno aj na staniciach Skalnaté Pleso (1778 m n.m.) a Lomnický štít (2635 m n.m.), kde sa merala koncentrácia ozónu v roku 2016 v súvislosti s jeho negatívnym vplyvom na rastliny, najmä kosodrevinu (Bičárová, 2018).

Podobne ako v prípade NO_2 , ako reprezentanta kategórie vezmeme priemer chodov z danej kategórie. Stanice, ktorým sme priradili Profil A potom korelujú s týmto reprezentatívnym profilom na úrovni 0,9–1, pričom ich korelácia s reprezentatívnym profilom B je veľmi nízka. Tieto dva reprezentatívne profily neuvádzame, dajú sa ľahko odvodiť z Obr. 3.2 a Obr. 3.3.

Obrázok 3.3.
Denný chod O_3 preškáľovaný
od 0 po 1 pre stanice
s Profilom B. Patria sem
všetky vysokohorské stanice.

Figure 3.3.
Mean diurnal profiles
of O_3 on NMSKO for
mountain stations.



Obrázok 3.4.
Korelácia denných profilov O_3
počas jednotlivých mesiacov.
Uvedená hodnota zodpovedá
priemernej korelácii zo
všetkých staníc.

Figure 3.4.
Correlation of mean diurnal
profiles of O_3 for months
of the year. The displayed values
are average correlations for all
the stations.



3.2. Časová charakteristika profilu, zmena profilu počas letných a zimných období

Uvedené chody na Obr. 3.1 boli, rovnako ako v prípade sekcie 2, získané priemerovaním 5 až 11 ročných časových radov. Taktiež môžeme konštatovať, že pre všetky stanice koreloval denný chod ozónových koncentrácií vytvorený z dlhodobých meraní veľmi dobre s chodmi vytvorenými pre jednotlivé roky. Tieto korelácie pre nížinné stanice boli v rozpätí od 0,98 do 0,99. Pre vysokohorské stanice Kojšovská hoľa a Chopok, boli tieto korelácie o čosi nižšie, ale aj tak pre väčšinu rokov boli nad 0,9.

Pozrime sa ako sa menia denné profily v priebehu roka. Ak zoberieme koreláciu denných profilov v jednotlivých mesiacoch spriemerovanú pre všetky uvažované stanice, dostaneme korelačnú maticu na Obr. 3.4, z ktorej vidno, že pomerne dobre medzi sebou korelujú profily pre mesiace marec až október. Tieto profily slabšie korelujú so zimnými profilmi.

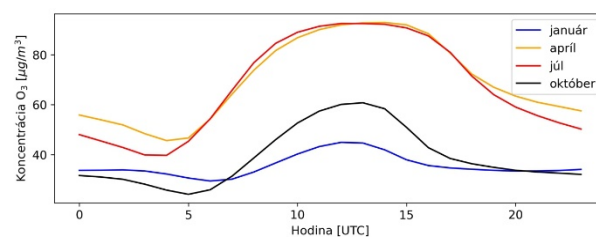
Na Obr. 3.5 sú vykreslené denné profily ozónu pre nížinné stanice (Profil A) v mesiacoch – január, apríl, júl a október. Z obrázku vidno, že ozónové koncentrácie sú najväčšie v letných a jarných mesiacoch, menšie na jeseň a najmenšie v zime. Táto sezónna zmena koncentrácií ozónu je spôsobená viacerými faktormi. V letných a jarných mesiacoch je najväčšie turbulentné premiešavanie atmosféry, čo spôsobuje, že sa ozón z vyšších vrstiev troposféry, kde ho je viac, dostáva vo väčšej miere do prízemnej vrstvy atmosféry. V zime prevažuje stabilné zvrstvenie s nízkou vrstvou premiešavania, ktorá zabraňuje prísunu ozónu z vyšších vrstiev troposféry. Ďalším faktorom je kolísanie ozónu v troposfére, kvôli zmene výšky tropopauzy, čo spôsobuje nárast prízemného ozónu v našich zemepisných šírkach na jar a v skorom lete (Warneck, 1988). Neposledným faktorom je tzv. fotochemický smog,

ktorý vzniká najčastejšie v lete a spôsobuje nárast koncentrácií prízemného ozónu.

Ako si povieme v nasledujúcej kapitole, v prípade vysokohorských staníc je denný profil ozónu ovplyvňovaný horsko-dolinnou cirkuláciou – horským a údolným vetrom. Na Obr. 3.6 vidíme, že horský vietor najviac ovplyvňuje koncentrácie ozónu v lete, kedy je najsilnejší, najmenej v zime, kedy je jeho vplyv zanedbateľný.

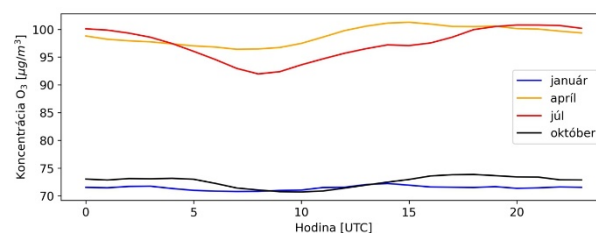
Obrázok 3.5. Vývoj denného Profilu A (nížinné pozad'ové stanice) O_3 počas roka.

Figure 3.5. Evolution of diurnal profile A (traffic stations) for O_3 during the year.



Obrázok 3.6. Vývoj denného Profilu B (vysokohorské pozad'ové stanice) O_3 počas roka.

Figure 3.6. Evolution of diurnal profile B (mountain stations) for O_3 during the year.



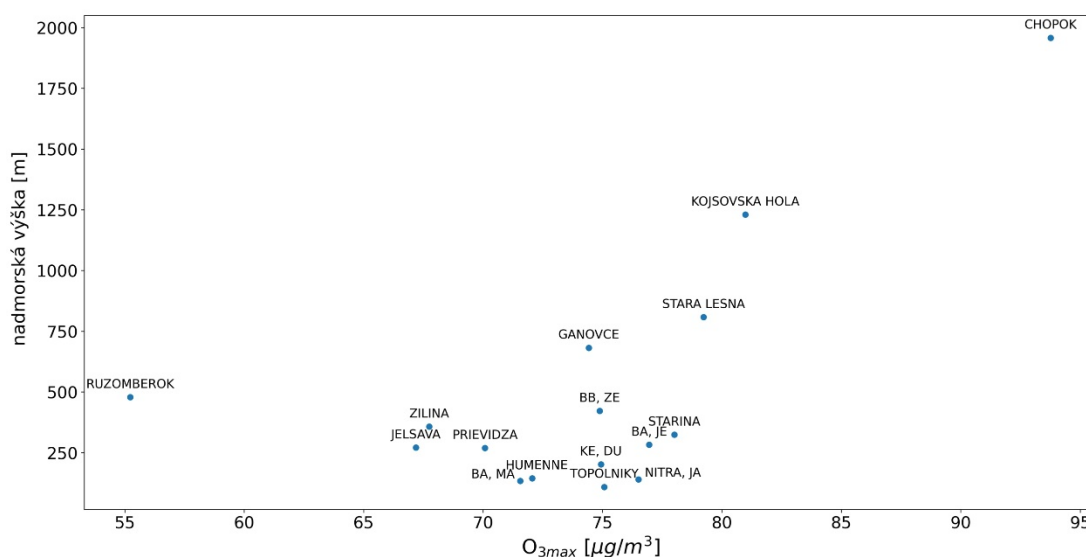
3.3 Vysvetlenie ozónových profilov pomocou fyzikálno-chemických procesov v atmosfére

Denné maximá ozónových koncentrácií na nížinných stanicích sú spôsobené slnkom indukovanou turbulenciou, vďaka ktorej sa dostáva ozón z vyšších vrstiev troposféry, kde je ho vo všeobecnosti viac, bližšie k zemi. Maximum koncentrácií sa tu dosahuje krátko po poludní, kedy je táto turbulencia najviac rozvinutá. Z Obr. 3.1 je vidieť, že na požadovej stanici Stará Lesná s nadmorskou výškou 808 m sú koncentrácie ozónu v čase okolo poludnia približne rovnaké ako tie namerané na vysokohorskej stanici Kojšovská hoľa (1253 m n.m.). Merania na vysokohorskej stanici Kojšovská hoľa môžeme v dobrom priblížení považovať za merania vo voľnej troposfére. Týmto by sme potvrdzovali tvrdenie, že denné maximá ozónu sú v prípade relatívne neznečisteného ovzdušia spôsobené tokom ozónu z vyšších vrstiev troposféry a sú ekvivalentné koncentráciám ozónu vo voľnej troposfére v príslušnej výške (Warneck, 1988). Koncentrácie ozónu sú na nížinných stanicích minimálne počas skorého rána, kedy prevažujú stabilné podmienky v hraničnej vrstve – ozón z vyšších vrstiev atmosféry vtedy nepreniká do prízemnej vrstvy. V noci ozón nemôže vznikáť chemicky, stratové procesy ozónu v noci prevažujú, a preto sú koncentrácie O_3 v skorých ranných hodinách minimálne. Na základe doterajších úvah by stanice s nízkou nadmorskou výškou mali dosahovať približne rovnaké maximum ozónu v čase obeda. Na Obr. 3.7 je znázornená závislosť priemerného denného maxima koncentrácie od nadmorskej výšky. Vidíme, že niektoré stanice majú významne menšie maximá O_3 v porovnaní s požadovou stanicou Topoľníky, ktorá je málo ovplyvnená lokálnym znečistením. Najjasnejším príkladom je stanica Ružomberok s nízkymi priemermi a maximami koncentrácií ozónu. Ak si vykreslíme závislosť maximálnych denných koncentrácií ozónu na maximálnych denných koncentráciách NO, dostaneme graf na Obr. 3.8, z ktorého môžeme vidieť, že

na stanici Ružomberok sú vysoké koncentrácie NO, ktoré spôsobujú úbytok ozónu pomocou rovnice (1). Podobne vysoké koncentrácie NO sú dosahované aj na stanici Žilina, avšak maximá ozónových koncentrácií sú tu podstatne vyššie ako v Ružomberku. Toto je pravdepodobne spôsobené vznikom ozónu pomocou reakcií reaktívnych organických plynov (ROG) a NO, ktoré sa nachádzajú vo väčšom množstve v znečistenom mestskom prostredí. Z tejto reakcie vznikne NO_2 a následne pomocou reakcií (2) a (3) ozón. V silne znečistenom mestskom prostredí fotostacionárny stav (4) pre ozón neplatí, a od koncentrácií NO_x a ROG závisí, či budú koncentrácie ozónu vyššie alebo nižšie ako vo fotostacionárnom stave. V prípade stanice Ružomberok, kde sú vysoké koncentrácie NO a nízke koncentrácie ozónu, vo významnej miere dlhodobo prevláda titrácia ozónu prostredníctvom NO nad jeho tvorbu prostredníctvom ROG a NO_x . Pri ostatných mestských a predmestských požadových stanicích je efekt titrácie ozónu prostredníctvom NO slabší, prípadne je tlmený jeho tvorbou prostredníctvom ROG, čo bude zrejme aj prípad na stanici Žilina. Na Obr. 3.9 vidno, že ozónové maximum sa dá pomerne dobre vyjadriť v tvare $O_{3max(fit)} = -0,64 NO_{max} + 0,0078 (\text{nadmorská výška}) + 75,76$. Korelácia tohto fitu s nameranými maximami je $r = 0,89$ a $RMSE = 3,7 \mu g/m^3$. Poznamenajme, že hoci na niektorých stanicích ako napríklad Bratislava, Jeseniova, občas zaznamenávame zvýšené koncentrácie ozónu v dôsledku jeho fotochemickej produkcie, priemerné denné maximá na uvažovaných nížinných stanicích nie sú dôsledkom fotochemickej produkcie ozónu, ktorá je najväčšia v čase obeda, ale v dôsledku spomínaného turbulentného premiešavania a toku vyšších koncentrácií ozónu z horných vrstiev troposféry. Argumenty pre toto tvrdenie sú nasledovné: 1) Maximá sa vyskytujú na všetkých nížinných stanicích v približne rovnaký čas, vrátane staníc ďaleko od znečistenia ROG. Ak by maximum bolo spôsobené ozónom, ktorý vznikol v mestách, kde bol vyprodukovaný vďaka reakciám ROG a NO, a následne

Obrázok 3.7. Závislosť priemerného denného maxima koncentrácie O_3 na nadmorskej výške.

Figure 3.7. Function of mean daily maximum of O_3 concentrations on altitude.



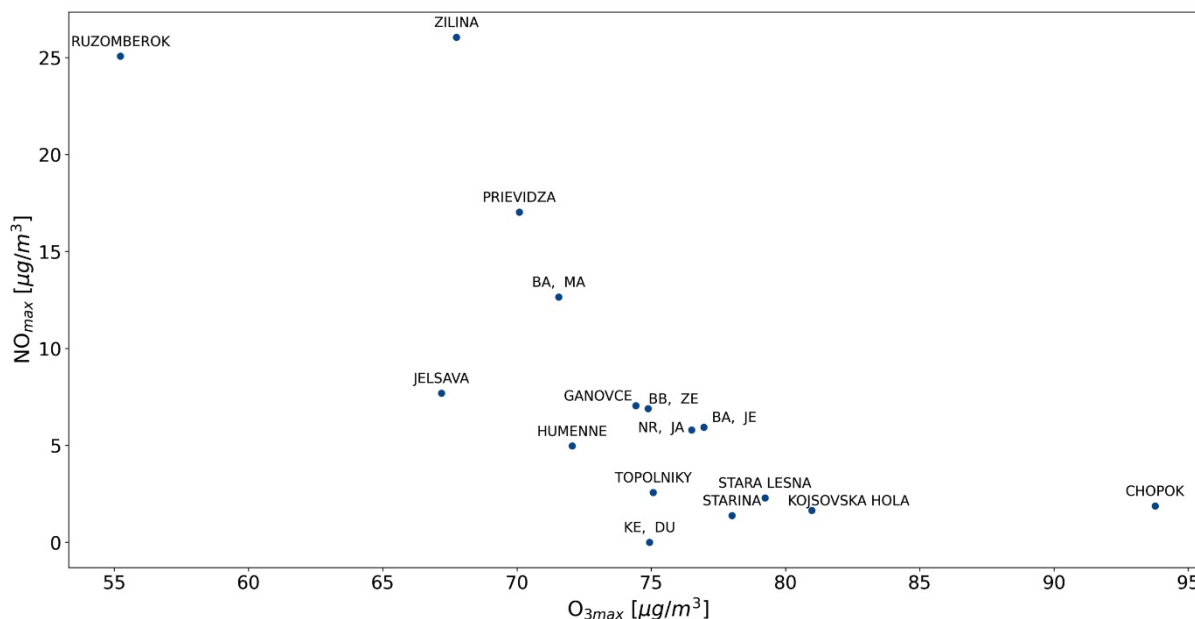
bol advekčne presunutý ďalej od zdrojov znečistenia, potom by na regionálnych pozadových staniciach malo byť toto maximum pozorované neskôr ako na mestských pozadových staniciach. Takýto posun však nepozorujeme. 2) Vznik týchto ozónových maxim, ktoré sú od ranných miním väčšie o cca. $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sa nedá vysvetliť ani pomocou rovníc (1), (2) a (3). Simulácie s reálnymi dátami ukazujú, že hoci J rastie spolu s intenzitou slnečného

žiarenia, a teda produkcia ozónu prostredníctvom rovníc (2) a (3) je maximálna na obed, systém rovníc (1) až (3), môže zväčšiť koncentrácie ozónu len o $2-4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ oproti rannému minimu.

Poznamenajme, že uvedené úvahy sa týkali len dlhodobých dát spriemerovaných počas všetkých mesiacov. Ak by sme priemerovali len počas letných mesiacov, najmä počas júla a augusta, zistili by sme, že na niektorých sta

Obrázok 3.8. Vzťah medzi priemerným denným maximom koncentrácie O_3 a priemerným denným maximom koncentrácie NO_2 .

