ISSN 1335-339X

METEOROLOGICKÝ ČASOPIS
METEOROLOGICAL JOURNAL

2020

ROČNÍK 23 - ČÍSLO 2
VOLUME 23 - NUMBER 2

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 Majerčáková, SHMÚ, Bratislava
Igor Matečný, PriF UK (Faculty of Natural Sciences Comenius University), Bratislava
Irena Michlíková, SHMÚ, Bratislava
Jozef Minďáš, SEVS (University of Central Europe), Skalica
Pavol Nejedlík, SHMÚ, 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, december 2020
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

2020

Ročník 23 – Číslo 2

Volume 23 – Number 2

SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV
SLOVAK HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE

CONTENTS

EXPLOITATION OF AIRCRAFT MODE-S DATA IN AROME/SHMU NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODEL
Katarína Čatlošová, Mária Derková 65

NEW HIGH-RESOLUTION ENSEMBLE FORECASTING SYSTEM A-LAEF
Martin Belluš 75

MONITORING OF TEMPORAL CHANGES OF CONTINENTAL WATER STORAGE IN SELECTED EUROPEAN RIVER BASINS
Adam Novák, Barbora Korekáčová, Juraj Janák 87

STATISTICS OF RAINFALL EPISODES – AS INPUT FOR ANALYTICAL PROBABILISTIC MODELS OF BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE
Milan Onderka, Jozef Pecho, Jakub Mészáros 95

COMPARISON OF CHANGES IN TERRITORIAL EVAPORATION IN SELECTED RIVER BASINS OF SLOVAKIA
Anita Keszeliová 103

OBSAH

VYUŽITE LETECKÝCH DÁT TYPU MODE-S V NUMERICKOM PREDPOVEDNOM MODELI POČASIA AROME/SHMÚ
Katarína Čatlošová, Mária Derková 65

NOVÝ REGIONÁLNY ANSÁMBLOVÝ SYSTÉM S VYSOKÝM ROZLÍŠENÍM: A-LAEF
Martin Belluš 75

MONITOROVANIE ČASOVÝCH ZMIEN KONTINENTÁLNEHO VODNÉHO ZDROJA VO VYBRANÝCH EURÓPSKYCH POVODIACH
Adam Novák, Barbora Korekáčová, Juraj Janák..... 87

ŠTATISTIKA ZRÁŽKOVÝCH EPIZÓD AKO VSTUP ANALYTICKO-PRAVDEPODOBNOSTNÝCH MODELOV MODROZELENEJ INFRAŠTRUKTÚRY
Milan Onderka, Jozef Pecho, Jakub Mészáros 95

POROVNANIE ZMIEN ÚZEMNÉHO VÝPARU VO VYBRANÝCH POVODIACH SLOVENSKA
Anita Keszeliová 103

INFORMATION

Intensive rainfall at the Predna Hora on 28 June 2020
Cyril Siman 113

What brought 80 years of unique meteorological observations on Lomnický štít
Jozef Pecho, Dalibor Výberči, Pavol Faško, Branislav Chvíla..... 116

Precipitation measurements in the storage-rain gauges and their maintenance
Lucia Hlaváčová 121

New climate atlas of Bratislava assesses the vulnerability of the city to the impacts of climate change
Jozef Pecho, Eva Streberová 122

Air Young scientist conferences on SHMÚ
Alena Blahová 124

Conference "Air protection 2020"
Janka Szemesová 125

PERSONALS..... 127

INFORMÁCIE

Intenzívny lejak na Prednej Hore dňa 28. júna 2020
Cyril Siman 113

Čo prinieslo 80 rokov unikátnych meteorologických pozorovaní na Lomnickom štíte
Jozef Pecho, Dalibor Výberči, Pavol Faško, Branislav Chvíla..... 116

Meranie atmosférických zrážok v totalizátoroch a ich údržba
Lucia Hlaváčová 121

Nový Atlas Bratislavy hodnotí zraniteľnosť mesta na dôsledky zmeny klímy
Jozef Pecho, Eva Streberová 122

Konferencia mladých odborníkov na pôde SHMÚ
Alena Blahová..... 124

Konferencia Ochrana ovzdušia 2020
Janka Szemesová..... 125

PERSONÁLIE 127

EXPLOITATION OF AIRCRAFT MODE-S DATA IN AROME/SHMU NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODEL

Katarína Čatlošová, Mária Derková

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava, Odbor Numerické predpovedné modely a metódy

Pilot studies with the Mode-S aircraft data have been carried out to evaluate their potential application for the numerical weather prediction at the Slovak Hydrometeorological Institute. Temperature, wind speed and wind direction parameters from both types of Mode-S data - EHS and MRAR – have been processed. Firstly the quality of the raw data was assessed based on the statistical analysis and the selection criteria for the reliable data choice were applied. Afterwards several 3D-Var data assimilation experiments with AROME/SHMU limited area NWP system were conducted where possible benefits of Mode-S data utilisation were demonstrated.

Pilotná štúdia spracovania leteckých dát typu Mode-S bola realizovaná na Slovenskom hydrometeorologickom ústave s cieľom vyhodnotiť možnosť ich využitia v numerickej predpovedi počasia. Spracované boli merania teploty, rýchlosti a smeru vetra pochádzajúce z oboch typov Mode-S dát, EHS aj MRAR. Najprv bola odhadnutá kvalita nespracovaných meraní na základe štatistickej analýzy a následne boli aplikované kritériá na selekciu spoľahlivých údajov. Možný prínos využitia Mode-S meraní bol preukázaný prostredníctvom niekoľkých experimentov, ktoré boli realizované na numerickom predpovednom modeli na ohraničenej oblasti AROME/SHMU s aplikáciou 3D-Var asimilácie dát.

Key words: numerical weather prediction, data analysis and assimilation, aircraft Mode-S data

INTRODUCTION

The aviation traffic inevitably needs accurate and timely meteorological information for safe and efficient flights management. Mode-S data has been showing up promising to meet new requirements of aviation meteorology.

Mode-S data are aircraft measurements originally intended for navigation. According to the EUMETNET expert team (2015) meteorological information can be derived from Mode-S EHS (Enhanced surveillance) and is directly available from Mode-S MRAR (Meteorological routine air report).

Aviation meteorologists rely on numerical weather prediction as an important source of information on the current situation in the atmosphere. The proportion of meteorological measurements taken in the upper levels of atmosphere compared to near surface measurements is much lower. A higher spatial and temporal resolution of data is required for convection permitting numerical weather prediction models and nowcasting applications.

Any aircraft meteorological measurements, which Mode-S data is a part of, are concentrated near airports and along usual air routes. Mode-S data is a valuable source of upper air measurements. Thanks to measuring capability of the airborne equipment during take-offs and landings too, detailed vertical profiles of measured variables can be obtained. Aircraft data compared to radiosonde measurements have the advantage of high temporal frequency in order of magnitude of seconds for each flight.

The exploitation of Mode-S data for meteorological application commenced at KNMI. First overall study on Mode-S EHS data processing was carried out by De Haan (2009). He presented a method for derivation of meteorological parameters from EHS messages. This work was later extended by experiments on Mode-S data assimilation into a regional numerical weather prediction model (De Haan and Stoffelen, 2012).

Although Mode-S EHS data are widely available, the preprocessing is necessary. On the contrary, MRAR measurements contain direct meteorological information but only few tracking and ranging radars are adjusted to receive MRAR messages. One of them is located in Slovenia. An extensive work on MRAR data assimilation was accomplished by Strajnar (2012). In that paper, the evaluation of MRAR data quality was performed by collocation to AMDAR and radiosonde reference dataset and an idea of temporal smoothing was presented.

The case studies presented in this paper were inspired by impact studies executed by Strajnar et al. (2015) which revealed considerable potential on improvement of numerical weather prediction.

Several authors focused on studying differences between statistical parameters of measurements considering the source of data. A method of establishing a whitelist of reliably reporting aircrafts showed significant dependence of quality of measurements on aircraft type (Trojáková et al., 2015; Strajnar et al., 2015).

Following the literature on this topic, there is general agreement on beneficial impact of Mode-S data on numerical weather prediction which was the motivation to initiate work on Mode-S data at SHMU.

This paper describes the Mode-S data acquisition, processing and experimental assimilation with the AROME/SHMU numerical weather prediction system. The first section presents the measurements available from the aircraft data. The three dimensional variational data assimilation and the AROME/SHMU model setup are outlined

in Section 2. Subsequently the statistical analysis of the Mode-S data is explained and the trimming criteria for reliable aircraft selection are proposed. This is followed by the results of performed experiments in Section 4. Finally the conclusions and future plans are given.

1 AIRCRAFT MEASUREMENTS

The variety of observation types available in the world has been increasing over the past years. Originally, all the meteorological information from aircrafts was reported by pilots through radio communication. Nowadays, the process is highly automated. Distribution and processing of meteorological data from aircrafts are covered in a variety of programmes.

A certified programme operating worldwide since the 1970s (Painting, 2003) is the AMDAR system. The AMDAR system consists of hardware and software developed for meteorological measurements to be taken on board of aircrafts. As the equipment is costly, only large airline companies are involved. The data obtained from the AMDAR system is reported by radio link to ground and further distributed to meteorological services. It has been proved that the AMDAR data are high enough quality and by now are used as a reference for other aircraft data examinations. AMDAR reports usually contain data on current time and position of the aircraft, on measured air temperature, wind speed and wind direction and seldom on humidity and icing.

A new possibility to obtain meteorological data from aircraft was explored by KNMI (Royal Netherlands Meteorological Institute) about 10 years ago. The experts from KNMI found a way to derive meteorological information from navigational data from aircrafts. The Mode-S data (S stands for selective mode) are navigational data containing mainly position and parameters describing movement. There exist two types of Mode-S data, EHS (Enhanced Surveillance) and MRAR (Meteorological Routine Air Report). Both types of Mode-S are communicated from airborne equipment to ground tracking and ranging radars by automated radio link. The radar queries the avionics on a specified communication frequency. Updated reports are sent every few seconds. The ground radar has to be adjusted to be able to receive MRAR reports unlike EHS.

The EHS raw data does not contain any meteorological information. The air temperature can be derived from Mach number and true airspeed. The wind vector (speed, direction) can be derived as a vector difference from ground speed, true track angle, true airspeed and heading. Further details on derivation practise are explained in De Haan, 2009. In case of MRAR data, direct meteorological measurements of air temperature, wind speed and wind direction can be gained.

The first overall study on Mode-S data quality was performed by EUMETNET expert team in 2015 (EUMETNET, 2015). The results show that direct MRAR measurement reached higher accuracy than derived EHS. At the same time, the EHS are much more easily accessible because no additional ground radar settings compared to MRAR are necessary and the meteorological information is derived from mandatory data. Besides, the EHS data can be obtained from a large amount of commercial aircrafts due to the EU regulation which require Mode-S EHS compatibility for aircrafts with maximum take-off mass exceeding 5 700 kg or maximum true airspeed capability greater than 250 knots (EUMETNET, 2015).