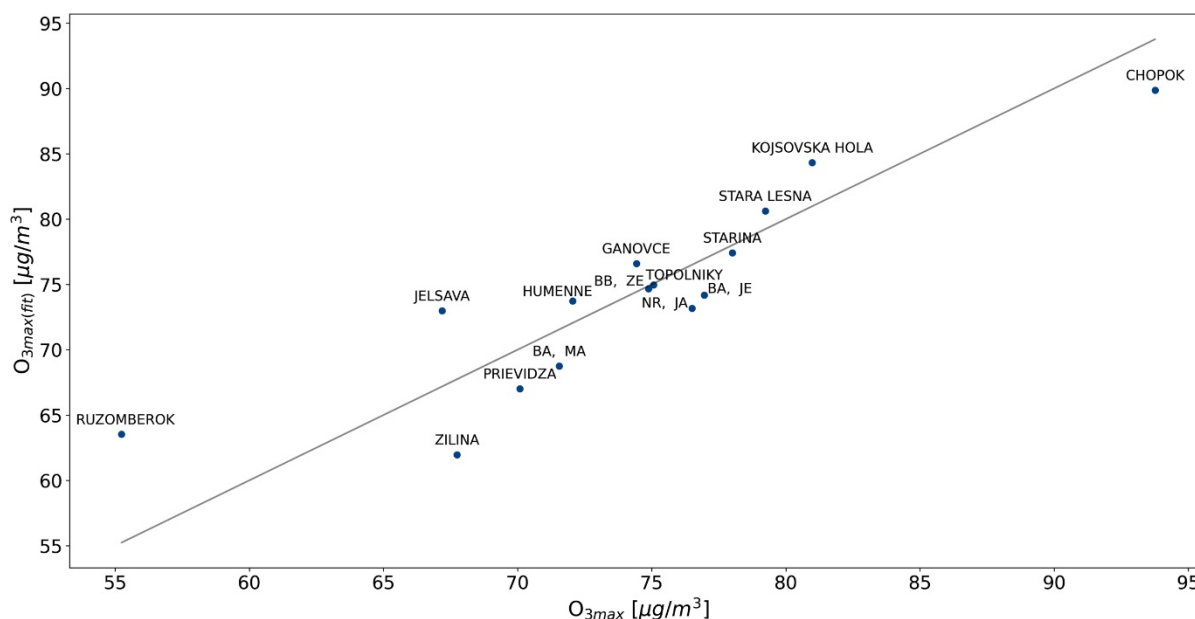
Figure 3.8. Function of mean daily maximum of O_3 concentrations on mean daily maximum of NO_2 concentrations.



Obrázok 3.9. Vzťah medzi priemernými dennými maximami koncentrácií $\text{O}_{3\text{max}}$ z merania a naftovanými hodnotami $\text{O}_{3\text{max}(\text{fit})} = -0,64 \text{NO}_{\text{max}} + 0,0078$ (nadmorská výška) + 75,76.

Figure 3.9. Function of the observed mean daily maximum of O_3 concentrations - $\text{O}_{3\text{max}}$, on regression values

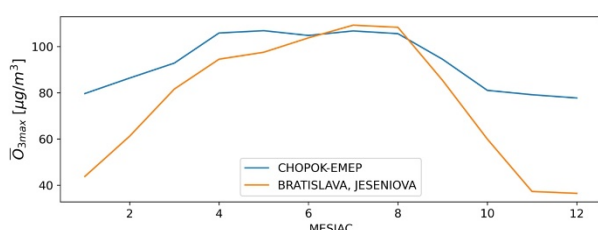
$\text{O}_{3\text{max}(\text{fit})} = -0,64 \text{NO}_{\text{max}} + 0,0078$ (altitude) + 75,76.



niciach, konkrétne Bratislava-Jeséniova a Nitra-Janíkovce, sú vtedy priemerné ozónové maximá vyššie ako na stanici Chopok-EMEP, vid'. Obr. 3.10. Je zrejmé, že počas tohto obdobia sú maximá ozónu na uvedených staniciach silne ovplyvnené fotochemickým smogom. Z analyzovaných staníc, iba na uvedených dvoch bol priemer ozónových maxím v lete vyšší ako na stanici Chopok-EMEP (okrem nich ešte stanica v Rovinke prevádzkovaná spoločnosťou Slovnaft). Tieto stanice sa nachádzajú na predmestiach pomerne veľkých aglomerácií, kde sa očakáva najvyššia produkcia ozónu z fotochemického smogu, najmä počas letných mesiacov.

Obrázok 3.10. Priemerné ozónové maximum v jednotlivých mesiacoch na staniciach Bratislava-Jeséniova a Chopok-EMEP.

Figure 3.10. Mean ozone maximum for months of the year at Bratislava-Jeséniova and Chopok-EMEP stations.



Čo sa týka vysokohorských staníc, ich nevýrazný denný chod s minimom dosahovaným počas dňa a maximom počas večera a noci je vysvetľovaný horsko-dolinnou cirkuláciou: cez deň, najmä ráno, prevláda vietor smerom do hôr, ktorý prináša nízke koncentrácie ozónu z prízemnej vrstvy, ktoré sú tam v ranných hodinách. Večer a v noci začína prúdiť vietor smerom z hôr, a preto sa na vrchol dostáva vzduch z voľnej troposféry s väčšou koncentráciou ozónu (Warneck, 1988).

4. DISKUSIA

Analýza denných chodov koncentrácií znečisťujúcich látok môže taktiež pomôcť pri odhaľovaní anomálnych dát v meraniach. Napríklad na stanici Topoľníky bola v roku 2020 nameraná priemerná ročná koncentrácia ozónu $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, čo je približne o polovicu nižšia hodnota ako v iných rokoch. Nízke hodnoty ozónu sa tam merali v období od 12.11.2019 do 1.9.2020 a potom ešte od 04.11.2020 do 12.1.2021. Súčasne sa v tom istom období výrazne zvýšili koncentrácie NO a zmenili priemerné denné chody NO a NO₂ oproti tým charakteristickým pre stanicu Topoľníky (NO vykazovalo maximum v nočných hodinách a NO₂ na poludnie). Tieto dáta by mohli indikovať prítomnosť konštantného zdroja NO v tesnej blízkosti stanice v uvažovanom období. Bez ohľadu na to, či za týmito anomálnymi hodnotami je prítomnosť blízkeho zdroja alebo nastala len technická porucha, merania z roku 2020 na stanici Topoľníky sme na základe anomálnych denných chodov z predloženej práce vynechali.

Štúdium denných chodov znečisťujúcich látok by mohlo byť tiež významné aj pri kontrole kvality dát z níz-

konákladových senzorov, ktoré v súčasnosti zažívajú rozmach, avšak stále bez viditeľných úspechov, kvôli pochybnostiam o ich poskytovanej kvalite údajov. Prostredníctvom porovnávania denných chodov by sa napríklad dalo odhaliť, či namerané koncentrácie na senzorech reflektujú vzdialenosť od zdrojov (či sa denný chod zo senzoru pri ceste podobá na Profil A pre NO₂ atď.), alebo či nie je zmena koncentrácií znečisťujúcej látky meraná senzorom určená len prostredníctvom proxy dát (napríklad z meraných meteorologických parametrov alebo iných znečisťujúcich látok).

5 ZÁVER

Priemerné denné chody koncentrácií znečisťujúcich látok NO₂, NO a O₃ boli získané priemerovaním dlhodobých (5 až 11 ročných) hodinových koncentrácií na staniciach Národnej monitorovacej siete kvality ovzdušia, ktorú prevádzkuje SHMÚ. Tieto denné chody boli v prípade NO₂ zoradené do štyroch kategórií. Ukázalo sa, že do prvej kategórie patria všetky dopravné stanice. Týmto sa nezávisle potvrdilo, že kategória dopravné stanice, do ktorej boli stanice zaradené podľa definície z 2011/850/EU (EIONET, 2016) má svoje opodstatnenie, a že dané stanice boli zaradené správne. Do druhej kategórie patria stanice, na ktorých sa koncentrácie NO₂ menia v priebehu dňa primárne vplyvom zmeny emisií v doprave, no zároveň tieto stanice neležia v tesnej blízkosti významných ciest, teda nejde o dopravné stanice podľa definície z 2011/850/EU. Do tretej kategórie patria stanice, pri ktorých predpokladáme dominanciu emisií z priemyslu a poľnohospodárstva, ktoré majú menej výrazný denný chod ako emisie z dopravy. Do druhej a tretej kategórie spadajú všetky pozad'ové stanice (mestské, predmestské, regionálne) okrem tých, čo ležia na vrchole významnej hory – tieto stanice sme v práci nazvali vysokohorské. Z hľadiska denného profilu NO₂ patria do štvrtej kategórie; spadajú sem stanice Chopok a Kojšovská hoľa. Taktiež sa ukázalo, že dopravnú stanicu od regionálnej pozad'ovej stanice je možné dobre odlíšiť aj porovnaním priemerného denného chodu NO voči NO₂.

Na základe denného chodu ozónu sme analyzované stanice vedeli roztriediť do dvoch kategórií. V tomto prípade nám chýbali dáta z dopravných staníc, keďže ozón sa na týchto staniciach nemeria. Do prvej kategórie patria všetky pozad'ové stanice, ktoré sú umiestnené v nížinách, resp. v údoliach a do druhej kategórie patria vysokohorské stanice. Výnimočnosť denného chodu znečisťujúcich látok NO₂ a O₃ na vysokohorských staniciach nabáda zaviesť novú kategóriu staníc - vysokohorská pozad'ová.

Ukázali sme, že dlhodobé priemery denných chodov znečisťujúcich látok, najmä NO₂, nám môžu pomôcť pri úsilí vedecky kvalifikovať reprezentatívnosť staníc kvality ovzdušia. Demonštrovali sme ako sa mení denný chod v závislosti od ročného obdobia a taktiež sme analyzovali vplyv meteorológie, chemických procesov a emisií na tvar skúmaných denných chodov.

LITERATÚRA

- Bičárová, S. a kol., 2019, *The role of environmental factors in ozone uptake of Pinus mugo Turra*, *Atmospheric Pollution Research* Vol. 10, Issue 1, 283–293, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.08.003>.
- Byun, D.–Schere, K., 2006, *Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Model-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System*. *Appl. Mech. Rev.* 59(2), 51–77.
- EEA, 2019, *Air quality in Europe – 2019 report*, EEA Report No 10/2019, European Environment Agency, dostupné: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2019>, posledný prístup 16. 5. 2022.
- Kendrick, CH.M.–Koonce, P.–George, L.A., 2015, *Diurnal and seasonal variations of NO, NO₂ and PM_{2.5} mass as a function of traffic volumes alongside an urban arterial*, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.019>.
- Li, J. a kol., 2021, *Comprehensive evaluations of diurnal NO₂ measurements during DISCOVER-AQ 2011: effects of resolution-dependent representation of NO_x emissions*, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 11133–11160, 2021, <https://doi.org/10.5194/acp-21-11133-2021>
- EIONET, 2016: <http://dd.eionet.europa.eu/vocabulary/aq/stationclassification/> a <http://dd.eionet.europa.eu/vocabulary/aq/areaclassification/>, posledný prístup 16. 5. 2022.
- Jacobson, M.Z., 2002, *Atmospheric Pollution: History, science, and regulation*, Cambridge university press, Cambridge, New York.
- Nguyen, P.L.–Hoogerbrugge, R.–Arkel, F., 2009, *Evaluation of the representativeness of the Dutch national Air Quality Monitoring Network*, RIVM Report 680704010/2009.
- Norena, A.I.–Lopez a kol., 2022, *Influence of emission inventory resolution on the modeled spatio-temporal distribution of air pollutants in Buenos Aires, Argentina, using WRF-Chem*, *Atmospheric Environment* 269 (2022) 118839, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118839>.
- Parrish, D.D. a kol., 1982, *The measurement of the photodissociation rate of NO₂ in the atmosphere*, *Atmospheric Environment* Vol. 17, No. 7, 1356–1379.
- Skamarock, W.C a kol., 2008, *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. Technical Report. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>.
- Snel, S., *Improvement of classifications European monitoring stations for AirBase, ETC/ACC Technical Paper 2004/7*, dostupné na https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-atni/products/etc-atni-reports/etcacc_techpaper_2004_7_airbasestation_classif/@download/file/ETCACC_TechPaper_2004_7_AirBaseStation_Classif.pdf, posledný prístup 16. 5. 2022.
- Stull, R.B., 1988, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Chap. 6, 197–250. Kluwer, Dordrecht/Boston/London.
- SHMÚ, 2021, *Správa o kvalite ovzdušia v Slovenskej republike 2021*, dostupné: <http://www.shmu.sk/sk/?page=997>, posledný prístup 16. 5. 2022.
- Štefánik, D. a kol., 2020, *Comparison of two methods of calculating NO₂ and PM₁₀ transboundary pollution by CMAQ chemical transport model and the assessment of the non-linearity effect*, *Atmospheric Pollution Research* Volume 11, Issue 6, June 2020, 12–23, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.02.012>.
- Voiculescu a kol., 2020, *Role of Meteorological Parameters in the Diurnal and Seasonal Variation of NO₂ in a Romanian Urban Environment*, *Int J Environ Res Public Health*. 2020 Sep; 17(17): 6228, doi: 10.3390/ijerph17176228.
- Warneck, P., 1988, *Chemistry of the natural atmosphere*, International geophysics series, Vol. 41, Academic Press, Inc., San Diego, California.

KLIMATICKÁ PRAVDEPODOBNOŠŤ „BIELYCH VIANOC“ NA SLOVENSKU

MILAN ONDERKA^{1,2}, JOZEF PECHO^{2,3}

¹ Earth Science Institute of the Slovak Academy of Sciences, Department of Atmospheric Physics, Dúbravská cesta 9, Bratislava, SK-814 38, Slovakia

² Slovak Hydrometeorological Institute, Jeséniova 17, Bratislava, SK-833 15, Slovakia

³ Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Bratislava, SK-842 48, Slovakia

In this paper we present climatological probabilities of selected snow depths during the Christmas time in Slovakia. The data on snow cover used in this study were provided by the national weather service in Slovakia (Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava). Snow depth measurements were carried out at 516 locations distributed throughout the whole country between the years 1951–2020. Empirical estimates of probabilities were calculated for snow depths ≥ 1 cm, ≥ 2 cm, ≥ 5 cm and ≥ 10 cm. Using a “sliding” linear regression with altitude as an independent variable we created maps of climatological probabilities of snow cover during the Christmas days December 24 through December 26. A temporally reducing effect of temperature singularity (referred to as the “Christmas-Thaw”) on snow depth probabilities between December 22–26 was observed. In general, the lowest probability of snow depth ≥ 1 cm is in the most south-western and southern parts of the country, which dispels the myth that it is “normal” to experience “white Christmas” in this low-land regions. In the contrary, our analyses showed that snow cover needs to be regarded as a low-probability phenomenon in these regions. In addition, we compared probabilities of snow cover with depths ≥ 1 cm, 2 cm, 5 cm a 10 cm calculated separately for the period 1951–1980 and the period 1981–2020. Probabilities calculated for the 1951–1980 period were consistently higher compared to the period 1981–2020. This change is attributable to rising air temperatures and the ongoing climate change in general.

V tomto článku sa zaoberáme jednoduchým štatistickým zhodnotením klimatickej pravdepodobnosti výskytu celkovej snehovej pokrývky v období vianočných sviatkov. Ako podklad výpočtu pravdepodobnosti boli použité údaje o výške celkovej snehovej pokrývky pozorované na klimatologických a zrážkomerných staniách SHMÚ distribuovaných v širokom rozpätí nadmorských výšok v období 1951–2020. Empirické odhady prekročenia výšky snehovej pokrývky boli počítané pre 1 cm, 2 cm, 5 cm a 10 cm. S použitím klzavej regresie s nadmorskou výškou ako nezávislou premennou sme vytvorili mapy zobrazujúce pravdepodobnosť prekročenia zvolených výšok snehovej pokrývky pre dni vianočných sviatkov od 24. do 26. decembra. Na väčšine územia Slovenska bol pozorovaný vplyv teplotnej singularity známej ako „vianočné oteplenie“, resp. „vianočný odmäk“ na prechodne znížené pravdepodobnosti výskytu snehovej pokrývky v období od 22. do 26. decembra. Vo všeobecnosti platí, že počas vianočných sviatkov je pravdepodobnosť výskytu snehovej pokrývky najnižšia v oblasti Záhorkej nížiny a v južných okresoch západného Slovenska, čo vyvracia rozšírený mýtus, že snehová pokrývka má byť normálny jav počas vianočných sviatkov aj v nížinách Slovenska. Naopak, na základe analýz sa potvrdzuje, že výskyt snehovej pokrývky s výškou ≥ 1 cm v týchto regiónoch je potrebné považovať skôr za menej pravdepodobný jav. Súčasťou analýz bolo aj porovnanie obdobia 1951–1980 s obdobím 1981–2020. Bolo preukázané, že pravdepodobnosti počítané za obdobie 1951–1980 boli vyššie v porovnaní s obdobím 1981–2020, čo si možno vysvetliť aj pozorovaným rastúcim trendom teploty vzduchu za posledné desaťročia.

Key words: snow, snow depth, probability, Christmas-Thaw, temperature singularity

ÚVOD

Vianočné sviatky sa často spájajú so zidealizovaným obrazom krajiny pokrytej snehom aký možno vidieť na vianočných pohľadniciach, počuť v koledách a v rozprávkach zobrazujúcich „biele Vianoce“. Do akej miery sa tieto naše predstavy o dokonalých Vianociach so snehom zakladajú na realite? Časové a priestorové aspekty výskytu snehovej pokrývky majú sociálne aj ekonomické implikácie, napr. pre oblasť plánovania umelého zasnežovania svahov v lyžiarskych rezortoch, potreby odhŕňacích mechanizmov v mestách a pod. (Blanchet a Lehning, 2010; Duree a Squires, 2015). Vo všeobecnosti má štúdium časovo-priestorových závislostí a fyzikálnych vlastností snehovej pokrývky veľký význam aj pre poznanie hydrologickej bilancie povodia, odtokové pomery a riziko vzniku lavín (Hlavčová a kol., 2015; Pribullová a kol., 2009; Vojtek a kol., 2003; Lapin a kol., 2007a, 2007b). Tento článok je

čiastočne inšpirovaný prácou autorov Duree a Squires (2015), ktorý zhodnotili pravdepodobnosti výskytu snehovej pokrývky v kontinentálnej časti Spojených štátov. Nie je nám známe, že by v podmienkach Slovenska existovala rozsiahla štúdia hodnotenia pravdepodobnosti výskytu snehovej pokrývky sústredujúca sa konkrétne na obdobie Vianoc. Tento článok má za cieľ túto medzeru čiastočne zaplniť. Keďže definícia „bielych Vianoc“ je veľmi neurčitá a subjektívne vnímaná hlavne z pohľadu minimálnej výšky snehovej pokrývky ako kritérium ich definovania, prezentované pravdepodobnosti dosiahnutia a prekročenia výšky celkovej snehovej pokrývky sme počítali pre štyri výšky: 1 cm, 2 cm, 5 cm a 10 cm.

Platí, že počas Vianočného odmäku, teplý a vlhký vzduch prúdi do strednej Európy od západu až juhozápadu. Táto vzduchová hmota prináša so sebou zároveň aj výdatnejšie zrážky. Kombinácia teplého vzduchu s prípadnými tekutými zrážkami spôsobuje topenie snehovej pokrývky

vytvorenej počas predchádzajúcich dní. Pretože voda z tekutých zrážok a voda z roztopeného snehu nedokáže vsiaknuť do už častokrát nasýtenej alebo zmrzutej pôdy, výskyt povodní sa môže počas Vianočného odmäku zvýšiť. Výskyt teplotnej singularity v tretej decembrovej dekáde v rámci strednej Európy bol popísaný už v roku 1949 v práci autorov Flohn a Hess (1949). Hoci primárnym cieľom tejto štúdie je vyhodnotiť empirické pravdepodobnosti výskytu celkovej snehovej pokrývky pre obdobie vianočných sviatkov za obdobie 1981–2020 a porovnať zmeny s referenčným obdobím 1951–1980, v predloženej štúdii sa okrajovo venujeme aj vplyvu teplotnej singularity na pravdepodobnosť výskytu snehovej pokrývky.

VSTUPNÉ ÚDAJE A METÓDY SPRACOVANIA

Údaje o celkovej snehovej pokrývke meranej v dennom chode (v rannom termíne o 6:00 h UTC) na zrážkomerných a klimatologických staniách SHMÚ boli použité na výpočet pravdepodobností prekročenia zvolených výšok snehovej pokrývky. Spracované údaje pokrývajú dve obdobia 1951–1980 (dostupné údaje z 15 staníc) a 1981–2020 (dostupné údaje z 516 staníc). Údaje o celkovej snehovej pokrývke z 15 staníc pokrývajúcich obdobie rokov 1951 až 1980 boli analyzované za účelom porovnania pravdepodobností s novšími pozorovaniami na klimatologických staniách SHMÚ. Použité údaje vo svojej surovej podobe obsahovali jednak numerické vyjadrenie o celkovej výške snehovej pokrývky v centimetroch, ale aj nasledovné kódy: kód 995 označujúci nesúvislú snehovú pokrývku, a kód 999 označujúci snehový poprašok (t.j. výška snehu < 0,5 cm). Ako doplnujúce údaje v štúdii sme použili aj údaje o denných teplotných maximách za obdobie rokov 1951–2017.

Za účelom výpočtu empirických pravdepodobností boli údaje pre každú zrážkomernú stanicu najprv zvlášť zoradené v zostupnom poradí s pozíciami od $m=1$ až po $m=N$, kde N je počet údajov v súbore zodpovedajúci dĺžke časového radu v rokoch. Prvý údaj na prvej pozícii $m=1$ zodpovedá najvyššej pozorovanej hodnote snehovej pokrývky v danom rade pozorovaní, a posledný údaj na pozícii $m=N$ je najnižšia pozorovaná hodnota v rade pozorovaní. Na výpočet klimatologickej pravdepodobnosti P (v pravdepodobnostnej analýze známej tiež pod názvom pravdepodobnosť prekročenia) sme použili Weibulov vzťah (Gumbel 1958) vo forme:

$$P = \frac{m}{N+1}, \quad (1)$$

kde m je pozícia v rade pozorovaní a N je počet rokov v takomto časovom rade. Odhad priemernej doby opakovania v rokoch R je možné vypočítať ako prevrátenú hodnotu pravdepodobnosti:

$$R = \frac{1}{P}. \quad (2)$$

Za účelom vytvorenia máp zobrazujúcich pravdepodobnosť výskytu snehovej pokrývky a jej priestorovú variabilitu je možné použiť geoštatistické metódy interpolovania hodnôt medzi diskretnými bodmi v priestore (v našom prípade zrážkomerné stanice). Z pomedzi množ-

stva metód opísaných v literatúre je možné použiť napr. Thiessenove polygóny, lineárnu trianguláciu, inverznú váženú vzdialenosť, regularizovaný splain, lineárne regresné modely, krigging a ich rozmanité variácie (Remiášová a kol., 2011; Blanchet a Lehning, 2010). V tejto práci boli bodové odhady pravdepodobnosti interpolované použitím lokálnej lineárnej regresie, hoci nejde o interpoláciu v pravom zmysle slova. Ako nezávislú premennú sme použili nadmorskú výšku (digitálny model reliéfu v rastrovom formáte s horizontálnym rozlíšením 500 metrov spracovaný ako dvojrozmerná matica $M \times N$, kde M je číslo riadku a N číslo stĺpca). Pre každý prvok matice $M \times N$ bola vytvorená množina zrážkomerných staníc nachádzajúcich sa v okruhu 30 km od geografických súradníc daného prvku matice. Bodové odhady pravdepodobnosti prekročenia vypočítané pre stanice v okruhu 60 km boli spolu s nadmorskými výškami týchto staníc použité na výpočet parametrov lineárnej regresie. Postupným „kľzaním“, t.j. bod po bode, sa tento postup zopakoval pre všetky prvky matice $M \times N$. Následne sme na zostavenie výsledných máp pravdepodobností použili Gaussov filter (Brooks a kol., 2003):

$$p_{x,y} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \frac{P}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_{m,n}}{\sigma}\right)^2\right], \quad (3)$$

kde $p_{x,y}$ je pravdepodobnosť výskytu snehovej pokrývky v lokalite (x,y) , $d_{m,n}$ je Euklidovská (geometrická) vzdialenosť medzi lokalitou (x,y) a ďalšími lokalitami v rámci matice (m,n) , σ je izotropický zhladzovací parameter a M , N sú počty pixelov v smere východ-západ a sever-juh použitého rastrového DEM modelu. Parameter zhladenia σ bol nastavený na hodnotu $\sigma=1$. Tesnosť vzťahu medzi predikovanými pravdepodobnosťami s použitím kľzavej lineárnej regresie a bodovými odhadmi počítanými pre jednotlivé zrážkomerné stanice je zobrazená na Obr. 1. Koeficienty determinácie R^2 dosiahli pomerne vysoké hodnoty (> 0.8), čo indikuje pomerne vysokú predikčnú schopnosť použitej metódy lineárnej regresie. Priemerná absolútna odchýlka medzi predikovanými hodnotami x_p a bodovými odhadmi pozorovanými na údajoch zo zrážkomerných staníc x_m (počítaná ako priemer absolútnych hodnôt rozdielov medzi x_p a x_m , t.j. $MAE = 1/N \sum |x_m - x_p|$) sa pohybovala v rozmedzí od 3,46 % do 6,18 % (Obr. 1). Mierna tendencia podhodnocovania hodnôt pravdepodobnosti bola pozorovaná v hornom intervale hodnôt.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

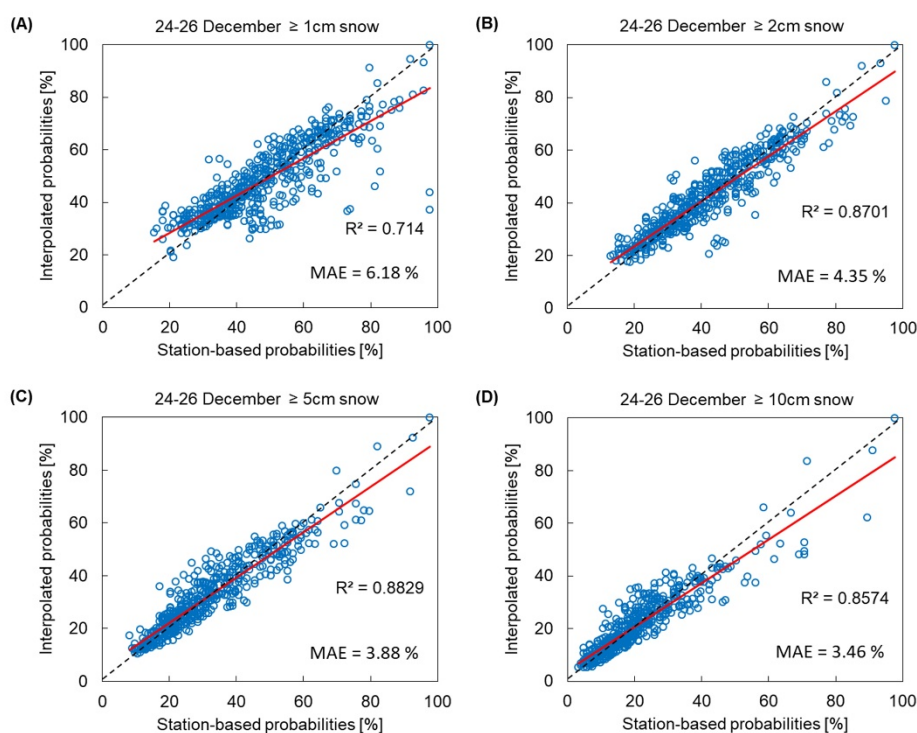
Numerické hodnoty pravdepodobnosti pre niektoré zvolené lokality uvádzame v Tab. 1., v ktorej sú zároveň uvedené aj rozdiely vo vypočítaných pravdepodobnostiach pre obdobia 1951–1980 a 1981–2020. Ako vyplýva z Tab. 1, pravdepodobnosť, že počas vianočných sviatkov sa vyskytne snehová pokrývka s výškou ≥ 1 cm je 47 % v prípade lokality Bratislava-Koliba, a iba 34 % v prípade lokality Bratislava-letisko. Prepočítaním pravdepodobnosti na dobu opakovania R podľa rovnice č. 2 dostávame hodnoty 2,12 a 2,9 roka. Inými slovami, snehovú pokrývku s výškou prevyšujúcu, alebo rovnajúcu sa 1 cm možno

v stanici Bratislava-Koliba v priemere očakávať raz za približne 2 roky. Samozrejme tu treba upozorniť na tú skutočnosť, že nejde o predpoveď výskytu opakujúcu sa s dvojročným intervalom. Podstatne vyššie pravdepodobnosti môžeme nájsť vo vyššie položených oblastiach, napríklad v prípade Liptovského Hrádku predstavuje pravdepodobnosť 65,6 %, čomu približne zodpovedá doba opakovania 1,5 roka. Ukázalo sa, že takmer pri všetkých 15 staniciach s dostatočne dlhým časovým radom (1951–2020) sa pravdepodobnosti počítané za obdobie rokov 1981–2020 znížili v porovnaní s obdobím 1951–1980. Ako príklad možno uviesť stanicu Sliač, kde pravdepodobnosť výskytu snehovej pokrývky s výškou ≥ 1 cm významne klesla zo 61,5 % v období rokov 1951–1980 na 43,9 % v období rokov 1981–2020. Obdobná situácia bola pozorovaná aj pre pravdepodobnosti výšky snehu ≥ 1 , ≥ 2 , ≥ 5 a ≥ 10 cm (viď posledné štyri stĺpce v Tab. 1 s uvedenými rozdielmi v pravdepodobnostiach).

Priestorové rozloženie pravdepodobnosti pre jednotlivé výšky snehovej pokrývky sú zobrazené na Obr. 2–3. Z mapy pravdepodobnosti snehovej pokrývky ≥ 1 cm počas vianočných sviatkov na Obr. 2 je zrejmé, že pravdepodobnosť dosiahnutia a prekročenia výšky snehovej pokrývky je závislá od nadmorskej výšky, pričom najnižšia pravdepodobnosť sa vyskytuje v oblasti Záhorskej nížiny a v niektorých častiach juhu západného Slovenska. Najvyššie pravdepodobnosti presahujúce 90 % a blížiacie sa k štatistickej istote možno, podľa očakávania, pozorovať v najvyšších polohách horských masívov. V prípade výskytu snehovej pokrývky viac ako 5 a 10 cm je situácia ešte nepriaznivejšia pre oblasti s nízkou nadmorskou výškou, čo dobre dokumentuje priestorové rozloženie pravdepodobnosti zobrazené na Obr. 3. Počas Vianoc možno snehovú pokrývku s výškou ≥ 10 cm s veľkou mierou pravdepodobnosti ($> 50\%$) očakávať iba v horských oblastiach Slovenska.

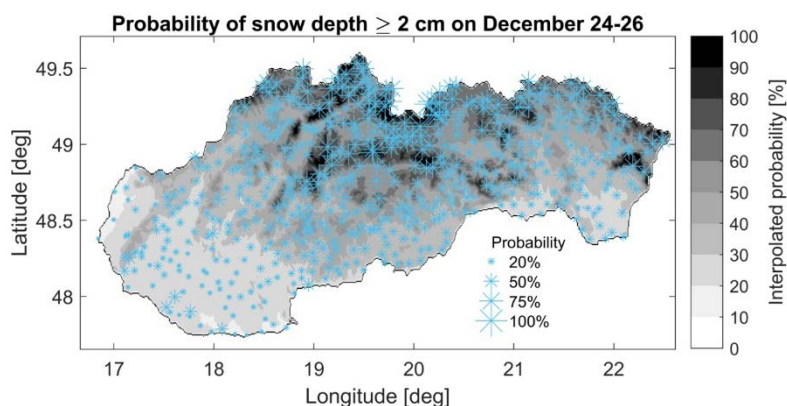
Obrázok 1.
Porovnanie medzi bodovými odhadmi pravdepodobností prekročenia výšky celkovej snehovej pokrývky s hodnotami získanými interpoláciou.

Figure 1.
Comparisons between observed station-based empirical exceedance probabilities and the interpolated values.



Obrázok 2.
Bodové odhady pravdepodobností prekročenia výšky celkovej snehovej pokrývky ≥ 2 cm počas vianočných sviatkov (priemer za 24. –26. december) spolu s interpolovanými hodnotami.

Figure 2.
Station-based empirical exceedance probabilities of snow depth ≥ 2 cm on Christmas days (average for December 24–26) along with interpolated values.



Obrázok 3. Mapy interpolovaných hodnôt pravdepodobností prekročenia výšky celkovej snehovej pokrývky $\geq 1, 2, 5$ a 10 cm počas vianočných sviatkov (24. – 26. december).

Figure 3. Maps of interpolated exceedance probabilities of snow depth $\geq 1, 2, 5$ and 10 cm on Christmas days between December 24 and December 26.