Similar results have been confirmed also by studies elaborated in Slovenia (Strajnar, 2012) and the Czech Republic (Trojáková et al., 2015).

2 METHODOLOGY

Data assimilation and model parameters

A numerical weather forecast is a product of a complex process including meteorological data assimilation. The role of the data assimilation is to provide the best possible estimation of the current state of the atmospheric and surface parameters based on the observations. This serves as the initial conditions for the integration of the atmospheric model. In the ALADIN NWP system the most used method for upper air parameters is the three dimensional variational data assimilation (3D-Var, Bouttier and Courtier, 1999). It computes the analysis as such a state of model variables that minimizes the distance from the observations and the model background. The background state is typically a short (6 h) model forecast. Conventional in-situ observations (SYNOP, TEMP, aircraft data) can be utilized as well as the remote measurements from satellites or radar in 3D-Var.

In the presented study the AROME/SHMU system that is experimentally exploited at Slovak Hydrometeorological Institute (Derková et al., 2017) has been used. AROME is a spectral non-hydrostatic high resolution limited area numerical weather prediction model (Seity et al., 2011), that is a specific configuration of the ALADIN NWP system (Termonia et al., 2018) adjusted to resolve the convective scale phenomena. Physically meaningful model 3D prognostic variables are: 2 components of the horizontal wind (U and V), temperature T, specific content of water vapor, rain, snow, graupel, cloud droplets, ice crystals, turbulent kinetic energy TKE, and two NH variables that are related to pressure and vertical momentum (Seity et al., 2011). AROME/SHMU computational domain covers Slovakia and its neighborhood, with a total area of 1024 km x 768 km. Its horizontal resolution is 2.0 km. Vertically there are 73 unevenly distributed levels, with most of the levels located in the lower troposphere where the small scale phenomena occur. AROME/SHMU is coupled to the ALADIN/SHMU system (4.5 km/L63) with hourly coupling frequency. AROME/SHMU is regularly run in so-called downscaling mode. It means the initial (as well as the lateral boundary) conditions are provided by the interpolation of the data from the driving model ALADIN/SHMU.

Data description

First investigations of Mode-S data at the Slovak Hydrometeorological Institute began in 2018, when a data sample of Mode-S was provided to SHMU from LPS SR (Air Traffic Services of Slovak Republic). The sample contained 2-month (Jan – Feb 2018) measurements of EHS data received by radars Malý Javorník and Mošník, located in Slovakia. The MRAR data from the sample were received by radar in Vienna, located in Austria and radar Buchtův kopec, located in Czech Republic. At the same time, a 2-month sample of AMDAR data (provided from OPLACE (Trojáková et al., 2019)) by the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI) was taken as reference and all Mode-S statistics were compared to AMDAR results. The location of four radars from which the Mode-S data were processed is shown in Fig. 1 (*maps.google.com*). The processed dataset is quantified in Tab. 1.

Figure 1. The locations of tracking and ranging radars receiving Mode-S data.

Table 1. Number of measurements and aircrafts depending on receiving radar and data type.

Radar	Data type	No. of measurements	No. of aircrafts
Malý Javorník (JAVOR)	EHS	9 898 618	8 428
Mošník (MOSNIK)	EHS	4 752 200	7 110
Buchtův kopec (BUKOP)	MRAR	1 837 475	530
Vienna (VIENNA)	MRAR	95 758	401
	AMDAR	215 577	1 807

The number of MRAR data in the studied dataset is significantly lower than the number of EHS data because of additional settings needed to obtain MRAR data. The ground radar has to be adjusted to receive MRAR messages and Mode-S transponder has to be configured to respond to the request from the non-mandatory MRAR register to provide direct meteorological measurements. The amount of measurements of both types has diurnal variability corresponding to air traffic, which is minor at night.

3 STATISTICAL ANALYSIS

Assimilation of any observation type consists of several steps, where the first one is the quality control. The attention was initially focused on gross error check and selection of reliable measurements. The 2-month sample of raw data has been quality controlled by the means of the statistical analysis as an initial step in the processing chain. While the preprocessing and quality control was performed locally in this study, several European meteorological centres utilize Mode-S data formerly processed by KNMI, e.g. data from MUAC (Maastricht Upper Area Control Centre).

Observation minus first guess (OMG) is a usual method for quality control of new observation types. It was exploited by the studies on Mode-S data (Strajnar, 2012) or (De Haan, 2009) as well. OMG were calculated and these were statistically analysed. To calculate the OMG departures the model variables were interpolated to observation locations and only then the values were subtracted. The 6-hours forecasts of the AROME/SHMU model were used as the first guess.

The very first results led to a truncation of raw data to eliminate gross errors. The dataset was trimmed according to the truncation criteria listed in Tab. 2. Moreover, the results were trimmed for $<-2\sigma;2\sigma>$ interval from the selected dataset. A similar approach was adopted by (Trojáková et al., 2015). Further in the text, the dataset truncated for gross errors and "2σ criterion" is referred to as the gross error checked dataset. To further improve the statistical properties of the processed data, a whitelist of reliable aircrafts was created. Each measurement is identified by its source marked by ICAO address - a unique aircraft identifier. The thresholds listed in Tab. 2 were defined according to the general statistics and inspired from (Trojáková et al., 2015). All measurements were distributed into separate datasets for each aircraft. Only measurements from aircrafts fulfilling the quality criteria from the Tab. 2 were taken into account to create the whitelist. The statistics comparing the gross error checked and whitelisted data are presented further in this paper.

Table 2. Truncation and whitelisting criteria.

	Truncation criteria (statistical thresholds)		Whitelisting criteria		
			No. of OBS	mean value	σ
Temperature	± 10 K	2σ	1000	1 K	2 K
Wind speed	± 20 m/s	2σ	1000	1 m/s	5 m/s
Wind direction	± 45 deg	2σ	1000	10 deg	100 deg

Both Mode-S EHS and Mode-S MRAR data were statistically analysed and compared to the reference sample of AMDAR data (AMDAR statistics are not shown here, since the AMDAR data are considered a reliable reference). The results of the general statistics compared to statistical characteristics after applying the whitelist showed improvement as plotted in Fig. 2 – 6.

Figure 2. Distribution of MRAR temperature OMG for gross error checked (white) and whitelisted (blue) data. Blue vertical lines represent the whitelisting threshold.

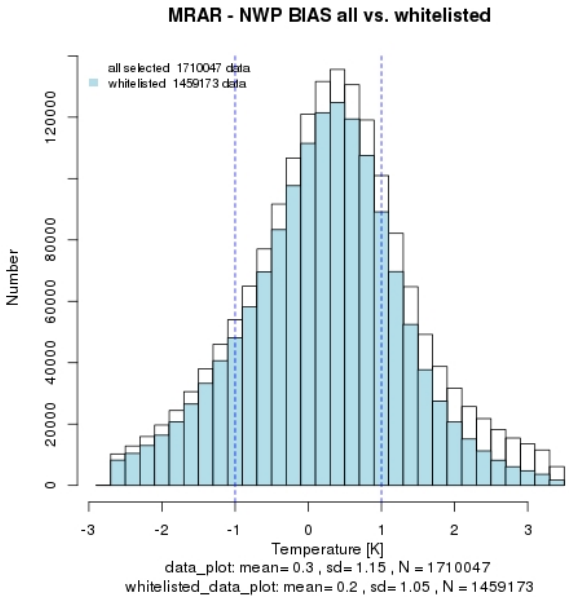
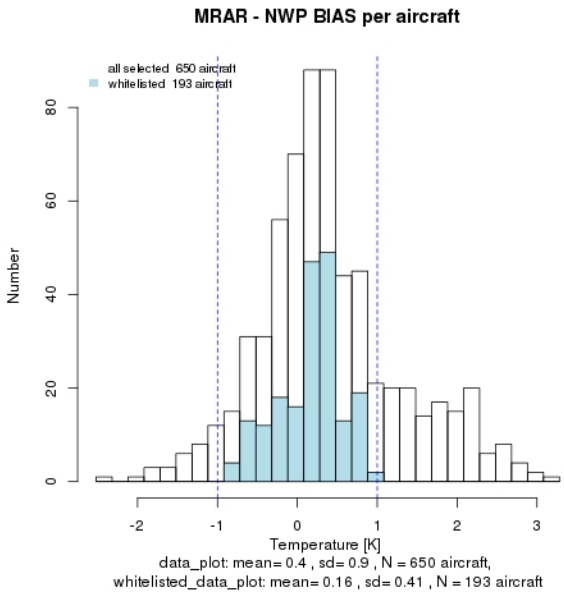


Figure 3. Distribution of MRAR temperature OMG departures for gross error checked (white) and whitelisted (blue) data computed per aircraft. Blue vertical lines represent the whitelisting threshold.



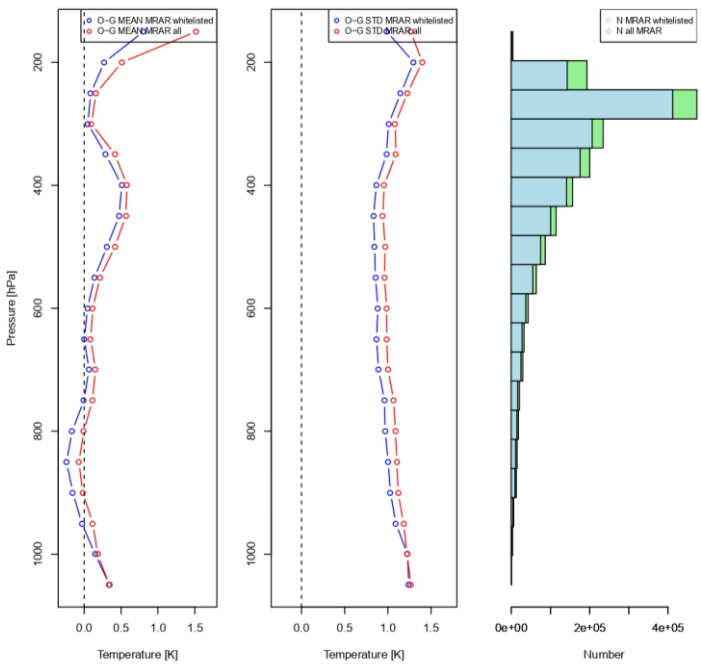
The histogram computed for all MRAR temperature measurements in Fig. 2 shows the comparison of gross error checked data (white) and whitelisted data (blue). The distribution after the whitelist is still slightly positively asymmetric which can be explained by a certain number of positively biased reporting aircrafts. The number of measurements remained in the data set after the whitelist represents ~85% of all gross error checked data.

The MRAR temperature statistics were the closest to AMDAR reference results (not shown) and reached lowest σ (standard deviation) and mean value closest to zero. The histogram computed per aircraft in Fig. 3 depicts the distribution of gross error checked data (white) and whitelisted data (blue). The whitelist led to a large improvement in standard deviation (σ) and also in shift of mean value to zero. It is important to notice that the number of aircrafts that passed through the whitelisting criteria represents only ~30% of aircrafts in the gross error checked dataset. The big difference of the relative amounts of whitelisted measurements and whitelisted aircrafts indicate either a huge number of aircrafts reporting biased data or a huge number of aircrafts providing only a small amount of measurement in the 2-month studied period.