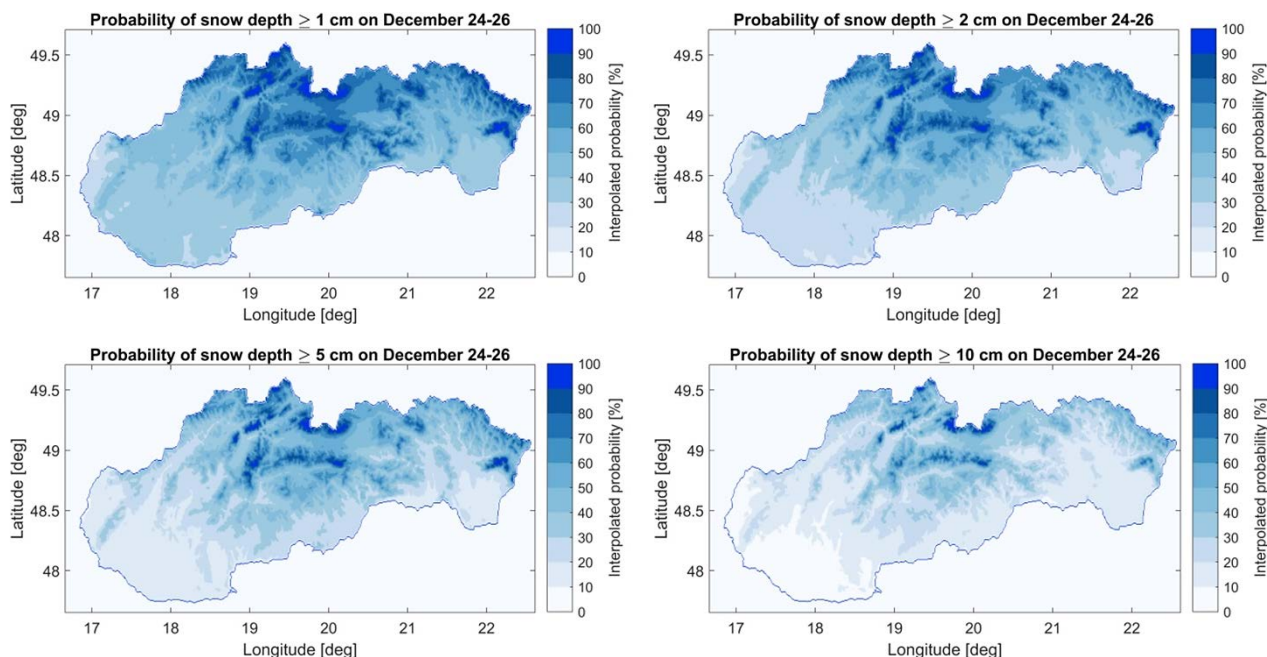


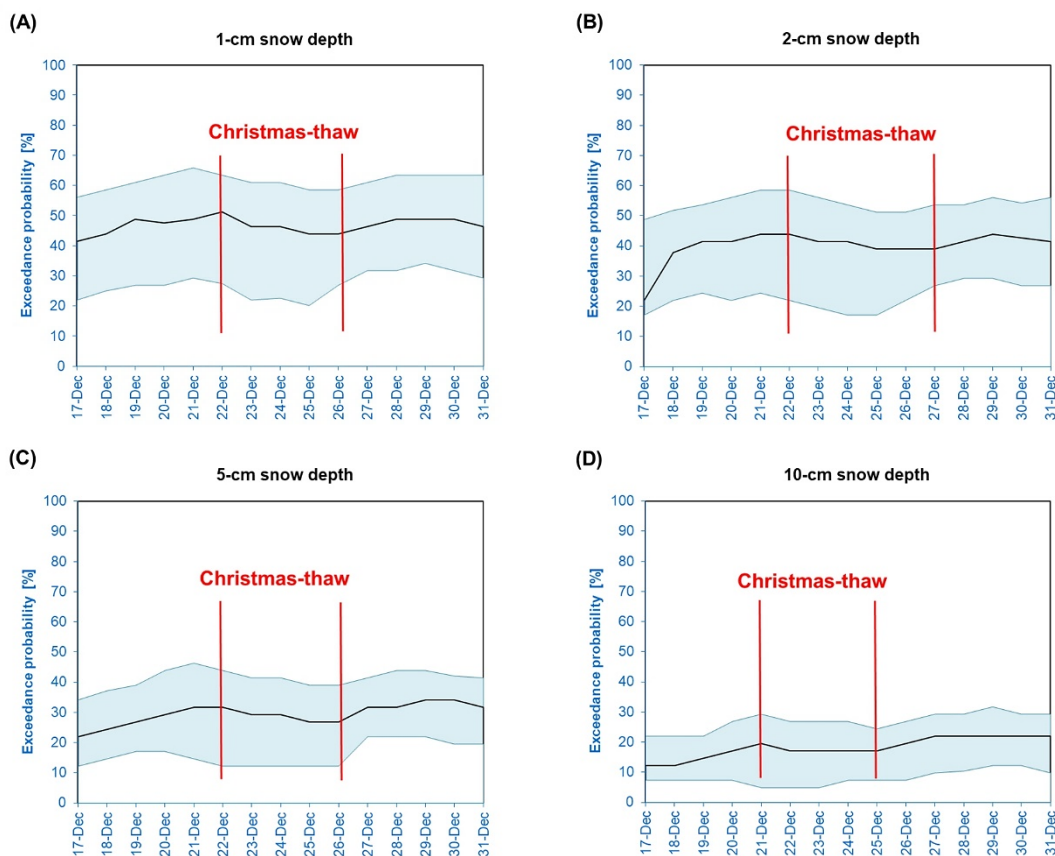
Table 1. Klimatické pravdepodobnosti – P [%] prekročenia výšky celkovej snehovej pokrývky $\geq 1, 2, 5$ a 10 cm počas dní vianočných sviatkov (priemery denných pravdepodobností za 24. – 26. december) vo vybraných lokalitách Slovenska počítané pre dve obdobia (1951 – 1980 a 1981 – 2020) a zmeny pravdepodobností počítané na údajoch z týchto dvoch období (posledné štyri stĺpce). Stanice sú zoradené podľa nadmorskej výšky.

Table 1. Climatological probabilities – P [%] of snow depth ($\geq 1, 2, 5$ and 10 cm) on December 24 – 26 at selected sites in Slovakia for two periods (1951–1980 and 1981–2020) and changes in probabilities (last four columns). Gauge stations are ordered according to altitude.

Lokalita	H [m n. m.]	1951 – 1980				1981 – 2020				Porovnanie obdobia 1951 – 1980 vs. 1981 – 2020			
		$P(h \geq 1 \text{ cm})$	$P(h \geq 2 \text{ cm})$	$P(h \geq 5 \text{ cm})$	$P(h \geq 10 \text{ cm})$	$P(h \geq 1 \text{ cm})$	$P(h \geq 2 \text{ cm})$	$P(h \geq 5 \text{ cm})$	$P(h \geq 10 \text{ cm})$	$\Delta P(h \geq 1 \text{ cm})$	$\Delta P(h \geq 2 \text{ cm})$	$\Delta P(h \geq 5 \text{ cm})$	$\Delta P(h \geq 10 \text{ cm})$
Hurbanovo	115	27,1	21,9	18,8	13,5	23,6	20,3	13,0	7,3	-3,5	-1,5	-5,7	-6,2
Bratislava – letisko	128	34,4	29,2	20,8	12,5	24,4	23,6	15,4	9,8	-10,0	-5,6	-5,4	-2,7
Piešťany	161	34,4	30,2	18,8	10,4	30,9	27,6	19,5	12,2	-3,5	-2,6	+0,8	+1,8
Kamenica nad Cirochou	176	53,1	41,7	34,4	36,5	44,7	40,7	23,6	14,6	-8,4	-1,0	-10,8	-21,8
Rimavská Sobota	209	46,9	42,7	34,4	35,4	35,8	28,5	23,6	13,0	-11,1	-14,3	-10,8	-22,4
Boľkovce	210	47,9	43,8	32,3	17,7	38,2	33,3	28,5	15,4	-9,7	-10,4	-3,8	-2,3
Košice – letisko	229	40,6	36,5	22,9	30,2	40,7	35,0	21,1	13,0	+0,1	-1,5	-1,8	-17,2
Bratislava – Koliba	283	46,9	41,7	29,2	16,7	42,3	36,6	26,0	15,4	-4,6	-5,1	-3,2	-1,2
Sliač	310	61,5	51,0	43,8	38,5	43,9	39,0	29,3	22,0	-17,6	-12,0	-14,5	-16,6
Liptovský Hrádok	640	65,6	61,5	44,8	30,2	63,4	56,9	48,0	27,6	-2,2	-4,5	+3,2	-2,6
Poprad	693	59,4	49,0	36,5	27,1	61,0	54,5	30,9	21,1	+1,6	+5,5	-5,6	-5,9
Oravská Lesná	785	92,7	87,5	80,2	68,8	88,6	82,9	78,0	70,7	-4,1	-4,6	-2,2	+2,0
Telgárt	900	91,7	82,3	74,0	68,8	69,1	64,2	59,3	39,8	-22,6	-18,1	-14,6	-28,9
Štrbské Pleso	1322	94,8	94,8	88,5	82,3	95,9	95,1	91,9	89,4	+1,1	+0,3	+3,3	+7,1
Lomnický Štít	2634	96,9	96,9	96,9	95,8	97,6	97,6	97,6	97,6	+0,7	+0,7	+0,7	+1,7

Obrázok 4. Štatistické zhodnotenie (75. percentil, medián a 25. percentil) pravdepodobností prekročenia výšky celkovej snehovej pokrývky za všetky hodnotené lokality ($n = 516$) pre výšky snehovej pokrývky 1 cm (a), 2 cm (b), 5 cm (c), a 10 cm (d). Krátke obdobie zníženej pravdepodobnosti spôsobené teplotnou singularitou, tzv. „vianočným odmäkom“, je identifikovateľné v období od 22. decembra do 26. decembra. Červené vertikálne čiary znázorňujú približný začiatok a koniec poklesu pravdepodobnosti spôsobeného oteplením.

Figure 4. All-station statistics of climatological probabilities (75th percentile, median and 25th percentile) for 1-cm snow depths (a), 2-cm snow depths (b), 5-cm snow depths (c), and 10-cm snow depths (d). A brief period of reduced snow-depth probabilities attributable to a temperature singularity known as the Christmas-Thaw observed between December 22 and December 26. The vertical lines delineate the effect of Christmas-Thaw.



Na celom území Slovenska bol pozorovaný vplyv teplotnej singularity majúcej svoj pôvod v zosilnenom prúde teplého oceánskeho vzduchu krátko pred Vianocami, známej tiež ako „vianočné oteplenie“ alebo „vianočný odmäk“ (Flohn a Hess, 1949). Vplyv tejto singularity je viditeľný aj na prechodne znížených pravdepodobnosti výskytu celkovej snehovej pokrývky, čo je zdokumentované na poklese mediánu a zároveň aj prvého a tretieho kvartilu (25-teho a 75-teho percentilu) počítaných pravdepodobností v dennom chode od 17. decembra do 31. decembra za všetky analyzované zrážkomerné stanice na Obr. 4. Najvýraznejší pokles pravdepodobnosti bol pozorovaný v prípade pravdepodobností počítaných pre výšku celkovej snehovej pokrývky ≥ 1 cm (Obr. 4a). Bolo preukázané, že pravdepodobnosti počítané z údajov 1951–1980 boli vyššie v porovnaní s obdobím 1981–2020, čo si možno vysvetliť rastúcim trendom teploty vzduchu za posledné desaťročia, čo pomerne dobre dokumentuje Obr. 5 s priebehom priemerov maximálnych denných teplôt vzduchu za obdobia 1951–1980 a 1981–2017. Z priebehu teplôt vyplýva, že

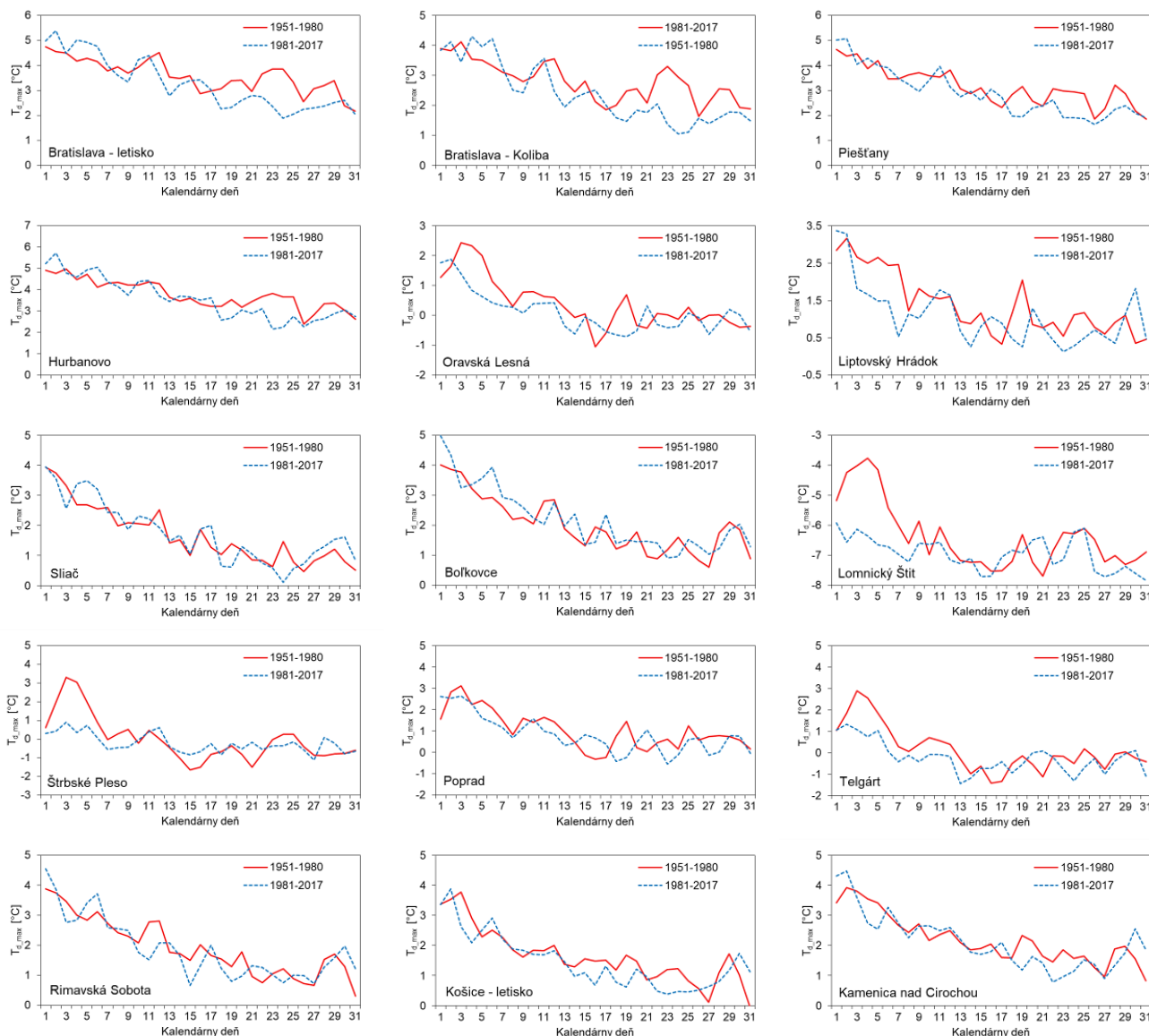
maximálna denná teplota vzduchu v období Vianoc a krátko pred nimi vzrástla za posledné hodnotené obdobie (1981–2017) v porovnaní s obdobím 1951–1980 obzvlášť s stanicami situovanými na juhozápade (Bratislava-Koliba, Bratislava-letisko, Piešťany, Hurbanovo). Naopak, stanice situované v ostatných častiach Slovenska nezaznamenali taký zreteľný nárast denným teplotným maximom v období Vianoc.

ZÁVER

Cieľom tohto článku bolo štatisticky zhodnotiť klimatickú pravdepodobnosť výskytu celkovej snehovej pokrývky v období vianočných sviatkov. Na základe štatistického zhodnotenia klimatickej pravdepodobnosti výskytu celkovej snehovej pokrývky založenej na historických údajoch (1951–1980 a 1981–2020) možno v prípade nízkych nadmorských výšok vyvrátiť rozšírený mýtus o akejsi tradícii „bielych Vianoc“, keďže Vianoce bez snehovej pokrývky (resp. s pokrývkou snehu ≥ 1 cm) v nížinách Slovenska

Obrázok 5. Pribeh priemerov maximálnych denných teplôt vzduchu za dve porovnávané obdobia 1951 – 1980 a 1981 – 2017 na vybraných klimatologických stanicích. Teplota bola meraná v úrovni 2-metre nad zemským povrchom.

Figure 5. Diurnal air temperature maxima averaged for two periods: 1951 – 1980 and 1981 – 2017. Air temperature was measured at a height 2 meters above the ground.



možno označiť za bežný jav. Výskyt snehovej pokrývky ≥ 1 cm počas vianočných sviatkov má vysokú pravdepodobnosť ($>80\%$) iba v horských oblastiach Slovenska, resp. v oblastiach s nadmorskou výškou viac ako 700 metrov. Na záver je potrebné zdôrazniť, že prezentované výsledky poskytujú len akýsi stacionárny pohľad na pravdepodobnosť výšky celkovej snehovej pokrývky založený na reálnych pozorovaniach z minulosti, avšak pre účely budúcich prác bude iste zaujímavé sa zamerať aj na prípadnú nestacionaritu pravdepodobností výskytu snehovej pokrývky ako odozvy na prebiehajúce prejavy meniacej sa klímy, a to najmä v súvislosti s nárastom teploty vzduchu, ako aj zvyšujúcim sa podielom tekutých zrážok v chladnom polroku. Vo všeobecnosti možno prijať záver, že počas vianočných sviatkov je pravdepodobnosť výskytu

snehovej pokrývky na území Slovenska najnižšia v oblasti Záhorkej nížiny a v južných okresoch západného Slovenska, čo vyvracia mýtus o normálnosti výskytu snehovej pokrývky počas Vianoc v týchto regiónoch. Naopak, snehová pokrývka v týchto regiónoch je menej pravdepodobný jav. Súčasťou analýz bolo aj porovnanie obdobia 1951 – 1980 s obdobím 1981 – 2020. Bolo preukázané, že pravdepodobnosti počítané z údajov 1951 – 1980 boli vyššie v porovnaní s obdobím 1981 – 2020, čo si možno vysvetliť rastúcim trendom teploty vzduchu za posledné desaťročia (zrýchľujúci sa trend otepľovania možno registrovať najmä po roku 1991, vrátane obdobia zimy). Na tomto treba upozorniť na skutočnosť, že počnúc zimou 1987/1988 sa na väčšine územia Slovenska významne zmenil teplotný charakter zim. Možno to dokumentovať napríklad aj tým,

že významne vzrástol počet teplotne nadnormálnych (teplých a mimoriadne teplých) zím, a to dokonca aj na severnom Slovensku. Na väčšine územia Slovenska bol pozorovaný vplyv teplotnej singularity známej ako „vianočné oteplenie“, resp. „vianočný odmäk“ na prechodne znížené pravdepodobnosti výskytu snehovej pokrývky v období od 22. do 26. decembra. Súčasťou analýz bolo aj porovnanie obdobia 1950–1981 s obdobím 1981–2020. Bolo preukázané, že pravdepodobnosti počítané z údajov 1951–1980 boli vyššie v porovnaní s obdobím 1981–2020, čo si možno vysvetliť rastúcim trendom teploty vzduchu za posledné desaťročia.

Podakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: „Údajová a vedomostná podpora pre systémy rozhodovania a strategického plánovania v oblasti adaptácie poľnohospodárskej krajiny na klimatické zmeny a minimalizáciu degradácie poľnohospodárskych pôd“ (kód ITMS2014+ 313011W580), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja, a grantu VEGA grant č. 2/0003/21. Podakovanie *in-memoriam* patrí aj nezapodnuteľnému kolegovi RNDr. Jakubovi Meszárosovi za inšpiratívne diskusie predchádzajúce práci na tomto manuskripte.

LITERATÚRA

- Blanchet, J.–Lehning, M., 2010, Mapping snow depth return levels: smooth spatial modeling versus station interpolation. *Hydrol. Earth Syst. Discuss.*, 7, 6129–6177. doi: 10.5194/hessd-7-6129-2010.
- Brooks, H.–Doswell III C.A.–Kay M.P., 2003, Climatological estimates of local daily tornado probability for the United States. *Weather and Forecasting*, 18, 626–640.
- Duree, I.–Squires, M.F., 2015, White Christmas? An application of NOAA's 1981-2010 daily normals. *American Meteorological Society*, 1853–1858. doi: 10.1175/BAMS-D-1500038.1.
- Flohn, H.–Hess, P., 1949, Large weather singularities in the annual weather pattern of Central Europe. *Meteorological and Hydrological Service of the German Democratic Republic: Meteorologische Rundschau* 2, 1949, 258–263.
- Gumbel, E.J., 1958, *Statistics of Extremes*. Columbia University Press, New York.
- Hlavčová, K.–Kotříková, K.–Kohnová, S.–Valent, P., 2015, Changes in the snow water equivalent in mountainous basins in Slovakia over recent decades, *Proc. IAHS*, 370, 109–116.
- Lapin, M.–Faško, P.–Pecho, J., 2007a, Snow Cover Variability and Trends in the Tatra Mountains in 1921–2006. *ICAM*, 4. – 8. June 2007, Chambéry, France, *Proceedings of the 29th International Conference on Alpine Meteorology*.
- Lapin, M.–Melo, M.–Faško, P.–Pecho, J., 2007b, Snow cover changes scenarios for the Tatra mountains in Slovakia. *International Conference on Alpine Meteorology, Chambéry, France*.
- Pribullová, A.–Pecho, J.–Bičárová, A., 2009, Analysis of snow cover at selected stations in the High Tatra Mountains. In: Pribullová, A., Bičárová, S. (Eds.) 2009: *Sustainable Development and Bioclimate, Reviewed Conference Proceedings*. Geophysical Institute of the SAS, 5th to 8th October 2009, Stará Lesná, 2009, ISBN: 978-80-900450-1-9 [CD].
- Remiášová, R.–Gaál, L.–Hlavčová, K.–Kohnová, S.–Szolgay, J., 2011, *Priestorová regionalizácia návrhových zrážok na Slovensku*. Ostrava: Key Publishing, 2011, 92 s. ISBN: 9788074181092.
- Vojtek, M.–Faško, P.–Šťastný, P., 2003, Some selected snow climate trends in Slovakia with respect to altitude. *Acta Meteor. Univ. Comenianae*. 32: 17–27.
- Vojtek, M., 2010, *The dynamics of snow cover in mountainous regions of Slovakia*. Dissertation, Comenius University.

INFORMÁCIE INFORMATION

POVODŇOVÉ SITUÁCIE NA SLOVENSKU V ROKU 2021

Rok 2021 možno vyhodnotiť ako priemerný povodňový rok, a to ako z hľadiska významnosti povodňových situácií, tak s počtom dní s povodňovou aktivitou. V priebehu roka 2021 bolo zaznamenaných 122 dní s povodňovou aktivitou (pozorovaných na vodomerných staniciach SHMÚ). Významné povodňové situácie sa vyskytli na konci jari a v letnom období, charakteristické intenzívnymi dažďami (v máji) a prívalovými zrážkami z búrok (v júli až v auguste). Môžu za to predovšetkým nerovnomerne rozložené zrážky počas roka, a to aj napriek tomu, že bol rok 2021 zrážkovo normálny. Najvýznamnejšie kulminácie prietokov sa vyskytli v máji v Zlatých Moravciach na Hostianskom potoku 17.5. s dobou opakovania raz za 50 rokov a v Nitrianskej Strede na Nitre 18.5. s dobou opakovania raz za 20–50 rokov.

V roku 2021 sa vyskytla technická havária v Rudne nad Hronom spôsobená narušením hrádze s katastrofickými následkami. V poobedňajších hodinách 17.5.2021 sa vplyvom spadnutých zrážok nádrž nad obcou začala naplňať. Tlak vody pretrhol hrádzu, ktorá nebola v dobrom technickom stave. Prielomová vlna, ktorá vznikla po pretrhnutí hrádzky, si vyžiadala jednu ľudskú obeť a spôsobila veľké materiálne škody. Strhnuté mosty, lávky, zaplavené domy, záhrady, odplavené a zdemolované autá, bahnotok z priľahlých odlesnených území sa odstraňoval niekoľko dní po povodni. Zrážky neboli extrémne a technickú haváriu v Rudne nad Hronom nemožno zaradiť medzi povodne spôsobené prirodzenou zrážkovo-odtokovou činnosťou.

Zrážkovo-odtoková analýza

Rok 2021 hodnotíme ako priemerný, s nerovnomerným rozložením zrážok v jednotlivých mesiacoch. Ročné úhrny zrážok boli deficitné v západoslovenskom regióne (11 %, –74 mm), nadbytok zrážok bol vo východoslovenskom regióne (108 %, +57 mm). V stredoslovenskom regióne sa vyskytol priemerný ročný úhrn zrážok (100 %, –1 mm). Výrazne deficitné mesiace boli jún a október. Napriek tomu v júni sa vyskytlo niekoľko búrok, z ktorých vznikli povodňové situácie.

Prerozdelenie mesačných úhrnov zrážok na jednotlivé povodia je uvedené v Tab. 1. Vo farebne odlíšených mesiacoch sú vyznačené najvyššie dosiahnuté stupne povodňovej aktivity v daných povodiach, ďalej označené ako stupne PA (■ 1. stupeň PA, ■ 2. stupeň PA, ■ 3. stupeň PA). V Tab. 2 sú uvedené mesačné úhrny zrážok vyjadrené ako % mesačných normálov. Rovnako ako v Tab. 1, vyznačené sú aj najvyššie dosiahnuté stupne povodňovej aktivity v danom mesiaci a v povodí. Zrážkovo-odtokové pomery medzinárodných tokov Dunaj, Morava a Bodrog vznikajú vo významnej miere mimo Slovenska, takže výskyt stupňov PA je z dotekania povodňových prietokov zo zahraničia.

V januári a februári sa zrážky vyskytovali vo forme snehu a dažďa, vplyvom kolísavých teplôt dochádzalo k akumulácii a následnému postupnému topeniu snehu. Najviac sa to odrazilo v povodí Bodrogu, čo je podobnejšie rozobrané nižšie v texte.

Daždivý máj spôsobil opakované povodňové situácie a od 17.5. zasiahol takmer celé Slovensko. Jún, júl a najmä august bol sprevádzaný búrkami, ktoré postihli taktiež takmer celé Slovensko s povodňovými situáciami vo vyznačených povodiach v Tab. 1. Významné povodňové situácie sú podrobne opísané v texte nižšie.

Zrážkovo deficitný jún v tretej dekáde sa prejavoval búrkami, ktoré v povodí Nitry (Handlová) a v povodí Bodrogu (Remetské Hámre) už spôsobili prívalové povodne. Letné búrky vyústili do prívalových povodní.

Intenzívna búrková činnosť, najmä v júli a v auguste, spôsobila vzostupy vodných hladín vo vodomerných staniciach monitorovacej siete SHMÚ, ale aj veľa lokálnych povodňových situácií na menších, nami nemonitorovaných tokoch, hlavne v hornej časti povodia Bodrogu (v Prešovskom kraji), v povodí Váhu (v Žilinskom a Trenčianskom kraji) a v hornej časti povodia Nitry (v Trenčianskom kraji). Informácie o vyhlásených stupňoch povodňovej aktivity v obciach sú získané z krízového centra Civilnej ochrany (SVK ERCC - Emergency Response Coordination Centre) a sú uvedené v Povodňových správach na webových stránkach SHMÚ ([https://www.shmu.sk/sk/?page=128#2022%20\(ro%C4%8Dn%C3%ADk%202\)](https://www.shmu.sk/sk/?page=128#2022%20(ro%C4%8Dn%C3%ADk%202))).

Tabuľka 1. Mesačný úhrn zrážok v mm v jednotlivých povodiach.

Table 1. Total monthly precipitation in individual river basins in mm.

mm za mesiac	Poprad a Dunajec	Morava sl.časť	Nitra	Dunaj sl.časť	Váh bez Nitry	Hron	Ipeľ sl.časť	Slaná	Hornád	Bodva	Bodrog sl.časť
január	62	42	57	34	61	64	43	46	55	56	87
február	51	23	35	36	44	53	54	57	47	55	70
marec	34	15	13	4	24	14	7	13	20	13	25
apríl	66	40	38	40	51	47	40	46	61	59	61
máj	126	90	127	84	133	142	111	103	110	100	88
jún	75	32	26	7	31	42	32	40	38	29	30
júl	111	62	104	81	99	99	86	97	119	87	87
august	199	133	120	60	156	118	92	137	142	158	131
september	61	41	50	57	52	47	52	57	49	55	48
október	11	11	15	21	16	14	16	15	9	9	3
november	36	56	47	37	45	52	48	56	44	66	67
december	57	54	49	47	59	50	43	34	34	28	58
ročný úhrn v mm	889	599	681	508	771	742	624	701	728	715	755

Tabuľka 2. Podiel mesačných zrážok k mesačnému normálu (1961–1990).

Table 2. Proportion of monthly precipitation to the monthly normal (1961–1990).

% za mesiac	Poprad a Dunajec	Morava sl.časť	Nitra	Dunaj sl.časť	Váh bez Nitry	Ipeľ sl.časť	Slaná	Hornád	Bodva	Bodrog sl.časť	
január	148	112	129	96	115	129	113	126	175	174	208
február	128	60	85	106	90	109	148	144	146	166	193
marec	80	43	34	13	53	31	21	33	55	35	63
apríl	109	88	79	103	91	82	83	81	107	108	117
máj	126	141	183	157	157	168	161	119	126	123	119
jún	62	43	32	11	30	43	39	41	37	30	32
júl	98	93	161	155	111	133	143	130	130	104	95
august	190	214	167	100	174	151	156	183	168	206	167
september	87	88	101	141	80	77	109	107	85	101	83
október	20	27	34	60	28	25	37	29	18	19	6
november	61	102	75	69	64	68	79	87	83	119	124
december	112	116	85	114	88	77	89	75	85	68	107
% za rok	102	94	97	94	90	91	98	96	101	104	110

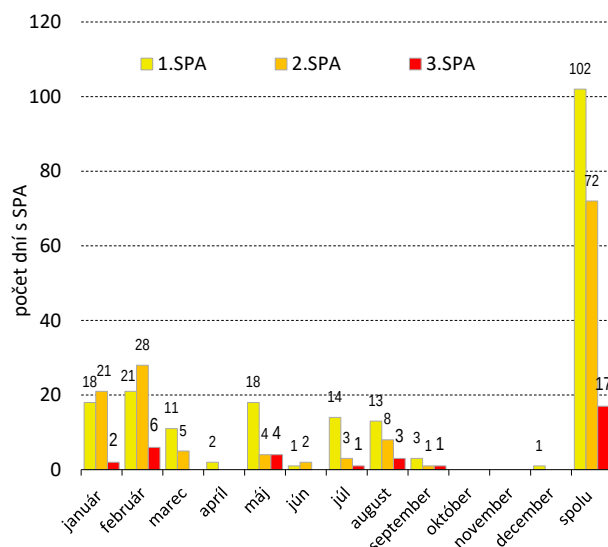
V povodí horného a stredného Váhu sme koncom decembra zaznamenali povodňové situácie s dosiahnutím 1. stupňa PA na niektorých tokoch v povodí Oravy vplyvom ľadových bariér, topenia snehu a dažďa. Vzhľadom na nízke zrážkové úhrny, ako aj akumuláciu zrážok vo forme snehu, vodnosť bola podnormálna až suchá.

Štatistický prehľad o výskyte stupňov PA počas roka 2021

Pri hodnotení počtu dní s dosiahnutým stupňom PA sa v rámci roka berú do úvahy všetky povodňové udalosti, ktoré sa vyskytli v priebehu roka vo všetkých operatívnych vodomerných staniciach, v ktorých sú stupne PA stanovené. Ak sú v priebehu jedného dňa v stanici dosiahnuté rôzne stupne PA, do hodnotenia sa berie najvyšší dosiahnutý stupeň. V priebehu roka 2021 bolo zaznamenaných 122 dní s povodňovou aktivitou (priemerný počet dní je 109), pričom povodie Bodrogu bolo sumárne tretinu roka v povodňovej aktivite (118 dní), povodie Hornádu 41 dní, povodie Váhu 36 dní. Príčinou veľkého počtu povodňových dní v povodí Bodrogu bol dážď spojený s topením snehu v Zakarpatskej Ukrajine a postupné veľmi pomalé dotekanie na slovenské územie.

Obrázok 1. Počet dní s 1., 2. a 3. stupňom PA v jednotlivých mesiacoch v roku 2021 v operatívnych vodomerných staniciach (SR).

Figure 1. Number of days with 1st, 2nd and 3rd Flood alert level in individual months of 2021 in operational water gauging stations (SR).