The positive impact of whitelisting on MRAR temperature data is confirmed also by plotting the vertical profile of OMG departures before (red) and after whitelisting (blue) depicted in Fig. 4. The left panel shows the mean value, the middle panel reflects the standard deviation. Both of them present quite consistent statistics along the whole profile. The whitelist lowered the bias.

The right panel depicts the distribution of the number of measurements with pressure. All gross error checked data (green) in the barplot are compared to whitelisted data (blue). It is obvious that most measurements are taken at the level between 10 – 12 km, where most aircrafts fly and this is also where the decrement of measurements due to whitelisting is mostly notable.

Figure 4. Distribution of MRAR temperature mean value, standard deviation and number of measurements per vertical level.



Following example comparing the wind speed statistics indicates higher quality of MRAR in Fig. 5 compared to EHS data in Fig. 6. Both histograms are plotted for all measurements after the gross error check (white) and after the whitelisting (blue). The mean value for MRAR and EHS datasets improved after whitelisting but the standard deviation was not affected significantly. It is evident that the initial statistical characteristics for MRAR data were more accurate than for EHS data. These results correspond to similar findings in EUMETNET, 2015. It is interesting to observe that the whitelist removed approximately 47% of EHS data but only 17% of MRAR data.

Figure 5. Distribution of MRAR wind speed OMG for gross error checked (white) and whitelisted (blue) data. Blue vertical lines represent the whitelisting threshold.

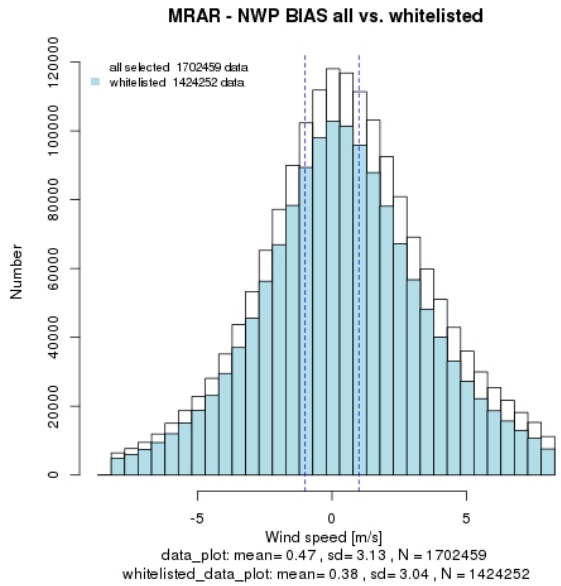
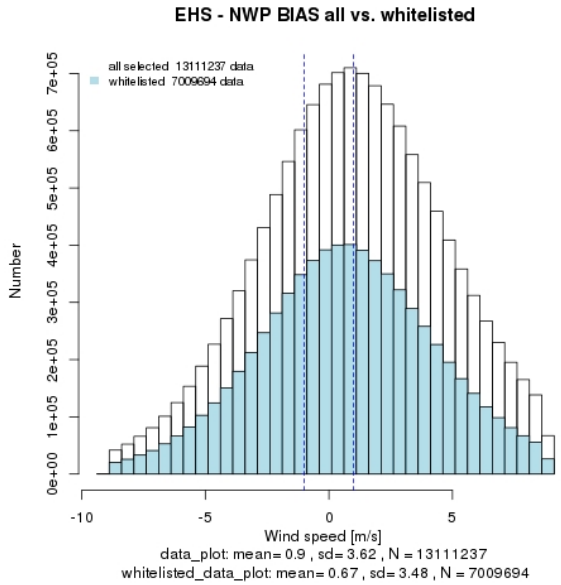


Figure 6. Distribution of EHS wind speed OMG for gross error checked (white) and whitelisted (blue) data. Blue vertical lines represent the whitelisting threshold.



Results presented in this section demonstrated positive impact of truncation approach optimized by creation of the whitelist of reliable aircrafts. Also, the statistical properties mainly of the processed MRAR data sets are comparable with AMDAR data considered a reference what concerns their quality and reliability (not shown). Therefore, the studied data were considered suitable for further tests in numerical weather prediction data assimilation experiments.

4 DATA ASSIMILATION EXPERIMENTS WITH MODE-S DATA

After the quality control of the Mode-S data, several experiments have been conducted to incorporate them into the three-dimensional variational data assimilation of the AROME/SHMU model. The aim was to assess their impact and potential benefit on the analyses and the forecasts. Although only a limited amount of data over the 2-months period was available, both long term assimilation cycle and the case studies were evaluated.

Case study - cold front passage

The general statistics revealed higher quality of MRAR data compared to EHS therefore MRAR data were exploited for the case study of cold front passage over Slovakia in the afternoon on the 2nd of February 2018.

The purpose of this experiment was to evaluate whether any improvement of the forecast of experimental high resolution model AROME/SHMU can be gained when Mode-S MRAR data were assimilated on top of conventional observations (SYNOP, TEMP, AMDAR).

Two parallel data assimilation cycles were run for three days: one with the conventional data only, the second one with added MRAR measurements. Then, two forecasts starting on 2018-02-02 at 12 UTC were computed with initial conditions prepared by those assimilation experiments.

A comparison between two data setups was performed to distinguish the impact of Mode-S MRAR data assimilation into AROME/SHMU model from the influence of other data types. Then, the forecast with Mode-S MRAR data was confronted with the INCA system. INCA is an analysis and nowcasting system (Wang et al., 2017) implemented at SHMU. INCA precipitation analysis (Meri et al., 2018) based on the combination of the radar and precipitation rain gauge measurements represents the best possible estimation of the observed precipitation amounts.

The forecast of 3-hour accumulated precipitation from the AROME/SHMU model without MRAR is displayed in Fig. 7. The forecast without MRAR data reflects the coverage over western Slovakia but differs from the INCA output depicted in Fig. 8b. The maximum of precipitation is more spread and shifted with respect to INCA analysis. Fig. 8a shows 3-hour accumulated precipitation valid for 2018-02-02 at 18 UTC. The map represents the 6h AROME/SHMU forecast with MRAR data starting at 2018-02-02 at 12 UTC. The reference map comes from INCA analysis valid for the same hour which represents the observations.

Figure 7. Forecasted 3-hour accumulated precipitation total [mm] over Slovakia valid for 2018-02-02 at 18 UTC. Output from AROME/SHMU without MRAR data.

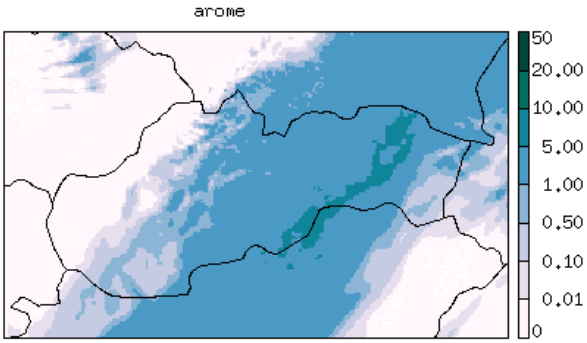
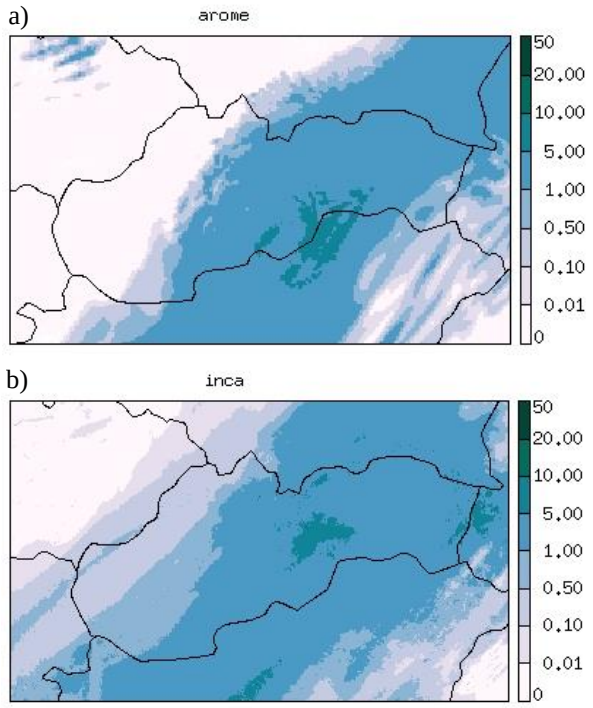


Figure 8. Forecasted 3-hour accumulated precipitation total [mm] over Slovakia valid for 2018-02-02 at 18 UTC.
a) Output from AROME/SHMU with MRAR data;
b) output from INCA analysis.

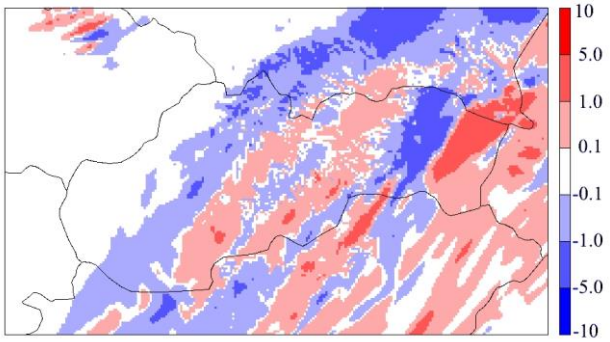


The precipitation amounts from the cold front over eastern Slovakia were captured by AROME/SHMU with MRAR in the rainfall totals during the front passage. (Other time steps are not shown here, but they were analysed.) Some differences are noticeable between AROME/SHMU with MRAR and INCA in spatial distribution of precipitation. The precipitation band from AROME/SHMU with MRAR is thinner and the maximum is concentrated and shifted southerly.

Fig. 9 shows the differences of 3-hour accumulated precipitation from forecast when assimilated conventional SYNOP, TEMP and AMDAR data with and without MRAR data. The map of differences shows that the precipitations were redistributed, mostly in the correct direction.

Moreover, the false precipitation maxima in north-east Slovakia in the forecast with MRAR data is reduced, and the non-existing precipitation in eastern Hungary removed. However, the light precipitation in the western Slovakia was missed.

Figure 9. Distribution of precipitation totals differences [mm] between forecast with MRAR data and forecast without MRAR data computed from AROME/SHMU valid for 2018-02-02 at 18 UTC.



Case study - inversion layer

The case study presented in this section shows how the inversion layer occurrence is captured by AROME/SHMU model using Mode-S data. The experiment was performed exploiting not only MRAR data (as in the cold front case study) but also EHS data and both after applying whitelist. All Mode-S data were assimilated into AROME/SHMU on the top of other conventional SYNOP, TEMP and AMDAR data. The AROME/SHMU model forecast without Mode-S data was also computed for control.

A vertical profile of temperature in Prostejov (Czech Republic) was plotted (Fig. 10) from the AROME/SHMU with Mode-S data forecast valid for 2018-01-25 at 12 UTC. The model output can be compared to the reference sounding from Prostejov in Fig. 11 taken on 2018-01-25 a 12 UTC. The Stuve diagram from Prostejov was retrieved from webpage of University of Wyoming *(http://weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=europe&TYPE=GIF%3 ASTUVE &YEAR=2018&MONTH=01&FROM=0100&TO =3112&STNM=11747)*. The second reference is the AROME/SHMU forecast without Mode-S plotted in Fig. 12.

The occurrence of temperature inversion was captured in both forecasts, AROME/SHMU with (Fig. 10) and without (Fig. 12) Mode-S data assimilation though the inversion layer is overestimated in both forecasts. Some differences are observed in the shape of the dew point temperature line.

Limited improvements in the forecasted temperature and dew point temperature profile of the experiments that used the Mode-S data with respect to the real measurements (represented by the Prostejov sounding in Fig. 11) can be identified and are enumerated as follows.

Figure 10. Pseudo TEMP profile from Prostejov valid for 2018-01-25 at 12 UTC computed as a 6-hour forecast from AROME/SHMU model with Mode-S assimilation.

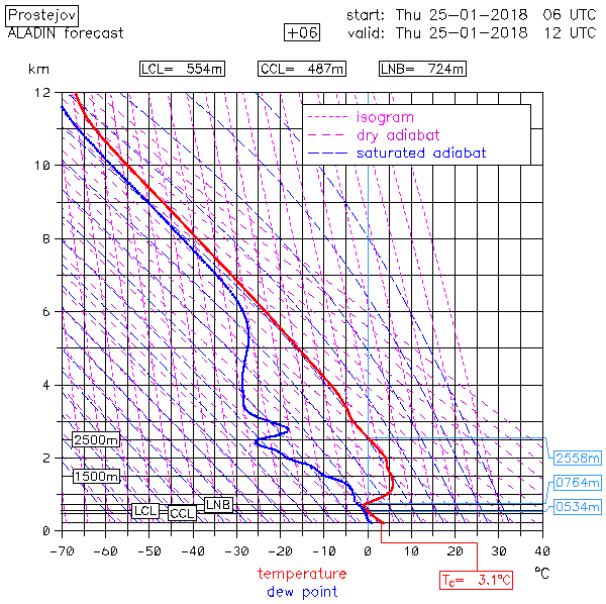
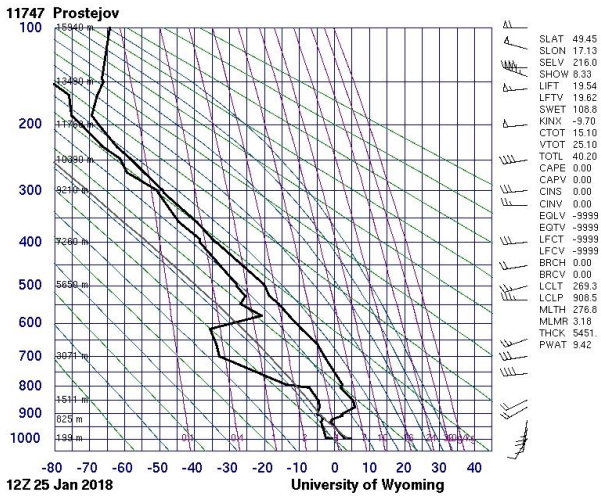


Figure 11. Stuve diagram from Prostejov valid for 2018-01-25 at 12UTC.

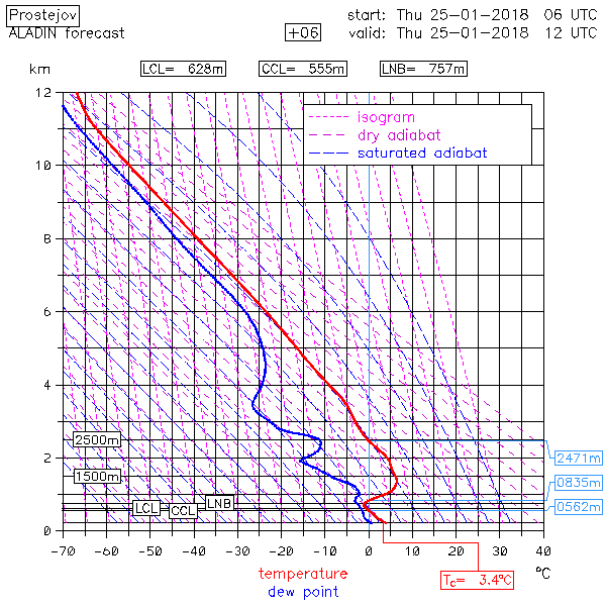


The temperature of a warm layer between 1000 and 1500 m exceeding 5° C is slightly decreased in the forecast with Mode-S, that corresponds better to the real measurements in the warm layer between 1000 and 1500 m.

The shape of the curve reflecting the Td decrement with height has a more realistic shape between 1500 and 3000 m for the experiment with Mode-S data, although the unrealistic oscillation around 2500 – 3000 m is still present.

The local minimum dew point temperature values are reaching –35° C isoline around 3 – 4 km in the sounding and are only slightly below –25° C in experiment without Mode-S, whilst they are close to –30° C in the one with Mode-S along a wider layer. Also the whole dry air stratum is thicker here, although its thickness is clearly overestimated.

Figure 12. Pseudo TEMP profile from Prostejov valid for 2018-01-25 at 12 UTC computed as a 6-hour forecast from AROME/SHMU model without Mode-S assimilation.



It was illustrated that the utilization of Mode-S data positively influences the description of the thermosdynamic state of the atmosphere. Despite that, more experiments, validation and tunings of the data assimilation setup parameters are necessary to reach its optimal performance.

Degrees of freedom for signal

The degrees of freedom for signal (DFS, Chapnik et al., 2006) is a method to validate the impact of every observation type when various kinds of data are assimilated. The method is based on comparison of analyses computed from perturbed and unperturbed initial conditions. The resultant statistics show the absolute and relative impact of observation type or variable on the analyses.

The analysed data cover the period of January and February 2018. In this study, the DFS statistics were divided into 4 similar experiments. Each one was computed for different synoptic hours (00, 06, 12, 18, UTC) over the whole 2-month period. Only SYNOP, TEMP, AMDAR and Mode-S data were studied. Mode-S EHS and Mode-S MRAR are merged into one category. The outcomes are plotted in Fig. 13.

The high absolute DFS for aircraft data is caused by the huge amounts of data compared to other data types. The diurnal variability of absolute DFS is obvious in TEMP and also aircraft measurements because radiosondes are launched usually only twice a day (at 12 and 00 UTC). Aircraft data amounts are strongly dependent on air traffic which is lower at night.

The diurnal variability is present also in relative DFS, although is less significant. The relative impact of AMDAR wind and temperature measurements is comparable to SYNOP wind and temperature measurements. Mode-S

wind and temperature relative impact is a bit lower than for AMDAR. The results correspond to the statistical analysis from Section 3 (Statistical analysis) which revealed that correction or whitelist is necessary particularly for Mode-S EHS. Based on this hypothesis it is possible to assume that MRAR measurements relative impact would be higher than EHS measurements impact. But this experiment was not performed yet. Also, low relative DFS despite high absolute DFS of Mode-S data suggests that Mode-S data could be significantly thinned to save the processing time and computer power whilst maintaining the quality of the analysis.

Besides, according to relative DFS any measurements containing specific humidity seem to be very impactful. Similar results were obtained also in a study carried out at OMSZ (Szintai, 2020). It is important to remark that only SYNOP and TEMP measurements in the studied data sample contained humidity.

Figure 13. Absolute and relative DFS statistics for Jan-Feb 2018.

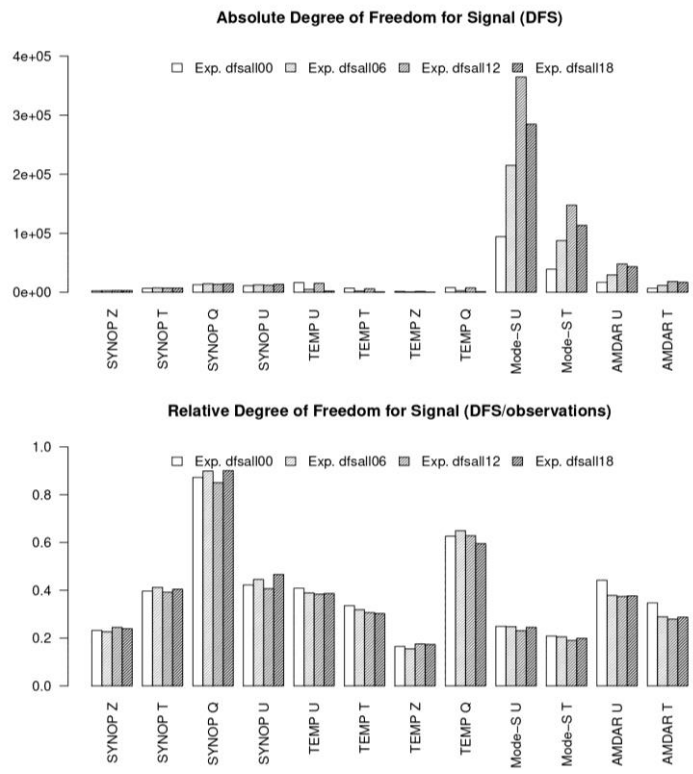
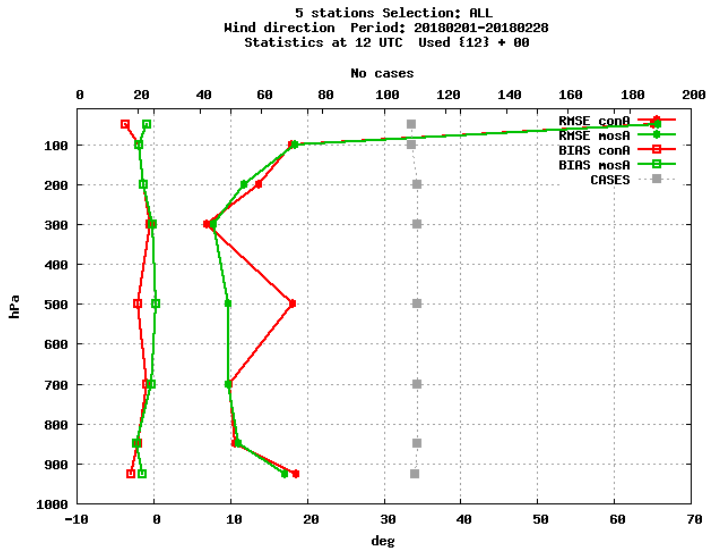


Figure 14. Observation minus analysis statistics for wind direction vertical profile over February 2018 at 12 UTC. Bias and RMSE for the dataset without Mode-S (red) and with Mode-S (green).



Verification of Mode-S data impact

Apart from statistical analysis which reveals the statistical characteristics of the dataset itself, in this section a verification of model outputs when Mode-S data were assimilated was confronted to the observations dataset composed from SYNOP and TEMP only.