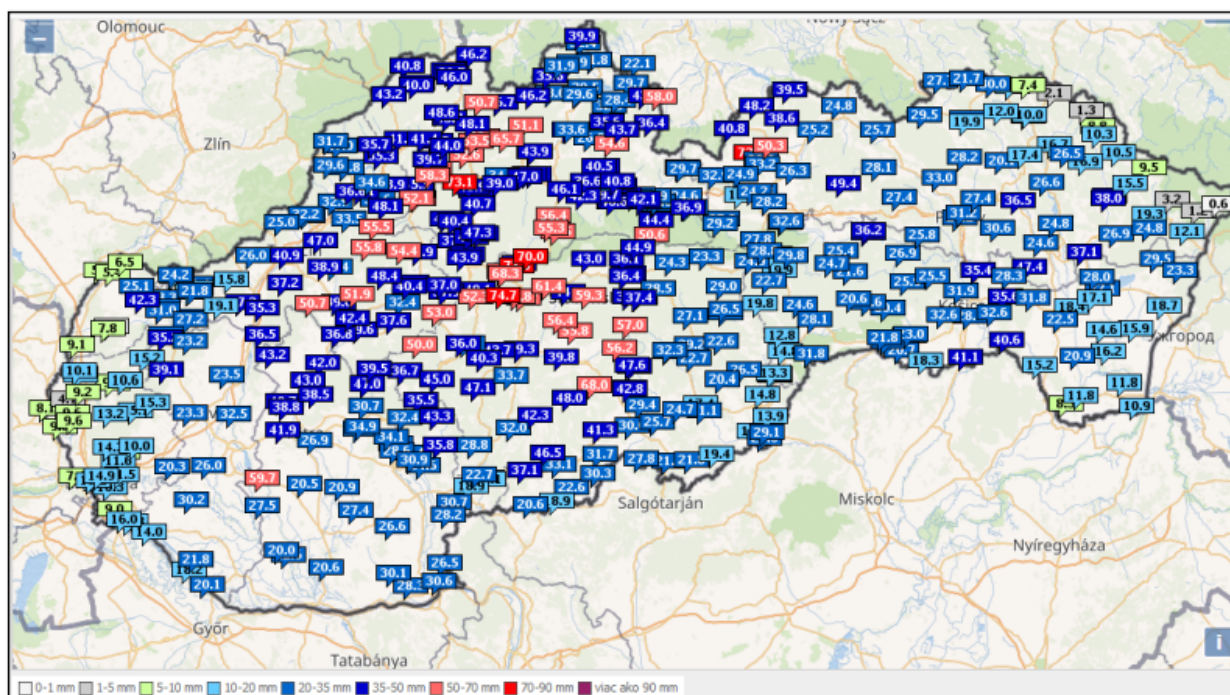
Tabuľka 3. Počet dní s 1., 2. a 3. stupňom PA v jednotlivých mesiacoch roku 2021 v operatívnych VS (SR).

Table 3. Number of days with 1st, 2nd and 3rd Flood alert level in individual months of 2021 in operational gauging stations (SK).

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	Spolu
1.stupeň PA	18	21	11	2	18	1	14	13	3	0	0	1	102
2.stupeň PA	21	28	5	0	4	2	3	8	1	0	0	0	72
3.stupeň PA	2	6	0	0	4	0	1	3	1	0	0	0	17
akýkoľvek stupeň	27	28	11	2	18	3	15	14	3	0	0	1	122

Obrázok 2. 24-hodinové úhrny zrážok 15. 5. k 6:00.

Figure 2. 24-hour precipitation totals, 15 May at 6:00.



Rozbor povodňovej situácie v povodí Nitry v máji 2021

V druhej polovici mája 2021 sme zaznamenali výrazné vzostupy vodných hladín na tokoch západného Slovenska. V povodí Nitry a jej prítokoch boli takmer vo všetkých vodomerných staniciach dosiahnuté a na niektorých výrazne prekročené 3. stupne PA. Povodňovej situácii predchádzal vzniknutý mohutný pás zrážkovej činnosti, ktorý sa presúval od juhu až juhovýchodu nad územie západného a stredného Slovenska, kedy boli silnými a trvalými zrážkami zasiahnuté najmä oblasti Záhoria, povodia Nitry, severného Slovenska a oblasť Horehronia, neskôr sa pásma zrážok presunulo na východné Slovensko a Ukrajinu (Tab. 4).

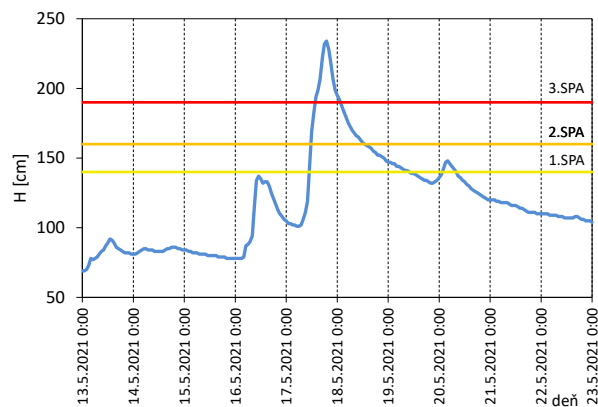
Do pomerne nasýteného povodia predchádzajúcimi zrážkami spadli 17.5. ďalšie výdatné zrážky. Silný dážď začal 17.5. v ranných hodinách a padal celý deň až do predpoludnia 18.5. Namerané 24-hodinové úhrny v povodí Nitry sa pohybovali v intervale od 20,5 mm do 55,8 mm (vo Valaskej Belej).

Trvalý dážď spôsobil výrazné vzostupy vodných hladín na všetkých tokoch povodia Nitry. Výrazne boli prekročené 3. stupne PA takmer vo všetkých hydrologických profiloch povodia hornej Nitry.

Kulminácie vodných hladín boli zaznamenané po zoslabnutí dažďa vo večerných až nočných hodinách 17.5. V nasledujúcom dni pokračoval vzostup vodných hladín z dotekania na stredných a dolných úsekoch tokov povodia Nitry.

Obrázok 3. Priebeh hladín vo vodomernej stanici Zlaté Moravce - Hostiansky potok, máj 2021.

Figure 3. Time series of water levels in the gauging station Zlaté Moravce - the Hostiansky creek, May 2021.



Tabuľka 4. Kulminácie vodných stavov a prietokov vo vybraných vodomerných staniciach v povodí Nitry.

Table 4. Table of Peak water and discharges from selected gauging stations in the Nitra river basin, May 2021.

Stanica	Tok	Deň	Hodina	H _{max} (cm)	Q _{max} (m ³ s ⁻¹)	N-ročný Q	Stupeň PA
Handlová	Handlovka	17.5.	16:00	163	22,0	5	3.
Obyce	Žitava	17.5.	16:45	104	19,2	5	2.
Nedožery	Nitra	17.5.	17:15	229	58,2	10	3.
Nováky	Lehotský p.	17.5.	17:30	170	17,3	5–10	3.
Krásna Ves	Bebrava	17.5.	16:45	90	5,31	> 2	2.
Bánovce nad Bebravou	Radiša	17.5.	18:00	288	27,6	10	3.
Prievidza	Handlovka	17.5.	18:30	177	40,1	5–10	3.
Biskupice	Bebrava	17.5.	19:15	470	55,5	< 10	3.
Zlaté Moravce	Hostiansky p.	17.5.	18:45	236	36,7	50	3.
Chalmová	Nitra	17.5.	22:30	297	114	10	3.
Nitrianske Rudno	Nitrica	17.5.	22:00	225	45,9	10	3.
Vieska nad Žitavou	Žitava	17.5.	23:30	407	56,3	> 10	3.
Tužina	Tužina	18.5.	1:30	90	4,02	1–2	2.
Nadlice	Bebrava	18.5.	1:45	377	99,8	10	3.
Liešťany	Nitrica	18.5.	0:15	151	26,8	> 2	2.
Veľké Bielice	Nitrica	18.5.	8:30	243	39,7	1–2	2.
Nitrianska Streda	Nitra	18.5.	8:15	399	314	20–50	3.
Nové Zámky	Nitra	19.5.	2:15	640	305	20	3.

Rozbor povodňovej situácie v povodí Bodrogu v zime 2020/2021

Trvalý dážď v poslednej dekáde decembra v nižších polohách už počas vianočných sviatkov spôsobil prvé vzostupy vodných hladín na tokoch Uh, Latorica, dolný Laborec a Bodrog v povodí Bodrogu (Tab. 5). Na hydrologickú situáciu mali vplyv zrážkové udalosti v kombinácii s topením sa snehovej pokrývky na našom území a aj na území západnej Ukrajiny. Vodné hladiny na východoslovenských tokoch na prelome rokov naďalej stúpali a vplyvom ďalšej zrážkovej činnosti na začiatku januára 2021 prekročili stupne PA. V prvých dvoch mesiacoch roka sa viackrát vystriedalo chladné počasie s teplejším. Oteplenie, ktoré väčšinou bolo spojené s výdatnými dažďami, spôsobilo aj topenie existujúcej snehovej pokrývky. Následkom spomínaných poveternostných situácií došlo v januári a vo feb-

ruári k formovaniu niekoľkých povodňových vln hlavne v dolnej časti povodia Bodrogu. Výrazné oteplenie na začiatku februára spôsobilo zredukované zásoby vody v snehovej pokrývke zhruba na štvrtinu. Podobné teplotné a zrážkovo-odtokové pomery na začiatku mesiaca prevládali aj v západnej časti Ukrajiny. Najprv začali stúpať toky v hornej časti povodia Bodrogu a postupne vplyvom dotekania zo slovenského aj ukrajinského územia zareagovali vzostupom aj toky v dolnej časti povodia. Všetky toky v povodí Bodrogu kulminovali do 13. 2. Práve počas tejto povodňovej epizódy boli dosiahnuté najvyššie kulminačné vodné stavy v povodí Bodrogu, vo Veľkých Kapušanoch na Latorici s prietokom 2 až 5-ročným prekročením maximálnych prietokov. Povodňová situácia bola špecifická aj dĺžkou trvania 63 dní, čo predstavuje viac ako polovicu priemerného počtu dní so stupňami PA na celom Slovensku.

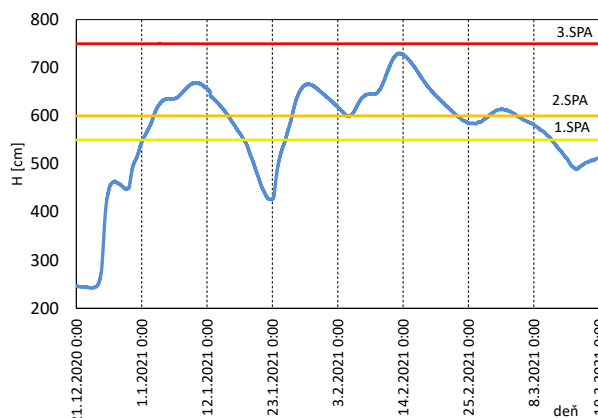
Tabuľka 5. Tabuľka kulminácií z vybraných vodomerných staníc v povodí Bodrogu od decembra 2020 do marca 2021.

Table 5. Table of Peak water levels and discharges from selected gauging stations in the Bodrog basin from December 2020 to March 2021.

Stanica	Tok	Dátum	Hodina	H _{max} [cm]	Q _{max} [m ³ s ⁻¹]	N-ročný Q	Stupeň PA
Michaľany	Roňava	29.12.	12:30	294	14,3	1	3.
Michaľany	Roňava	30.12.	16:45	268	12,0	<1	3.
Michaľany	Roňava	5.1.	11:45	292	14,10	1	3.
Streda nad Bodrogom	Bodrog	9.1.	14:00	729	390	<1	2.
Veľké Kapušany	Latorica	9.1.	20:00	669	143	1	2.
Michaľany	Roňava	25.1.	10:15	305	15,4	1	3.
Zemplínsky Branč	Chlmec	26.1.	0:00	186	4,89	1–2	2.
Ižkovce	Laborec	26.1.	6:15	709	274	<1	2.
Veľké Kapušany	Latorica	28.1.	17:30	666	141	1	2.
Streda nad Bodrogom	Bodrog	29.1.	9:15	725	372	<1	2.
Michaľany	Roňava	4.2.	17:15	294	14,3	1	3.
Michaľany	Roňava	9.2.	2:45	295	14,4	1	3.
Michaľany	Roňava	10.2.	2:30	288	13,7	1	3.
Ižkovce	Laborec	10.2.	10:15	701	304	<1	2.
Michaľany	Roňava	11.2.	5:00	267	11,9	<1	3.
Ižkovce	Laborec	11.2.	22:45	713	325	<1	2.
Veľké Kapušany	Latorica	13.2.	4:45	730	236	2–5	2.
Streda nad Bodrogom	Bodrog	13.2.	18:30	814	518	1	2.
Michaľany	Roňava	24.2.	21:45	225	8,58	<1	2.
Michaľany	Roňava	25.2.	20:45	253	10,8	<1	3.
Streda nad Bodrogom	Bodrog	2.3.	2:45	712	371	<1	2.
Veľké Kapušany	Latorica	2.3.	10:00	614	122	<1	2.

Obrázok 4. Pribeh vodných hladín vo vodomernej stanici Veľké Kapušany – Latorica, zima 2020/2021.

Figure 4. Time series of water levels in the gauging station Veľké Kapušany – the Latorica river, winter 2020/2021.



Záver

Rok 2021 bol z hľadiska počtu dní s dosiahnutými a prekročenými stupňami PA (122) v porovnaní s obdobím 2007–2020 slabšie nadpriemerný a v hodnotení s predchádzajúcim rokom porovnateľný. Povodne sa vyskytovali v priebehu všetkých ročných období s výnimkou jesene.

Podrobný rozbor jednotlivých povodňových situácií je zdokumentovaný v deviatich povodňových správach, ktoré sú uvedené na webovej stránke SHMU.

Zoznam povodňových správ z roku 2021 (dostupné na <http://www.shmu.sk/sk/?page=128>):

- Toky východného Slovenska v zime 2020/2021
- Toky v povodí Moravy a Nitry na konci januára a začiatku februára 2021
- Toky západného Slovenska v máji 2021
- Toky východného Slovenska v máji 2021
- Toky východného Slovenska v máji 2021 • Príloha 1
- Toky západného Slovenska v júli 2021
- Toky západného Slovenska v auguste 2021
- Toky v povodí horného a stredného Váhu v auguste a na začiatku septembra 2021
- Povodňová správa 2021 • Príloha 1

Danica Lešková
SHMÚ, Bratislava

METEOROLOGICKÉ POZOROVANIA V TELGÁRTE SA ZAČALI PRED 80 ROKMI

Prvé reálne snahy o zriadenie meteorologického pracoviska v užšom geografickom priestore Kráľovoholia sa datujú do doby krátko po vzniku 1. Československej republiky. Išlo pritom nielen o predstavy, ale dokonca o skutočne predložený projekt na vybudovanie leteckého meteorologického signalizačného observatória v tejto oblasti, a to priamo na Kráľovej holi. Aktivita súvisela s prebiehajúcim rozmachom leteckej dopravy v Československu a táto stanica mala uľahčovať prelety lietadiel v smere západ → východ a opačne.

Vznik profesionálnej meteorologickej stanice v najvýchodnejšej časti Horehronia sa ale napokon uskutočnil až o ďalších takmer 20 rokov neskôr a je spojený s lavínou udalostí na prelome 30. a 40. rokov 20. storočia. Existujúca situácia s medzicasom vypuknutou 2. svetovou vojnou si vyžiadala nutné doplnenie siete poveternostných staníc pre potreby letectva a jednou z najakútnejších lokalít, odkiaľ veľmi chýbali aktuálne údaje o meteorologických podmienkach, bol na prelety často využívaný priestor medzi východnou časťou Nízkych Tatier (Kráľovoholské Tatry) a Slovenským rudohorím. Voľba napokon padla na Telgárt, čím sa čiastočne zrealizovala pôvodná predstava o stanici práve v oblasti Kráľovej hole.

Prvá meteorologická stanica v Telgárte (v komunikácii celého horehronského regiónu je bežné spojenie „na Telgárte“) vznikla v blízkosti tunela (známa „Telgártska slučka“), v areáli „Penziónu Telgárt“, slúžiaceho od čias budovania železničnej trate Červená skala-Margecany (v rokoch 1931 až 1936). Stanica začala pracovať **2. mája 1942** ako *Vojenská letecká poveternostná stanica č. 18*. Jej samotné zriadenie sa spája s menom starohorského rodáka Jána Stolára. Prvým veliteľom stanice bol menovaný Rudolf Kadlec, a ako súbežne pôsobiaci pozorovateľ sa sem v prvopočiatoch prevádzky dostal Adam Kadáš.