The method is based on an interpolation method applied to obtain the values of model variables in the observation locations. The experiment consists of two parts, first when first guesses and analyses without Mode-S are compared to the observations dataset, second when Mode-S data are included. The differences of model variables and observation values were then statistically analysed over the 2-month period.

The plot depicted in Fig. 14 shows that the analysis with Mode-S data is more accurate in terms of wind direction along the whole vertical profile than the analysis without Mode-S data. In this case the statistics were computed over February 2018. Positive impact of the Mode-S data around the 500 hPa level reflects the distribution of vertical levels in the AROME/SHMU setup. This was initially designed to improve the small scale near surface processes in the planetary boundary layer. Therefore, not so many levels are located in the higher parts of the atmosphere. More observations in this part of the atmosphere help to reflect the actual state more realistically.

The verification was also applied on temperature and geopotential first guesses along the vertical profile during the 2-month period. The impact there was negligible. The deterioration was observed on relative and specific humidity profiles, which can be explained by the lack of humidity measurement in Mode-S data.

Verification scores for screen level parameters (not shown) were neutral, no deterioration was noticed.

The experiments presented in this section were focused on verification of first guesses and analyses but the long term overall verification of the model forecasts based on Mode-S data assimilation has not been performed yet.

CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

A benefit of Mode-S data exploitation for the numerical weather prediction at the Slovak Hydrometeorological Institute was explored as it is summarized in the presented article. A 2-months dataset from four radars was examined for its quality using statistical approach. Afterwards the Mode-S data were applied in the data assimilation studies using the experimental convection-permitting numerical weather prediction system AROME/SHMU.

The statistical analysis of raw dataset indicated a strong need to eliminate gross error affected data. The method of truncation by thresholds and "2σ criterion" was opted for. Further processing was inspired by Czech study of (Trojáková et al., 2015) to create a whitelist of aircrafts reporting only reliable data. The whitelist method turned out beneficial.

Mode-S data were assimilated into the AROME/SHMU experimental model to simulate ordinary usage of observations. The studied cases of cold front passage and inversion layer incidence revealed satisfactory outcomes and proved significant impact of Mode-S data on the forecast.

The impact analysis was studied in degrees of freedom for signal experiment likewise. Mode-S data affected the analysis in a slightly lower measure than the AMDAR data, though the effect is promising. Concurrently, the humidity measurements appeared to be very important and a wider availability of humidity measurements in AMDAR or Mode-S MRAR data would be certainly beneficial.

In addition the verification with respect to reference observations was performed. In general, the OMG statistics showed similar quality of first guesses with and without Mode-S data. The observation minus analysis statistics especially for wind direction statistics along the whole vertical profile showed improvement in the analysis accuracy thanks to Mode-S data.

The results of several experiments presented in this paper are in accordance with the outcomes from other studies cited here. Therefore, it is a promising first step to future operational usage of Mode-S data at SHMU.

The experiments presented in this paper indicate a considerable impact of Mode-S data. These results are in accordance with the European initiative to extend the usage of aircraft data as a powerful source of meteorological information potentially useful in NWP.

At present, an ongoing effort is exerted at SHMU to achieve regular acquisition of Mode-S data to be able to process them and prepare for future operational usage. Also, further experiments are limited by the available computer power resources (status March 2020).

Acknowledgements

The authors would like to thank the Air Traffic Services of Slovak Republic for the provision of the Mode-S data, namely Stanislav Hrušovský for the initial processing. The valuable advice and practical help of RC LACE colleagues Alena Trojáková (The Czech Hydrometeorological Institute) and Benedikt Strajnar (Slovenian Environment Agency) are acknowledged. Part of the work was carried out within the research stay of the first author at CHMI, Prague, financially supported by RC LACE (*www.rclace.eu*).

REFERENCES

Bouttier, F.–Courtier, P., 1999, Data assimilation concepts and methods, Meteorological Training Course Lecture Series. URL: https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2002/16928-data-assimilation-concepts-and-methods.pdf.

Chapnik, B.–Desroziers, G.– Rabier, F.–Talagrand, O., 2006, Diagnosis and tuning of observational error in a quasi-operational data assimilation setting. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 132. 543 – 565. 10.1256/qj.04.102.

De Haan, S., 2009, Quality assessment of high resolution wind and temperature observations from Mode-S. KNMI Scientific report, DeBilt, The Netherlands [Retrieved 1 May 2019 from https://www.researchgate.net/publication/239592823_Quality_assessment_of_high_resolution_wind_and_temperature_observation_from_ModeS]

De Haan, S.–Stoffelen, A., 2012, Assimilation of High-Resolution Mode-S Wind and Temperature Observations in a Regional NWP Model for Nowcasting Applications. Weather and Forecasting, Vol. 27, 918 – 937 American Meteorological Society DOI: 10.1175/WAF-D-11-00088.1

Derková, M.–Vivoda, J.–Belluš, M.–Španiel, O.–Dian, M.–Neštiak, M.–Zehnal, R., 2017, Recent improvements in the ALADIN/SHMU operational system. Meteorological Journal, Vol. 20, No. 2, 45 – 52.

EUMETNET, 2015, EUMETNET Aircraft Derived Data Feasibility Study Expert Team. GIE EUMETNET, c/o L'Institut Royal Météorologique de Belgique [Retrieved 1 May 2019 from http://mode-s.knmi.nl/documents/EUMETNET_ADD_Report_FINAL_v1.0_03102015.pdf]

Méri, L.–Jurašek, M.–Kaňák, J.–Okoň, L., 2018. Quality-based radar data processing and QPE at the Slovak Hydrometeorological Institute. The 10th European Conference on Radar in Meteorology & Hydrology ERAD 2018, July 2018, Ede-Wageningen, The Netherlands. DOI: 10.18174/454537 [Retrieved 25 March 2020 from https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/454537]

Painting J.D., 2003, Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) Reference Manual. Technical report WMO-No.958, WMO, Geneva, Switzerland ISBN 92-63-10958-3

Seity, Y.–Brousseau, P.–Malardel, S.–Hello, G.–Ḿenard, P., 2011, The AROME-France convective-scale operational model. Monthly Weather Review, 139, 976 – 991.

Strajnar, B., 2012, Validation of Mode-S meteorological routine air report aircraft observations. Jour. of Geophysical Research, vol.117, D23110 DOI:10.1029/2012JD018315.

Strajnar, B.–Žagar, N.–Berre, L., 2015, Impact of new aircraft observations Mode-S MRAR in a mesoscale NWP model, J. Geophys. Res. Atmos., 120, 3920 – 3938, doi:10.1002/2014JD022654.

Szintai, B., 2020, Experience of using AMDAR-humidity in limited area models. [Presentation] Aircraft based observations workshop at ECMWF, Reading, UK [Retrieved 16 March 2020 from https://events.ecmwf.int/event/168/contributions/1210/].

Termonia, P.–Fischer, C.–Bazile, E.–Bouyssel, F.–Brožková, R.–Bénard, P.–Bochenek, B.–Degrauwe, D.–Derková, M.–El Khatib, R.–Hamdi, R.–Mašek, J.–Pottier, P.–Pristov, N.–Seity, Y.–Smolíková, P.–Španiel, O.–Tudor,

M.–Wang, Y.–Wittmann, C.–Joly, A., 2018, The ALADIN System and its Canonical Model Configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1. Geosci. Model Dev., Vol 11, 257 – 281. https://doi.org/10.5194/gmd-11-257-2018.

Trojáková, A.–Benáček, P.–Brožková, R.– Bučánek, A., 2015, Assimilation of Mode-S observations in ALADIN/CHMI. [Retrieved 1 May 2019 from http://www.rclace.eu/?page=11].

Trojáková, A.–Mile, M.–Tudor, M., 2019, Observation Preprocessing System for RC LACE (OPLACE), Adv. Sci. Res., 16, 223 – 228, https://doi.org/10.5194/asr-16-223 - 2019.

Wang, Y.–Meirold-Mautner, I.–Kann, A.–Sajn Slak, A.–Simon, A.–Vivoda, J.–Bica, B.–Bocskor E.–Brezkova, L.–Dantinger, J.–Giszterowitz, M.–Heizler, G.–Iwanski, R.–Jachs, S.–Bernard, T.–Krsmanc, R.–Merse, J.–Micheletti, S.–Schmid, F.–Steininger, M.–Haiden, T.–Regec, A.–Buzzi, M.–Derkova, M.–Kozaric, T.–Qiu, X.–Reyniers, M.–Yang, J.–Huang, Y.–Vadislavsky, E., 2017, Integrating nowcasting with crisis management and risk prevention in a transnational and interdisciplinary framework. Meteorologische Zeitschrift Vol. 26, No. 5 (2017), 459 – 473.

NOVÝ REGIONÁLNY ANSÁMBLOVÝ SYSTÉM S VYSOKÝM ROZLÍŠENÍM: A-LAEF

MARTIN BELLUŠ

Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15, Bratislava, Odbor Numerické predpovedné modely a metódy, martin.bellus@shmu.sk

New high resolution ensemble forecasting system A-LAEF is being introduced. It has been developed within the Regional Cooperation for numerical weather modelling on Limited Area in Central Europe (RC LACE). A-LAEF system involves its own uncertainty simulation of the initial surface and atmospheric conditions, and the model physics. It also inherits the perturbations on lateral boundaries from the global driving ensemble system ECMWF ENS. New A-LAEF system aims for reliable probabilistic forecasts up to 3 days and within that time range it outperforms the driving ECMWF ENS model. The above mentioned is demonstrated by the comparison of statistical verification scores of A-LAEF and downscaled ECMWF ENS forecasts. The added value and quality of A-LAEF probabilistic forecasts is going to be illustrated on some high impact weather situations as well.

Predstavujeme nový ansámblový predpovedný systém A-LAEF s vysokým rozlíšením. Bol vyvinutý v rámci regionálnej spolupráce pre numerické modelovanie počasia na ohraničenej oblasti v strednej Európe (RC LACE). Systém A-LAEF má svoju vlastnú simuláciu neurčitosti počiatočných povrchových a atmosférických podmienok a fyziky modelu. Taktiež preberá perturbácie na okrajoch integračnej domény z globálneho ansámblového systému ECMWF ENS. Nový systém A-LAEF sa zameriava na spoľahlivú pravdepodobnostnú predpoveď do 3 dní a v tomto časovom rozsahu predčí svoj riadiaci model ECMWF ENS. Táto skutočnosť je demonštrovaná porovnaním verifikačných štatistických skóre predpovedí A-LAEF a downscalovaných predpovedí ECMWF ENS. Užitočnosť a kvalita pravdepodobnostných predpovedí A-LAEF je ilustrovaná aj na niekoľkých prípadových štúdiách s extrémnym počasím.

Key words: ensemble, numerical weather prediction, uncertainty simulation, A-LAEF

1 ÚVOD

V rámci regionálnej spolupráce pre numerické modelovanie na ohraničenej oblasti v strednej Európe (RC LACE, Wang a kol., 2017) bol vyvinutý nový ansámblový predpovedný systém s vysokým rozlíšením ALARO - Limited Area Ensemble Forecasting (A-LAEF). Tento systém je zameraný na ansámblovú predpoveď do troch dní. Jeho hlavným cieľom je poskytovať pravdepodobnostnú predpoveď s vysokým rozlíšením pre národné meteorologické služby partnerov RC LACE (Česká republika, Chorvátsko, Maďarsko, Poľsko, Rakúsko, Rumunsko, Slovensko a Slovinsko). A-LAEF je od augusta 2019 v operatívnej prevádzke na výpočtovom klastri v Európskom centre pre strednodobú predpoveď počasia (ECMWF), pretože žiadny z RC LACE partnerov nemá na takýto rozsiahly systém dostatočne výkonný superpočítač. Výstupy z A-LAEF systému okrem bežnej prevádzky v Centre predpovedí a výstrah na SHMÚ (CPV) nájdu svoje uplatnenie aj v nadväzujúcich hydrologických, energetických a nowcastingových modeloch.

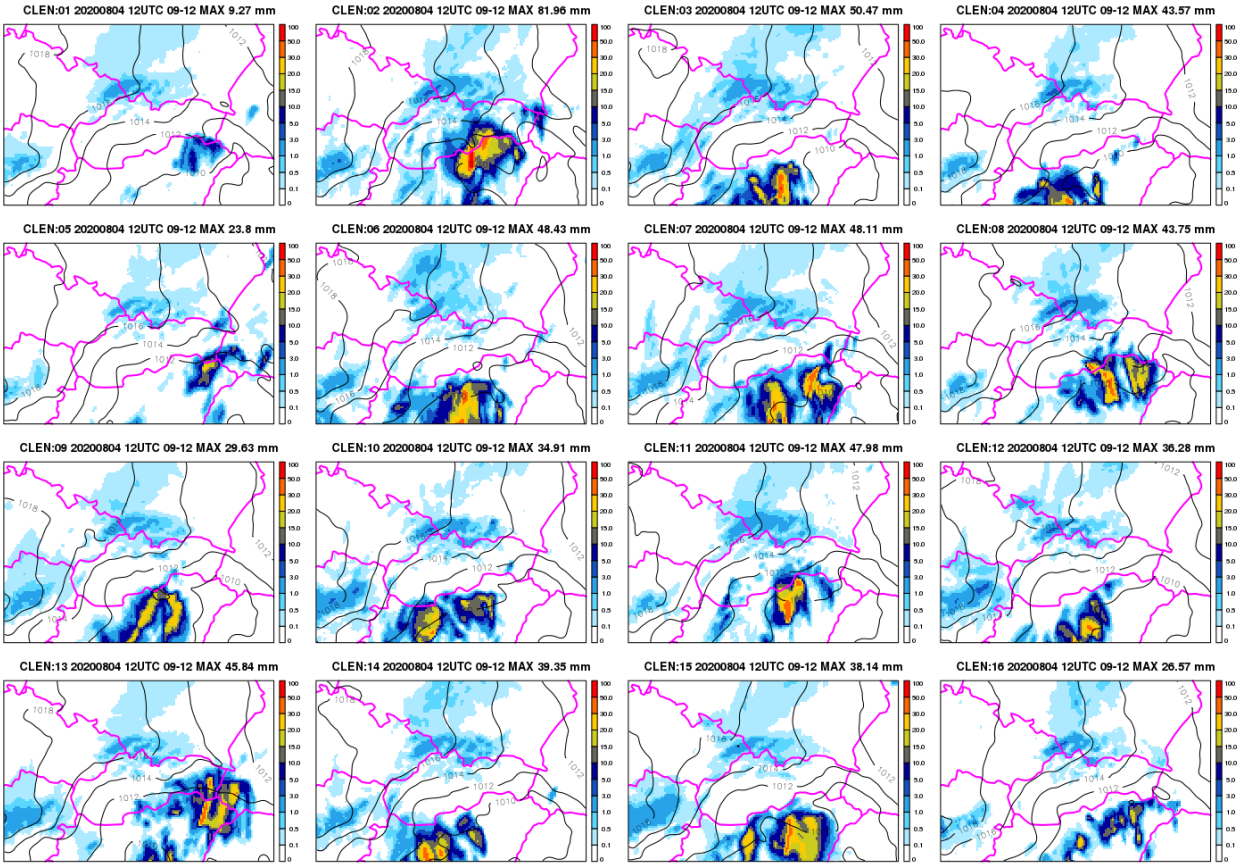
2 PREDIKTABILITA ATMOSFÉRY

Procesy v zemskej atmosfére a na zemskom povrchu sa síce riadia fyzikálnymi zákonmi, ale schopnosť tieto javy predpovedať je napriek tomu značne obmedzená. Je to dané predovšetkým tým, že dynamika atmosférických procesov je veľmi citlivá na počiatočné podmienky. Aj malá zmena počiatočného stavu dokáže niekedy vyvolať veľké zmeny na dlhších časových škálach (Lorenz, 1963 a 1972). Odborne tomu hovoríme prediktabilita. Názorná ukážka prediktability simulovanej ansámblovým systémom A-LAEF je demonštrovaná na Obr. 1. Žiadne dve predpovede zo 16-členného ansámbla nie sú úplne identické. Čím menšie a kratšie trvajúce javy sa snažíme predpovedať, tým väčšia neurčitosť v tom bude. Pri zvyšovaní priestorového rozlíšenia modelov sa preto v meteorológii stáva simulácia týchto neurčitostí čoraz dôležitejšou. Modely, ktoré s neurčitosťami pracujú, a teda nerobia čisto deterministické predpovede („bude presne takto a nijako inak“), sa nazývajú ansámblové systémy. Neurčitosť pritom nie je iba v počiatočnom stave atmosféry, ale aj v samotnom predpovednom modeli, keďže žiadny model nepopisuje realitu dokonale. V meteorológii sme navyše limitovaní aj dostupným výpočtovým výkonom, lebo predpoveď treba spočítať v reálnom čase. Preto niektoré procesy musia byť v modeli zjednodušené alebo empiricky popísané (parametrizované), z čoho samozrejme pramenia ďalšie neurčitosti.

V novom regionálnom ansámblovom systéme A-LAEF (Belluš a kol., 2019) používame rôzne sofistikované metódy na simuláciu takýchto neistôt v počiatočných podmienkach aj v numerickom modeli, zatiaľ čo neurčitosť na hraniciach výpočtovej oblasti je predpísaná globálnym ansámblom z ECMWF. Simuláciu neurčitosti robíme väčšinou aplikovaním tzv. perturbácií (malých zmien) oproti pôvodným hodnotám meteorologických prvkov tak, aby boli zmysluplne zachované ich fyzikálne vlastnosti určené

Obrázok 1. Nočné búrky na zvlnenom studenom fronte. Ukážka prediktability atmosférických zrážok (mm/3h) v 12 hodinovej predpovedi zo 4. augusta 2020, 12 UTC pre oblasť Slovenska, pre 16 perturbovaných členov A-LAEF ansámbla. Na pozadí je pre každý člen ansámbla zobrazené aj príslušné tlakové pole redukované na hladinu mora.

Figure 1. Night storms on the undulated cold front. A demonstration of precipitation predictability (mm/3h) in the 12-hour forecast from August 4th, 2020, 12 UTC for Slovakia, for 16 perturbed members of the A-LAEF ensemble. In the background with corresponding mean sea level pressure for each member.



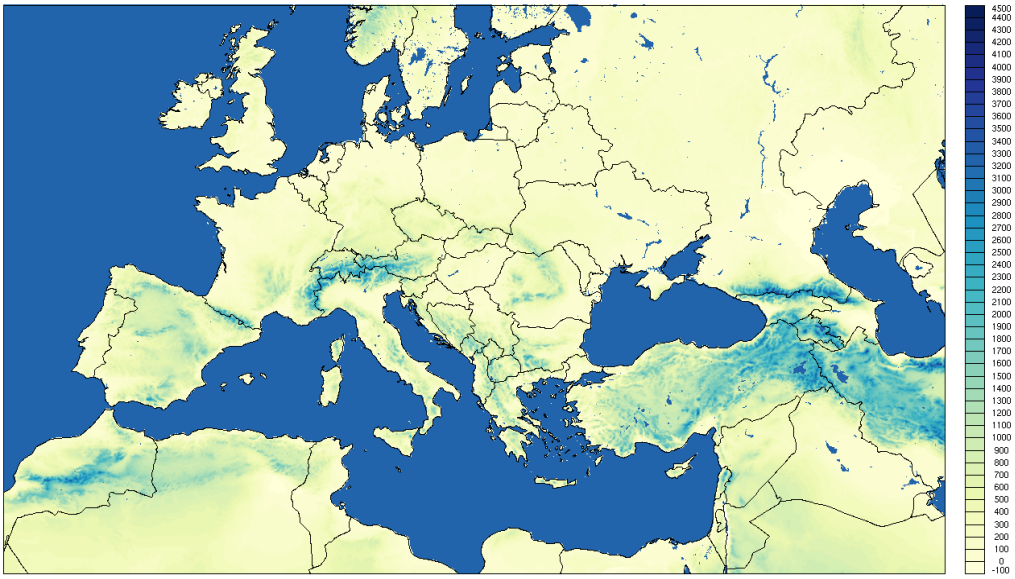
prírodnými zákonmi (hlavne zákon zachovania energie). Samotný ansámbel potom pozostáva z viacerých možných scenárov vývoja atmosféry, čo nám vo výsledku umožňuje pracovať s pravdepodobnosťou výskytu predpovedaného javu. Veľkou výhodou oproti „klasickej“ numerickej predpovedi je, že ansámblový systém dokáže zachytiť aj extrémne prejavy počasia, ktoré v konkrétnej deterministickej predpovedi môžu vďaka nižšej prediktabilite javu úplne chýbať.