V prvých mesiacoch slúžila stanica len na priame operatívne zabezpečovanie letov, od začiatku roka 1943 už prevádzka prebiehala v plnom štandardizovanom rozsahu. Na pracovisku sa v tom čase každé tri hodiny zostavovali tzv. synoptické depeše letecké, čo bol názov pre spravodajstvo z vojenských meteorologických staníc pre letectvo. Na vysielanie správ na veliteľstvo v Brezne sa používala rádiostanica, ktorej zdrojom elektrického prúdu bolo dynamo (rotor dynamo sa otáčal šľapaním na pedále). Počiatkové obdobie meteorologických pozorovaní v Telgárte bolo teda vojnové. Depeše vstupovali do zabezpečovania letov Slovenských vzdušných zbraní aj nemeckej Luftwaffe, najmä na ruský vojnový front. Výber pracovníkov sa uskutočňoval priamo z transportu slovenských vojakov, ktorí smerovali práve na východný front.

Ešte v dobe stále prebiehajúcej vojny, sa za účasti vtedajšieho Štátneho hydrologického a meteorologického ústavu rozhodlo a aj začalo s výstavbou novej meteorologickej stanice v Telgárte, situovanej na návrší v miestnej lokalite Hrb, v nadmorskej výške tesne nad 900 m.

Krátko po vypuknutí Slovenského národného povstania boli pravidelné meteorologické pozorovania, dotiaľ vykonávané na pôvodnej telgártskej stanici, prerušené. Bol to práve Telgárt, ktorý bol následne miestom najurputnejších bojov medzi povstalecko-partizánskou armádou a Nemcami, ktoré vošli do histórie pod veľavravným hovorovým označením „malý/slovenský Stalingrad“. Dňa 3. septembra 1944 dobyl dedinu úderný pluk nemeckej 1. tankovej armády, a ako ich hlavný oporný bod sa predpokladá penzión a meteorologická stanica, pričom práve v tomto priestore mali podľa všetkého rozmiestnené aj svoje delostrelecké jednotky. 5. septembra 1944 skoro ráno sa začala povstalecká protiofenzíva na tieto pozície, pričom ešte predpoludním bola dobytá celá obec. Povstanci obsadili a následne opevnili penzión a meteorologické objekty.

Nemecký protiúder toho istého dňa popoludní za účelom dobytia tejto strategickú pozíciu späť, bol zastavený. Pri nemilosrdných bojoch v tento deň však Telgárt prakticky kompletne vyhořel (Obr. 1).

Objekt novej meteorologickej stanice utrpel v ťažkých bojoch poškodenie, avšak zničený nebol. Po vyhoření dediny dokonca v staničnej budove sedem miestnych rodín našlo dočasnú strechu nad hlavou. Časom opravená a dobudovaná nová stanica (Obr. 2) napokon začala svoju predurčenú, meteorologickú pozorovaciu činnosť 29. júla 1946. Odvtedy slúži svojmu účelu bez prerušenia až do súčasnosti.

Od 1. júla 1948, v tom čase už ako Švermovo (názov obce v rokoch 1948–1990), bola stanica na určitý čas zaradená aj medzi stanice aerologické, a tak okrem pravidelných prízemných meraní a pozorovaní zahájila aj pravidelné merania výškového vetra pomocou optickej pilotáže meteorologických balónov. Dnes už telgártska stanica nespadá ani pod svoju pôvodnú klasifikáciu vojenskej a leteckej meteorologickej stanice, a teda nevykonáva z toho plynúce špeciálne úlohy. Dlhodobu a naďalej až doteraz však zostáva profesionálnou stanicou, na ktorej sa vykonávajú synoptické aj klimatické pozorovania. V roku 1992 pribudol medzi výbavu stanice počítač a postupne prebehla automatizácia stanice na úroveň dnešného štandardu.

Telgárt možno klimaticky charakterizovať ako typickú lokalitu vo svahovitom reliéfe v rámci stredných polôh Slovenska. Leží v priestore akoby na rozhraní sféry vplyvu oceánickej a kontinentálnej klímy, s pomerne proporcionálnym zastúpením ovplyvňujúcich vzduchových hmôt od západu, resp. východu. V detailnejšom meradle pre toto miesto nie je natoľko charakteristický výskyt teplotných inverzií, tzv. jazerá chladnejšieho vzduchu sa pri inver-

Obrázok 1. Historický záber na vyhořený Telgárt zo dňa 30. septembra 1944

(zdroj: Vojenský historický ústav – Vojenský historický archív v Bratislave/webumenia.sk).



ziách obvyklejšie vytvárajú až nižšie v rámci Horehronského podolia. Na vývoj počasia tu má určitý vplyv vysokohorská hôľna časť Kráľovohoľských (Nízkyh) Tatier, ktorá sa napr. špecificky prejavuje pri vytváraní oblačnosti, a tým aj v dĺžke trvania slnečného svitu. Napriek svojej pomerne vysokej nadmorskej výške v Telgárte nedochádza k výskytu obzvlášť vysokých hodnôt výšky snehovej pokrývky, pretože kvôli existencii okolitých horských masívov je lokalita vystavená vlhkejším vzduchovým hmotám počas zimného obdobia v menšej miere. S ohľadom na pozíciu veľmi blízko významného sedla Besník je lokalita tiež známa výskytom kvázi padavého severovýchodného vetra.

Vybrané historické extrémny niektorých hlavných charakteristík teploty vzduchu a atmosférických zrážok pre meteorologickú stanicu Telgárt uvádzame v Tab. 1. Zaujímavé spomedzi uvedených extrémov je napríklad to, že napriek markantnému otepľovaniu a extremizácii klímy v uplynulých 30–40 rokoch tam stále nebola prekonaná najvyššia zaznamenaná teplota vzduchu z augusta 1952, čo

Obrázok 2. Meteorologická stanica Telgárt v súčasnosti na záberoch z roku 2018 (zdroj/autor: regiontelgart.sk/František Urban).



tiež potvrdzuje určité špecifické podmienky tejto meteorologickej stanice.

Môžeme bez najmenších pochybností tvrdiť, že v Telgarte sa pred dlhými osemdesiatimi rokmi začala budovať pozícia nesporne dôležitého pracoviska pre monitorovanie počasia a klímy v rámci územia dnešného Slovenska. Osobitnú historickú pozoruhodnosť oproti ostatným prvkom našej siete meteorologických staníc nadobúda telgártska meteorologická infraštruktúra v kontexte mimoriadnych bojových udalostí počas 2. svetovej vojny (SNP).

Dovoľte záverom vysloviť uznanie a poďakovanie najmä všetkým správcam a pozorovateľom profesionálnej meteorologickej stanice v Telgarte, ktorí sa v prvom rade pričínili a pričínujú o jej dlhodobé, pričom spoľahlivé fungovanie.

Literatúra

- Flajšman, M.–Štekl, J., 2017, *Hydrometeorologická služba armády České republiky 1918–2018*. Praha: Ministerstvo obrany ČR – Vojenský historický ústav. 367 s.
- Krška, K., 2001, *Z dějin československé vojenské meteorologické služby*. Meteorologické zprávy 54(5): 156–160.
- Makrovský, J.–Nedelka, M., 1992, *Vojenská letecká povětrnostná stanica s číslem 18 (50 rokov od začiatku meteorologických pozorovaní v Telgarte)*. Bulletin Slovenskej meteorologickej spoločnosti pri SAV 3(3): 34–40.
- Mrkos, J., 1924, *Projekt letecké meteorologické signalizační observatoře na Králově Holi v Malých Tatrách*. Vojenský letecký ústav studijní, zv. 1. 11 s.
- Polčák, N.–Pecho, J., 2009, *Historický vývoj meraní a pozorovaní na meteorologických stanicích v povodí Hrona*. Bulletin Slovenskej meteorologickej spoločnosti pri SAV 20(1): 10–14.

Pavol Pisár, SHMÚ, MS Telgárt
Pavol Faško, Dalibor Výberčí, SHMÚ, Bratislava

25. STRETNUTIE SNEHÁROV

Posledný marcový týždeň, v termíne od 29. do 31. 3. 2022 sa konalo už 25. stretnutie snehárov. Po minuloročnej online forme podujatia (z dôvodu pandemických obmedzení) sa účastníci tešili z osobného stretnutia v horskom prostredí, na aké boli zvyknutí v predošlých ročníkoch. Organizáciu a prípravu zabezpečil M. Jeníček z Katedry fyzickej geografie Prírodovedeckej fakulty Karlovej univerzity v Prahe. V rámci pôvodného plánu z roku 2021 boli miestom konania tohtoročných snehárov české Krkonoše, konkrétne Patejdlova bouda v Špindlerovom Mlyne.

Na podujatí sa stretlo viac než 20 účastníkov pochádzajúcich z rôznych inštitúcií z Českej republiky a Slovenska – reprezentujúcich najmä operatívnu hydrologiu, klimatológiu, ale aj vzdelávanie a výskum. Počas

Tabuľka 1. Extrémy vybraných meteorologických charakteristík, zaregistrované na meteorologickej stanici Telgárt (stav ku koncu apríla 2022).

Charakteristika	Hodnota a termín zaznamenania	
Najvyššia dosiahnutá teplota vzduchu	32,1 °C	15. augusta 1952
Najnižšia dosiahnutá teplota vzduchu	-25,7 °C	13. januára 1987
Najvyššia priemerná ročná teplota vzduchu	7,0 °C	2014
Najnižšia priemerná ročná teplota vzduchu	3,5 °C	1956
Najvyššia priemerná mesačná teplota vzduchu	18,5 °C	august 1992
Najnižšia priemerná mesačná teplota vzduchu	-11,5 °C	február 1956
Najvyšší ročný úhrn atmosférických zrážok	1281,8 mm	2010
Najnižší ročný úhrn atmosférických zrážok	528,0 mm	2003
Najvyšší mesačný úhrn atmosférických zrážok	275,8 mm	október 1974
Najnižší mesačný úhrn atmosférických zrážok	0 mm	október 1951
Najvyšší denný úhrn atmosférických zrážok	94,6 mm	22. júla 1976
Maximálna výška novej snehovej pokrývky za deň [od r. 1951]	63 cm	23. novembra 1962
Maximálna výška celkovej snehovej pokrývky [od r. 1951]	140 cm	20. februára 1962

existencie stretnutí sa kolektív „snehárov“ rozrástol aj o lesníkov, pracovníkov strediska lavínovej prevencie, či mladých kolegov v dotknutých odboroch. S cieľom vzájomnej informovanosti a výmeny aktuálnych poznatkov sa snehárske stretnutia konajú na pravidelnej báze od roku 1996. Spoločným objektom záujmu je najmä úzka problematika hydrológie snehu.

Počas trojdňového neformálneho podujatia sa uskutočnili tri bloky prezentácií s následnou diskusiou, dohromady odznelo 15 príspevkov. Prvý blok bol v úvodný deň vo večerných hodinách. Nakoľko kolegovia z ÚH SAV v Lipt. Mikuláši nemohli prísť osobne, bolo počas prezentácií vytvorené online spojenie cez platformu ZOOM. Po úvodnom slove M. Jeníčka, ktorý účastníkov privítal a oboznámil s programom stretnutia, nasledoval prvý blok prezentácií. Zaujímavými boli príspevky o modelovaní intercepce snehovej pokrývky a o storočných radoch pozorovaní výšky snehovej pokrývky na stanicích v horských oblastiach Slovenska. Druhý deň dopoludnia nasledoval ďalší blok prezentácií. Začal príspevom o problematike monitoringu snehovej pokrývky v rámci zapojenia širšej verejnosti (tzv. citizen science). V tomto bloku odznela aj prezentácia o halovom simulátore dažďa na zamrznutom pôdnom vzorku. Poobedný čas bol vyhradený na prípadnú turistiku v okolí chaty. V podvečerných hodinách nasledoval posledný blok, na ktorom odznel príspevok o rain-on-snow udalostiach vo vybraných povodiach Česka a ich premenách v čase. Záver dňa bol venovaný prezentácii fotiek O. Neděľčeva, ktorý sa zúčastnil expedície na ostrove Jamesa Rossa na Antarktíde. Väčšinová časť príspevkov sa venovala zhodnoteniu pomerov v končiacей sa zimnej sezóne (v rámci jednotlivých pracovísk), aktuálnym poznatkom a novinkám v dotknutej problematike (zber údajov, modelovanie, interpretácia meraní).

Tohtoročné stretnutie sa uskutočnilo vo prezenčnej podobe po minuloročnom online formáte, čo prispelo k podnetnejšej diskusii a interakcii účastníkov. Zároveň vznikla dohoda, že nasledujúce stretnutie sa uskutoční už opäť o rok, tentokrát na území Slovenska.

Martin Halaj, OHMPAV, Banská Bystrica

Prof. RNDr. MILAN LAPIN CSc. ZÍSKAL ŠTÁTNE VYZNAMENANIE

Dňa 8. mája 2022, prevzal prof. RNDr. Milan Lapin, CSc. z rúk prezidentky Slovenskej republiky, Zuzany Čaputovej, Rad Ľudovíta Štúra II. triedy za mimoriadne zásluhy o rozvoj Slovenskej republiky v oblasti vedy. Bol medzi 25 osobnosťami spoločenského, kultúrneho a športového života, ktorým boli udelené štátne vyznamenania v roku 2022.

Ocenenie prof. Lapinovi právom patrí za jeho výrazný vedecký príspevok na poli meteorológie a klimatológie. Vo vedecko-výskumnej činnosti sa prof. Lapin spočiatku zaoberal najmä problematikou evapotranspirácie a atmosférických zrážok. Zároveň svoju pozornosť upriamoval na klimatický systém Zeme a otázky zmien a premenlivosti klímy. Odkiaľ bol už len skok k aktuálnej problematike zmeny klímy. A práve túto širokú a ucelenú oblasť dokázal dlhodobo skúmať a zároveň tvorivo rozpracovať. Išlo najmä o metodiku na regionálnu interpretáciu výstupov globálnych a neskôr aj regionálnych atmosférických modelov na území Slovenska. Venoval sa tomu od dôb, keď patrilo k iniciátorom založenia Národného klimatického programu Československa (od 1.1.1991 a pokračoval v období 1993–2001, keď bol predsedom Národného klimatického programu (NKP) Slovenska a koordinátorom projektu NKP SR. Postupne, v spolupráci s kolegami z Oddelenia meteorológie a klimatológie na Katedre astronómie, fyziky Zeme a meteorológie na MFFI sa cieľavedomo venovali tejto výzve. Vhodný a premyslený výber globálnych cirkulačných modelov, neskôr aj regionálnych modelov a neustále zdokonaľované metódy štatistického downscalingu aplikované na územie Slovenska vyústili do dôležitých podkladov vo forme kvantifikovaných dô-

sledkov zmeny klímy pre rôzne časové horizonty. Tieto projekcie, okrem klimatológie a hydrológie, sú dôležité aj pre rôzne iné sektory. Výsledky práce prof. Lapina a jeho tímu boli aplikované a zapracované do dôležitých národných dokumentov. Ide jednak o hodnotiace správy o zmene klímy na Slovensku (v súčasnosti sa pracuje už na ôsmej v poradí), adaptačných stratégiách a adaptačných plánoch na nepriaznivé dôsledky zmeny klímy na Slovensku. V podstate sa dá povedať, že každý dôležitý projekt, alebo vedecký článok, či dokument, zaoberajúci sa klimatickou zmenou a ktorý vznikol za posledných viac než 20 rokov na Slovensku, čerpal z výstupov projekcie budúcej klímy z dielne prof. Lapina.

K vedeckej práci patrí aj propagácia jej výsledkov. Táto bola prezentovaná v zhruba 400 publikovaných vedeckých a odborných prácach, ako aj na mnohých domácich i zahraničných vedeckých konferenciách. Prof. Lapin má vzácny dar, vysvetľovať zložité veci zrozumiteľne a zároveň pútavo aj pre širokú verejnosť. Túto svoju danosť uplatňuje v aktivitách spätých s propagáciou meteorológie a klimatológie, objasňovaním problematiky zmeny klímy a iných aktuálnych problémov v rozhlase, televízii a dennej tlači ako aj na webových stránkach.

Jeho pedagogická, projektová a iná inštitucionálna činnosť je tiež veľmi bohatá a významná, bola podrobne zhodnotená pri životných míľnikoch prof. Lapina aj na stránkach nášho časopisu. Ako v nich bolo spomenuté, náš ocenený vedec je úspešným pokračovateľom odkazu prof. M. Končeka a Dr. Š. Petroviča.

Prajeme ocenenému, prof. Lapinovi, veľa zdravia a tvorivej energie aj v ďalšom období, pohody a spokojnosti v osobnom živote.

Pavol Šťastný, SHMÚ, Bratislava



PERSONÁLIE

PERSONALS

RNDr. GABRIEL SZABÓ, CSc. **SEDEMDESIATPÄTŤROČNÝ**

Dňa 4. 3. 2017 oslávil v kruhu rodiny a v dobrom zdraví svoje okrúhle životné jubileum – 75 rokov, RNDr. Gabriel Szabó, CSc. Jubilant je rodený Košičan, strávil tam svoje stredoškolské aj vysokoškolské roky a tiež svoj celý pracovný život. Od roku 1973 do svojho odchodu do dôchodku bol vedeckým a odborným pracovníkom pobočky, neskôr regionálneho strediska SHMÚ v Košiciach. Tu bol členom kolektívu oddelenia čistoty ovzdušia, ktorý neskôr aj viedol. Od skončenia štúdia inklinoval k vedeckej práci, najmä k modelovaniu procesov rozptylu a transportu znečisťujúcich látok v ovzduší. Napredoval v ďalšom štúdiu a v zdokonaľovaní svojich zručností v oblasti modelovania v prízemnej vrstve atmosféry - kandidatúru na GÚ SAV obhájil v roku 1981, vedecko-kvalifikačný stupeň II. získal v roku 1987 a od roku 1997 vykonával funkciu hosťujúceho docenta na Stavebnej fakulte Technickej univerzity v Košiciach. Dr. Szabó vo svojej riadiacej a organizačnej práci sa podstatným dielom podieľal na výstavbe, rozvoji a neskôr automatizácii monitorovacieho systému znečistenia ovzdušia. No ťažisko jeho práce bolo vo vedecko-výskumných aktivitách v problematike hodnotenia kvality ovzdušia, a to nielen v regionálnom, ale aj v celoštátnom meradle. V tomto smere tvorivo rozvinul a aplikoval metódy matematického modelovania rozptylu znečisťujúcich látok z rôznych zdrojov. Je autorom oficiálnej metodiky MŽP SR „MODIM“ pre modelovanie kvality ovzdušia zo stacionárnych aj mobilných zdrojov, ktorú neskôr modifikoval v zmysle európskej legislatívy.

Jubilant bol koordinátorom a hlavným riešiteľom mapovania kvality ovzdušia pre každoročný reporting našej krajiny do EÚ. V tejto aktivite spolupracoval s SHMÚ aj po odchode do dôchodku. Jeho publikačná činnosť je bohatá - je autorom, resp. spoluautorom okolo 150 odborných článkov, výskumných správ, štúdií, skript a spolupracoval tiež na štyroch knižných publikáciách. Zastával funkciu predsedu vedeckej rady SHMÚ. Bol dlhoročným členom

redakčnej rady Meteorologického časopisu. Dlhé roky je tiež predsedom východoslovenskej odbočky Slovenskej meteorologickej spoločnosti.

Pri príležitosti životného jubilea prajeme oslávencovi veľa zdravia, spokojnosti, životného optimizmu a pohody v rodine.

*Pavel Šťastný
SHMÚ, Bratislava*

K ŽIVOTNÉMU JUBILEU **RNDr. KATARÍNY PUKANČIKOVEJ**

Kto z dlhoročných, ale aj z pomerne nových kolegov nášho ústavu, by nepoznal Katku Pukančíkovú, všetkým známu a predstavovanú ako Puky? Naša kamarátska, ochotná, usmievavá a srdečná dlhoročná kolegyňa oslávila okrúhle narodeniny a vôbec na to nevyzerá! Nielen fyzicky, ale aj svojou duševnou energiou. Jej nadšenie, elán a optimizmus je nevyčerateľné a nákazlivé. Teší nás jej prítomnosť, radi s ňou trávimе čas, zastavíme sa na krátky rozhovor a s radosťou s ňou pracujeme. Áno, práca našej kolegyne je naozaj obdivuhodná, je perfekcionistka, odborníčka a jej odborný názor a nápady zvyšujú kvalitu odvedenej práce (nielen) úseku Kvalita ovzdušia už dlhé roky.

Ale začnime od začiatku. RNDr. Katarína Pukančíková sa narodila 18. marca 1952 v Bratislave. Lekárske povolanie otca ju priviedlo na strednú školu do Prievidze, aby následne znovu skončila na vysokej škole v Bratislave a vyštudovala neľahký odbor numerickú matematiku na Prírodovedeckej fakulte UK. Po pár rokoch práce vo Výpočtovom laboratóriu Slovenskej plánovacej komisie začala v roku 1977 svoju dlhú a úspešnú kariéru na Slovenskom hydrometeorologickom ústave ako špecialistka na životné prostredie.

Počas svojej práce absolvovala niekoľko zahraničných pobytov, bola členkou niekoľkých výskumných projektových tímov, publikovala dlhý zoznam odborných prác a zapojila sa do riešenia zaujímavých výskumných úloh.

Bola pri výskume prenosových javov a dynamiky znečisťovania ovzdušia a programovala prvé matematické modely pre výskum regionálneho a globálneho znečistenia hlavných zložiek prírodného prostredia, ale najmä ovzdušia. Jej programovacie a matematické znalosti uplatnila pri zdokonaľovaní matematických modelov na diaľkový prenos zlúčením síry a dusíka v rámci európskych a špeciálne stredo európskych cezhraničných modelov. Jej programy pre prenosy a triedenie trajektórií našli uplatnenie aj po jadrovej havárii v Černobyle v radiačnom modelovaní.

Zo zahraničných aktivít nemožno obísť zapojenie do stále prebiehajúceho programu EMEP, participáciu na US Country Study v rokoch 1994–1997, na projekte WMO/ETEX, ako aj na slovensko-nórskom projekte Kritické úrovne a záťaž.

Pre úsek Kvalita ovzdušia je dôležité hlavne práca na programovom zabezpečení databázy malých stacionárnych zdrojov znečisťovania ovzdušia (lokálne kúreniská) REZZO III a práce na publikovaní ročníkov o kvalite ovzdušia. Pre celý ústav je dôležitá jej dlhoročná činnosť technickej redaktorky pre náš Meteorologický časopis.

Milá Katka, želám Ti z celého srdca, a v mene Redakčnej rady Meteorologického časopisu, veľa šťastných, plodných a úspešných rokov v kruhu svojej početnej rodiny. Nestrať svoju životnú energiu a optimizmus, všetci Ťa máme radi a buď nám naďalej inšpiráciou pre ďalšiu prácu a život.

*Janka Szemesová
SHMÚ, Bratislava*

RNDr. PAVEL ŠŤASTNÝ, CSc. MAL 70 ROKOV

Dr. Pavel Šťastný je pri svojich sedemdesiatych narodeninách, ktoré oslávil 13. apríla 2022, stále pracovne činný, v klimatologickej komunite jasne viditeľný a dlhodobu patrí k významným osobnostiam meteorológie a klimatológie nielen na Slovensku.

Pochádza zo stredného Slovenska, narodil sa v Banskej Bystrici a stredoškolské štúdiá absolvoval a ukončil maturitou v Martine. Vysokoškolské štúdiá absolvoval na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v Bratislave. Jeho špecializáciou bola meteorológia-klimatológia, ktorú vyštudoval v rámci odboru fyzika a ukončil štátnou skúškou v roku 1976. Externú aspirantúru začal na MFFI UK v Bratislave v roku 1979 a ukončil úspešnou obhajobou záverečnej kandidátskej práce so zameraním na energetickú bilanciu zemského povrchu v roku 1986. Výsledkom jeho vedeckých aktivít bolo priznanie vedeckého kvalifikačného stupňa II a - samostatný vedecký pracovník Komisiou SAV pre posudzovanie vedeckej kvalifikácie v roku 2001.

Do pracovného procesu jubilant nastúpil v roku 1976 na pobočke Slovenského hydrometeorologického ústavu v Košiciach, a tejto organizácii až na 2 roky strávené vyslaním na špecializovanú európsku agentúru, zostal verný až doposiaľ. V daných rokoch išlo o konsolidáciu nového

vysunutého pracoviska SHMÚ, ktoré začalo komplexne zabezpečovať prevádzku klimatologickej a hydrologickej siete a informačnú bázu pre oblasť Východoslovenského kraja. V oblasti meraní zrážok v exponovaných terénoch sa výrazne pričínal o rozšírenie a stabilizáciu siete totalizátorov v horských oblastiach. Uvedená činnosť si vyžadovala systematický prístup k zabezpečovaniu meraní, prácu v teréne, ale tiež budovanie nadstavbových činností v podobe posudkovej a expertíznej činnosti a zapojenie sa do výskumu v rámci úloh SHMÚ. Dr. Šťastný sa zapájal hlavne do klimatických hodnotení oblasti východného Slovenska – podieľal sa na riešení podnikových a štátnych výskumných úloh, ako boli Energetická bilancia zemského povrchu východnej časti Východoslovenského kraja a Klimatické pomery Východoslovenskej nížiny. Zapojený však bol tiež do riešenia mapovania klimatických podmienok urbanizovanej krajiny v mestských aglomeráciách Košíc a Bratislavy. Tu bol spoluriešiteľom úlohy Výskum mezoklímy mesta Košíc, ktorá bola súčasťou podnikového výskumu v rámci úlohy Rozvoj klimatológie pre potreby národného hospodárstva a podieľal sa tiež na riešení úlohy Výskum mezoklímy mesta Bratislavy, kde sa venoval hodnoteniu veterných pomerov. Na pobočke SHMÚ v Košiciach pôsobil vo viacerých funkciách, a v období 1990–1993 sa stal jej riaditeľom. V období priameho odborového riadenia SHMÚ od roku 1994 viedol Oddelenie klimatológie pobočky Košice.

Jeho systematická metodická a výskumná činnosť v odbore klimatológie presahovala rámec regionálneho pôsobenia, a v roku 1999 prešiel na pracovisko v Bratislave, kde do roku 2004 viedol Odbor Klimatologická služba SHMÚ Bratislava. Už od deväťdesiatych rokov venoval značnú časť svojho úsilia štúdiu zmien klimatického systému SR a dôsledkom týchto zmien. Tu sa intenzívne venoval hodnoteniu veterných pomerov jednotlivých regiónov Slovenska, zložiek vodnej (hydrologickej) bilancie jednotlivých území, analýze dlhých klimatických radov vybraných parametrov atmosféry. Zúčastnil sa na projektoch Country Study SR, WIND, Výskum kolísania a zmien klímy Západných Karpát. Bol koordinátorom projektu Národný klimatický program SR 2000 a 2001 autorsky sa postupne podieľal na zostavení viacerých vydaní Národnej správy SR o zmene klímy, aktívne sa zapájal do medzinárodnej spolupráce klimatických služieb okolitých krajín. V oblasti projektov sa do medzinárodnej činnosti sa zapojil aj ako spoluriešiteľ bilaterálneho nemecko-slovenského projektu Výpočet fenologických údajov pre klimatické účely. Jeho aktivity na medzinárodnej úrovni sa rozšírili po jeho menovaní do Technickej komisie pre meteorológiu programu COST, kde sa podieľal na hodnotení jednotlivých európskych projektov Akcií COST.

Bol členom autorského tímu na prípravu Národnej adaptačnej stratégie Slovenska a je člen pracovnej skupiny pre adaptáciu na zmenu klímy pri Ministerstve ŽP SR. V rokoch 2007 až 2009 pôsobil ako národný expert na EEA v Kodani. Ako hlavný riešiteľ, či spoluriešiteľ sa podieľal na mnohých zahraničných a domácich projektoch, napr. Dôsledky klimatickej zmeny a možné adaptačné

opatrenia v jednotlivých sektoroch, 2011; Aplikovaný výskum metód na určovanie klimatických a hydrologických návrhových veličín, 2015; CARPATCLIM - Klíma karpatského regiónu, 2013; Urban Climate in Central European Cities and Global Climate Change, 2015; *Vývoj technológie priestorového spracovania údajov o klimatickom systéme, 2015*; DriDanube - Riziko sucha v Dunajskom regióne, 2017. Je autorom mnohých odborných článkov zaoberajúcich sa variabilitou a zmenou klímy. Bol zástupcom SR v Komisii pre klimatológiu Svetovej meteorologickej organizácie a členom pracovnej skupiny WMO Regionálnej asociácie VI - WG on Climate - Related Matters.

Venoval sa tiež pedagogickej činnosti. V časoch svojho pôsobenia na pobočke SHMÚ v Košiciach, v rokoch 1992–1998, viedol semináre z klimatografie na Katedre geografie UPJŠ v Prešove, v rokoch 1993–1994 prednášal klimatológiu na Katedre letovej prevádzky Vysokiej leteckej školy v Košiciach, viedol viaceré diplomové a doktorandské práce. Často publikuje v rôznych odborných časopisoch, ale tiež v odbornो-náučných časopisoch a dennej tlači. Dr. Šťastný má popri svojej odbornej profesii aj iné hodnotné záujmy, najmä literatúru, poéziu, hudbu a túlanie sa prírodou. Z športových aktivít ho najviac zaujalo zjazdové lyžovanie, no viackrát sa zúčastnil aj na bežkárskech pretekoch a absolvoval veľa vysokohorských túr.

Tí, kto ho poznajú oceňujú jeho priateľskú povahu, bezkonfliktné jednanie, zmysel pre humor, schopnosť združovať ľudí a podnecovať tvorivú atmosféru. Do ďalšieho života mu želáme veľa zdravia, pokoj a pretrvávajúcu radosť z práce.

*Pavol Nejedlík
Milan Lapin*

JUBILANT RNDr. OLIVER BOCHNÍČEK, PhD.

V apríli tohto roku sa dožíva náš kolega, RNDr. Oliver Bochníček, PhD., významného životného jubilea, 60 rokov. Je dlhoročným pracovníkom Slovenského hydrometeorologického ústavu. V celom svojom profesionálnom živote sa významne podieľa na expertíznej a výskumnej činnosti v oblasti klimatológie.

Narodil sa 22. apríla 1962 v Bratislave, v rodine významného popularizátora astronómie Doc. RNDr. Závaša Bochníčka, CSc. Po maturite na Gymnáziu v Bratislave na Eisteinovej, v roku 1981, študoval na Matematicko-fyzikálnej fakulte UK v Bratislave, odbor fyzika, špecializácia meteorológia a klimatológia. Štúdium ukončil v roku 1986. Hneď po ukončení štúdia získal titul RNDr. a v roku 2003 PhD.

Po skončení štúdia sa zamestnal v Slovenskom hydrometeorologickom ústave, kde pracuje až dodnes. V rokoch 2004 až 2012 zastával funkciu vedúceho odboru klimatológie na SHMÚ v Bratislave. Aktívne spolupracoval na mnohých výskumných úlohách a projektoch. Podieľal sa na tvorbe mnohých metodík a predpisov v oblasti klimatológie. Pravidelne každý mesiac sa aktívne podieľa na zostavovaní Bulletinu Meteorológia a Klimatológia. Je autorom a spoluautorom viacerých vedeckých a odborných publikácií, vrátane Klimatického atlasu Slovenska.

Jubilant je rodinne založený človek, je ženatý a má 2 dcéry. Je však tiež dobrým kolegom a milovníkom športu.

K Tvojim narodeninám Ti chcem v mene seba a v mene všetkých kolegov zablahoželať a poďakovať za Tvoju dlhoročnú prácu. Do ďalších rokov Ti prajem hlavne zdravie, pohodu a spokojnosť.

Peter Kajaba, SHMÚ, Bratislava

POKYNY PRE AUTOROV

Meteorologický časopis publikuje pôvodné vedecké práce, prehľadové články, odborné príspevky, odborné informácie a personálie. V časopise sa publikujú prednostne príspevky v anglickom jazyku, v obmedzenom rozsahu tiež v slovenskom a českom jazyku.

Pre nových prispievateľov odporúčame formu príspevku prispôsobiť podľa tohto čísla Meteorologického časopisu. Texty príspevkov (MS Word), grafy (MS Excel) a obrázky (CorelDraw; jpg, tiff alebo iný grafický formát) je potrebné poslať v elektronickej forme

na e-mailovú adresu norbert.polcak@shmu.sk
a kópiu na adresu katarina.pukancikova@shmu.sk

alebo

Norbert Polčák
redakcia Meteorologického časopisu
Slovenský hydrometeorologický ústav
P.O.Box 15, 833 15 Bratislava 37

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

Meteorological journal is publishing original scientific papers, reviews and short communications. The languages of the journal are English, Czech and Slovak.

New contributors are recommended their manuscript to conform to this issue of the Meteorological Journal. Manuscript (MS Word), graphs (MS Excel) and pictures (CorelDraw; jpg, tiff or other graphic file format) should be submitted electronically to

e-mail address norbert.polcak@shmu.sk
and copy to katarina.pukancikova@shmu.sk

or

Norbert Polčák
Editorial Board of the Meteorological Journal
Slovak Hydrometeorological Institute
P.O.Box 15, 833 15 Bratislava 37
Slovak Republic