3 A-LAEF SYSTÉM

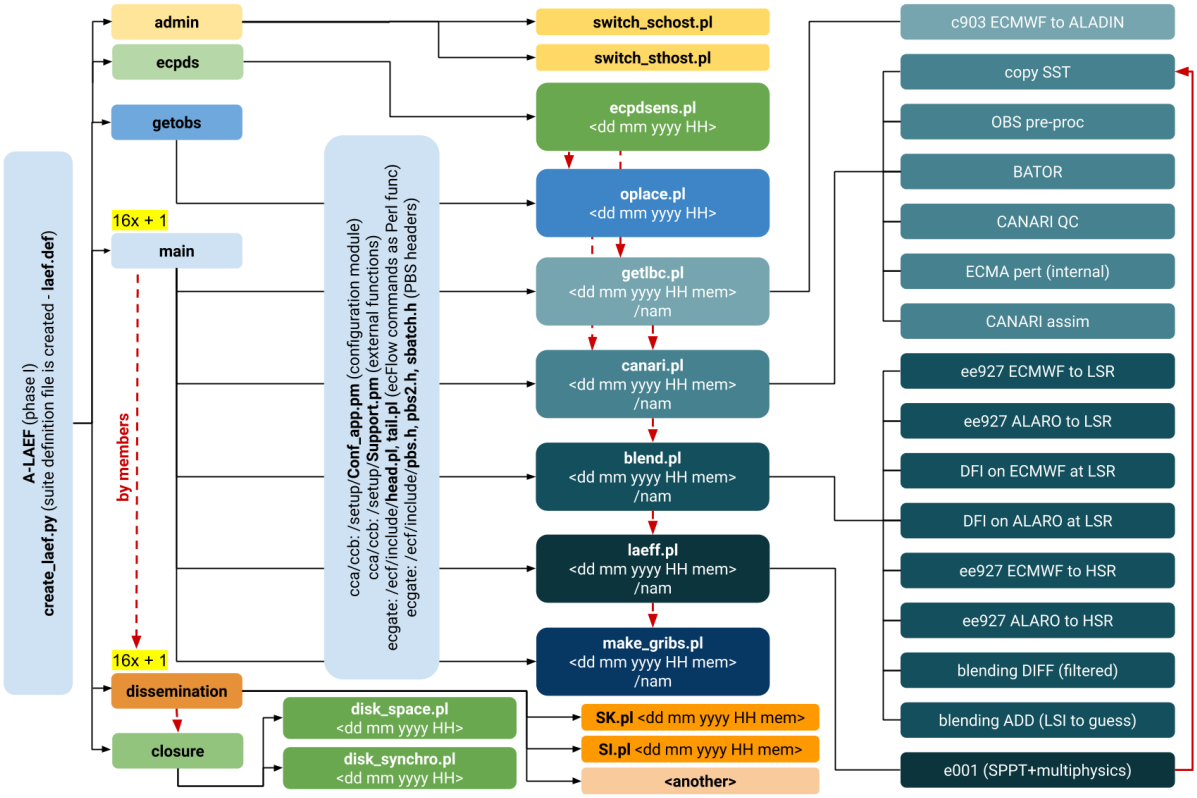
Nový A-LAEF systém pozostáva zo 16-ich perturbovaných členov a jedného kontrolného (neperturbovaného) behu, všetky s horizontálnym rozlíšením 4.8 km a vertikálne so 60 hladinami. Celý ansámbel teda obsahuje 17 rôznych predpovedí vo vysokom rozlíšení (v porovnaní s inými, operatívne používanými regionálnymi a globálnymi ansámblami a je na úrovni rozlíšenia deterministického modelu ALADIN/SHMÚ). Oblasť výpočtu A-LAEF systému je možné vidieť na Obr. 2. Jej veľkosť je dôležitá v situáciách so silným prúdením, ale zohráva významnú úlohu aj v súvislosti s priestorovým a časovým šírením porúch, ktoré sa snažíme simulovať, a tiež so spôsobom dodávania okrajových podmienok z globálneho ansámblového systému. Celkový počet uzlových bodov v doméne, kde prebiehajú výpočty, je takmer milión (937 500). Pre lepšiu predstavu o objeme výpočtov, ktoré je nutné vykonať, musíme toto číslo ďalej vynásobiť počtom vertikálnych hladín, počtom prognostických premenných, počtom časových krokov v predpovedi a počtom všetkých členov ansámbla. Dostaneme tak číslo okolo 20 biliónov (20×10^{12})!

Obr. 3 znázorňuje schému procesov prebiehajúcich pre každý jeden člen ansámbla - prípravu vstupných dát z globálneho modelu a výrobu okrajových podmienok, asimilačný cyklus pre povrchové a pôdne parametre s perturbovanými meraniami (Belluš, Wang, Meier, 2016), spektrálny blending pre atmosférické polia (Derková a Belluš, 2007; Wang a kol., 2014), integráciu modelu so stochastickou perturbáciou fyzikálnych tendencií a multi-fyzikálnymi parametrizáciami (Wang, Belluš, Weidle, 2019), výrobu a prenos výstupných dát a niekoľko nutných servisných procesov. Tento systém počítame 2-krát za deň z termínov 00 a 12 UTC na nasledujúcich 72 hodín. Výpočet ansámbla z jedného termínu na 4896-ich jadrách výpočtového klastra v ECMWF (17x288 jadier) trvá približne 2 hodiny.

Obrázok 2. Výpočtová oblasť A-LAEF systému a jej modelová topografia.
Figure 2. Computational domain of the A-LAEF system with model topography.



Obrázok 3. Schéma A-LAEF systému znázorňujúca procesy v rámci jedného člena ansámbla.
Figure 3: A-LAEF system flowchart showing the processes within one ensemble member.



3.1 Perturbácie počiatočného stavu

Neurčitosť pôdnych a povrchových prognostických polí v počiatočných podmienkach systému A-LAEF je simulovaná asimiláciou meraní teploty a vlhkosti v 2 m (Belluš, Wang, Meier, 2016). Asimilácia znamená začlenenie aktuálnych meraní v kombinácii s pozaďovými hodnotami numerického modelu (tzv. first guess-om) do počiatočného stavu atmosféry nutného pre integráciu modelu. Každý člen ansámbla má svoj vlastný cyklus asimilácie údajov s náhodne modifikovanými meraniami. Amplitúda a smer týchto simulovaných „porúch“ sú definované gaussovskou distribučnou funkciou s nulovou strednou hodnotou a štandardnou odchýlkou rovnajúcou sa obvyklým chybám meraní. Názorná ukážka takýchto perturbácií je na Obr. 4 (a).

Atmosférické polia (na vertikálnych hladinách) v počiatočných podmienkach systému A-LAEF tiež obsahujú neurčitosť. Zmiešavajú sa tu „poruchy“ globálneho ansámbla ECMWF na veľkých priestorových škálach (tzv. synoptických) s vysokofrekvenčným signálom generovaným priamo A-LAEF systémom. Táto technicky komplikovaná metóda sa nazýva spektrálny blending pomocou digitálneho filtra a nie je dôvod ani priestor ju na tomto mieste bližšie rozoberať (Derková a Belluš, 2007; Wang a kol., 2014).

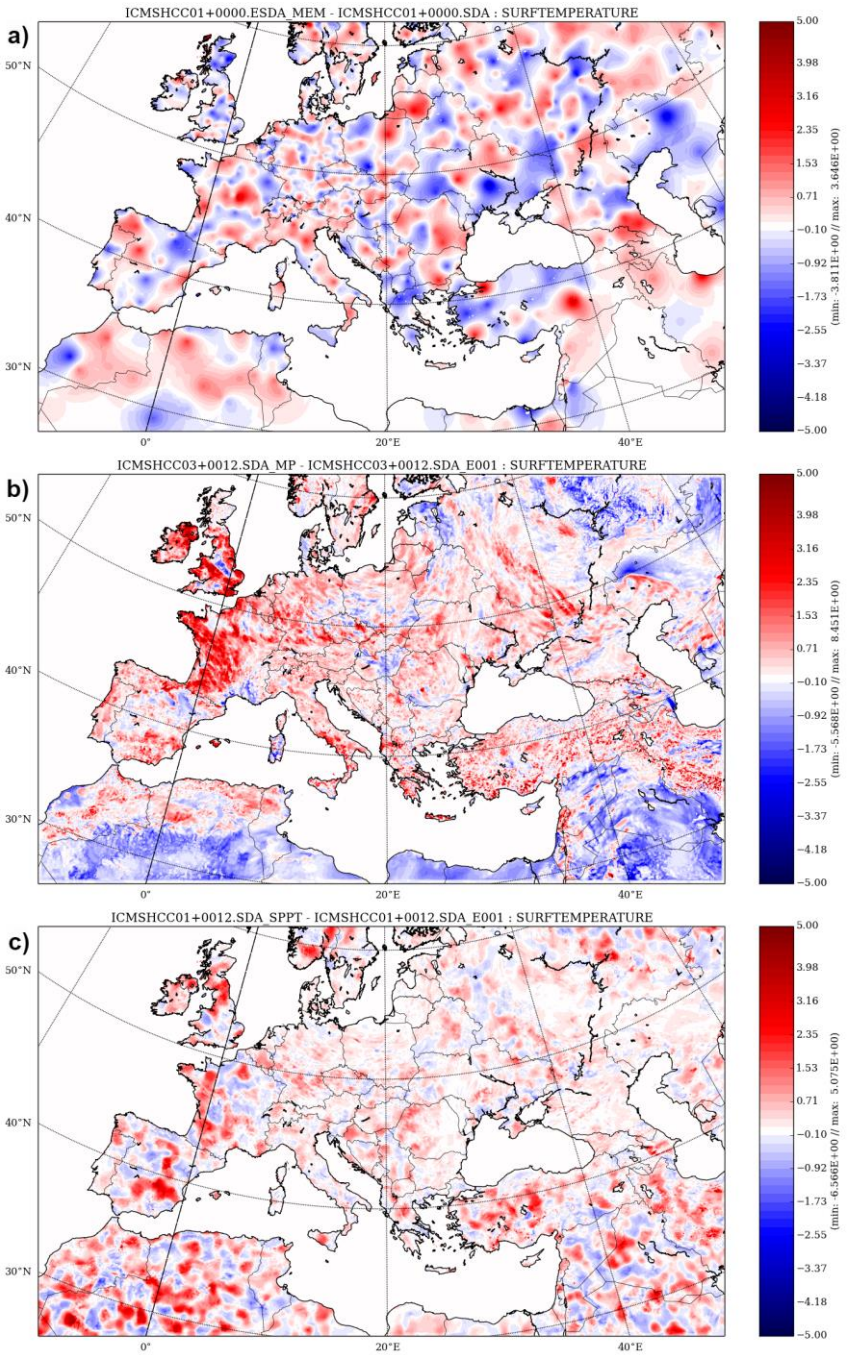
3.2 Simulovanie chýb numerického modelu

Žiadny model nie je dokonalý, a preto je nutné zahrnúť jeho chyby (resp. neurčitosť) aj do predpovede. Neurčitosť numerického modelu v ansámblovom systéme A-LAEF je simulovaná pomocou kombinácie rôznych nastavení v parametrizácii mikrofyziky, hlbokej a plytkej konvekcie, radiačných procesov a turbulencie. Použitý model navyše profituje z novej ALARO fyziky vyvíjanej tiež v rámci RC LACE spolupráce našimi kolegami v Prahe (Termonia a kol., 2018).

Pre optimálnejšiu simuláciu neurčitosti sú ďalej fyzikálne tendencie (prírastky v každom časovom kroku modelu) stochasticky perturbované (Wang, Belluš, Weidle, 2019). Táto tzv. „stochastická fyzika“ náhodne narušuje tendencie modelu vypočítané parametrizačnými schémami, a preto sa zameriava na presnosť modelu priamo pri zdroji neistôt. Týka sa to rozptylu povrchových predpovedných polí, akými sú teplota, obsah kvapalnej a tuhej vodnej fázy, albedo snehu (jeho schopnosť odrážať krátkovlné žiarenie), vodná hodnota a hustota snehu a voda zachytená vegetáciou.

Obrázok 4. Perturbácie povrchovej teploty vybraného člena A-LAEF ansámbla voči kontrolnej analýze resp. voči kontrolnej 12-hodinovej predpovedi: a) v počiatočných podmienkach; b) simuláciou neurčitosti počas integrácie modelu metódou multifyzikálnych parametrizácií a c) metódou stochastickej fyziky.

Figure 4. Surface temperature perturbations of a selected member of the A-LAEF ensemble against the control analysis and against the control 12-hour forecast: a) in the initial conditions; b) by simulating the uncertainty during model integration by multiphysical parameterization, and c) by stochastic physics.



Simulácia neurčitosti výpočtu povrchových prognostických polí je z hľadiska ansámblového systému s vysokým rozlíšením, zameraného na krátkodobú predpoveď počasia (do 3 dní), veľmi dôležitá. Príklady perturbácií povrchovej teploty v A-LAEF systéme sú znázornené na Obr. 4 (b, c). Zatiaľ čo prvá spomínaná metóda (b) produkuje dominantne pozitívne alebo negatívne poruchy na rozsiahlych geografických oblastiach, stochastická metóda (c) vedie k úplne inej priestorovej štruktúre perturbácií. Kombinácia týchto dvoch metód simulácie neurčitosti modelu zabezpečuje rozptyl ansámbla, ktorý lepšie zodpovedá reálnej prediktabilite atmosféry a homogénne zachytáva možné scenáre jej budúceho vývoja.

3.3 Perturbácie okrajových podmienok

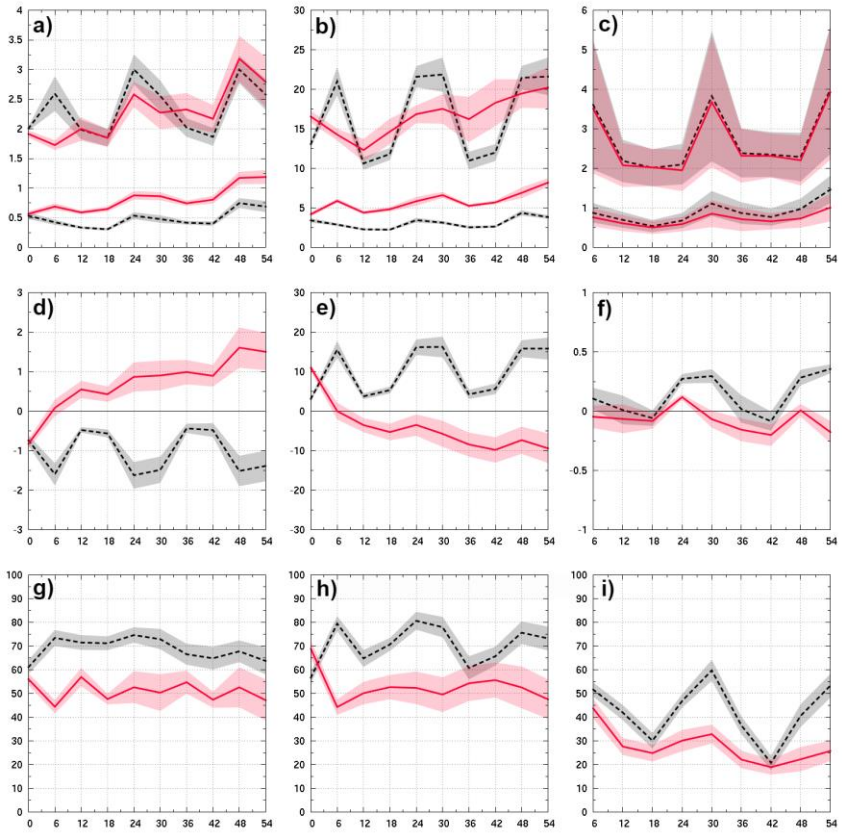
Nutnou podmienkou na integráciu numerického modelu na ohraničenej oblasti, a teda aj A-LAEF systému, je informácia o tom, čo do danej oblasti „vteká“, resp. z nej „vyteká“ von. Tomuto predpisu podmienok na hraniciach oblasti výpočtu sa odborne hovorí coupling. A-LAEF systém je couplovaný s globálnym ansámblom ECMWF (Wang a kol., 2010), čím je zároveň definovaná aj neurčitosť fyzikálnych polí na hraniciach výpočtovej domény každých 6 hodín. Takáto frekvencia je vzhľadom na veľkosť domény (Obr. 2) dostatočná a hodnoty na jej hranici v rámci tohto intervalu sa pre každý časový krok interpolujú.

4 VERIFIKÁCIA A PRÍPADOVÉ ŠTÚDIE

Hlavnou motiváciou pre vývoj a prevádzku ansámblového systému s vysokým rozlíšením A-LAEF je samozrejme jeho pridaná hodnota voči globálnemu ansámblu ECMWF a voči lokálnym deterministickým modelom. Túto pridanú hodnotu dokazuje jednak vzájomné porovnanie verifikačných skóre oboch ansámblových systémov (Obr. 5) a tiež viaceré prípadové štúdie z praxe (Obr. 6 až 17).

Obrázok 5. Verifikácia predpovedí systému A-LAEF (plná čiara) a ECMWF (prerušovaná čiara), tieňované plochy predstavujú interval spoľahlivosti (10 – 90 %). RMSE a rozptyl ansámbla (prvý riadok), BIAS (druhý riadok) a OUTLIERS (tretí riadok) pre teplotu (a, d, g), relatívnu vlhkosť (b, e, h) a 6-hodinové úhrny zrážok (c, f, i). Na horizontálnej osi je dĺžka predpovede v hodinách.

Figure 5. Statistical verification of A-LAEF (solid line) and ECMWF (dashed line) forecasts. Shaded areas represent a confidence interval (10 – 90%). RMSE and the ensemble spread (first row), BIAS (second row) and OUTLIERS (third row) for temperature (a, d, g), relative humidity (b, e, h) and 6-hourly total precipitation (c, f, i). The horizontal axis shows forecast lead time in hours.



4.1 Verifikácia

Štatistické skóre ukazuje signifikantné zlepšenie rozptylu A-LAEF ansámbla oproti ECMWF riadiacemu modelu pre teplotu aj relatívnu vlhkosť a zároveň zmenšenie ich strednej kvadratickej chyby RMSE (Obr. 5 - a, b). Pre zrážky je skóre neutrálne (Obr. 5 - c), čo môže byť spôsobené nedostatočne dlhým verifikačným obdobím a tiež tzv. dvojitou penalizáciu v dôsledku vyššieho rozlíšenia A-LAEF systému. Stredná chyba A-LAEF ansámbla (Obr. 5 - d, e, f) je nižšia hlavne zo začiatku predpovedného obdobia. Podobne ako v prípade RMSE je tiež menej ovplyvnená denným chodom meteorologických prvkov. Je to hlavne vďaka použitej ALARO fyzike v A-LAEF systéme, ktorá je lepšie prispôsobená vyššiemu rozlíšeniu. Čo sa týka percenta outlierov, A-LAEF systém je signifikantne lepší pre všetky zobrazené parametre (Obr. 5 - g, h, i). To znamená, že A-LAEF sa v krátkodobej predpovedi lepšie „triafa“ svojím rozptylom do reálnych scenárov vývoja počasia než riadiaci ECMWF ansámbel. Podobné zlepšenie štatistických skóre A-LAEF systému oproti referencii je možné vidieť aj pre rýchlosť vetra a iné parametre (nie je tu ukázané).

4.2 Prípadové štúdie

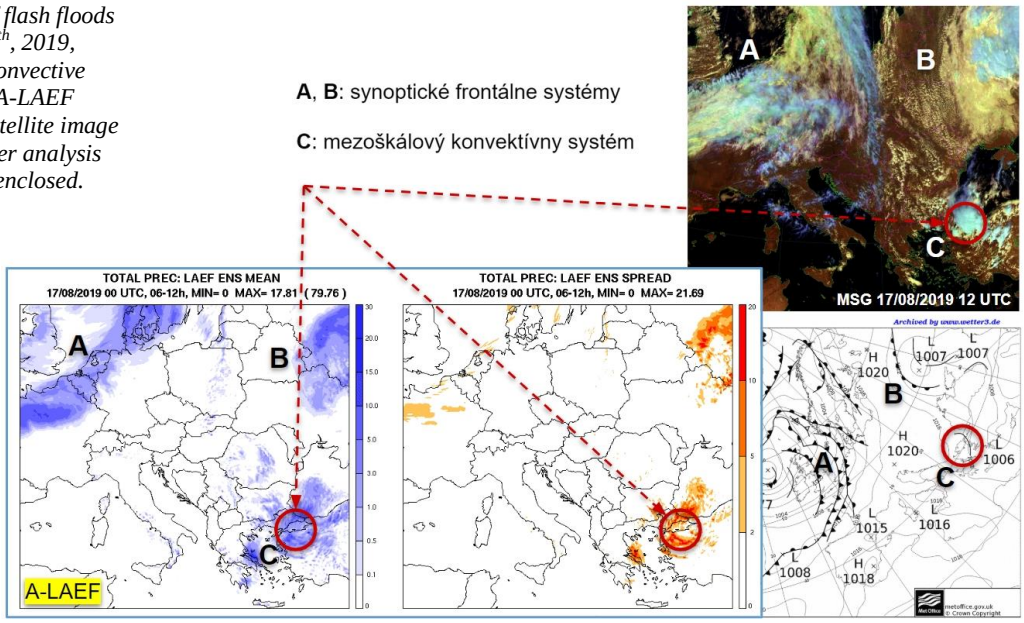
Kvalitu A-LAEF systému však najlepšie dokazujú viaceré prípadové štúdie extrémnych prejavov počasia z praxe. Jednou takouto udalosťou boli prívalové zrážky v Turecku zo 17. augusta 2019 (Obr. 6). Silné zrážky súvisiace s mezoškálovým konvektívnym systémom postihli niekoľko okresov Istanbulu, kde spôsobili rozsiahle povodne. Podľa správ z médií jedna osoba zahynula, viaceré domy boli poškodené a zaplavilo niekoľko ulíc, čo viedlo k závažnému narušeniu dopravy v meste.

Predpoveď zrážkového poľa A-LAEF systému pre daný termín veľmi dobre korešponduje s analýzou poveternostnej situácie aj so satelitným pozorovaním oblačnosti (Obr. 6). V doméne sa nachádzalo niekoľko systémov. Dva z nich, veľkopriestorové frontálne systémy (A, B), majú vyššiu prediktabilitu, a preto ich môžeme vidieť dobre definované vo všetkých členoch ansámbla (Obr. 7). Na druhej strane mezoškálový konvektívny systém zodpovedný za prívalové zrážky v Istanbule (C) je síce detegovaný priemerom ansámbla (Obr. 6), ale už sa nenachádza v každom z predpovedaných scenárov (Obr. 7). O jeho nižšej

prediktabilite hovorí aj rozptyl ansámbla, ktorý je v danej oblasti vysoký (Obr. 6). Z hľadiska pravdepodobnosti sú všetky členy ansámbla rovnocenné. V praxi to znamená, že ak by niektorý z takýchto členov ansámbla bol práve náš deterministický model, tento extrémny prejav počasia by sme vôbec nezachytili.

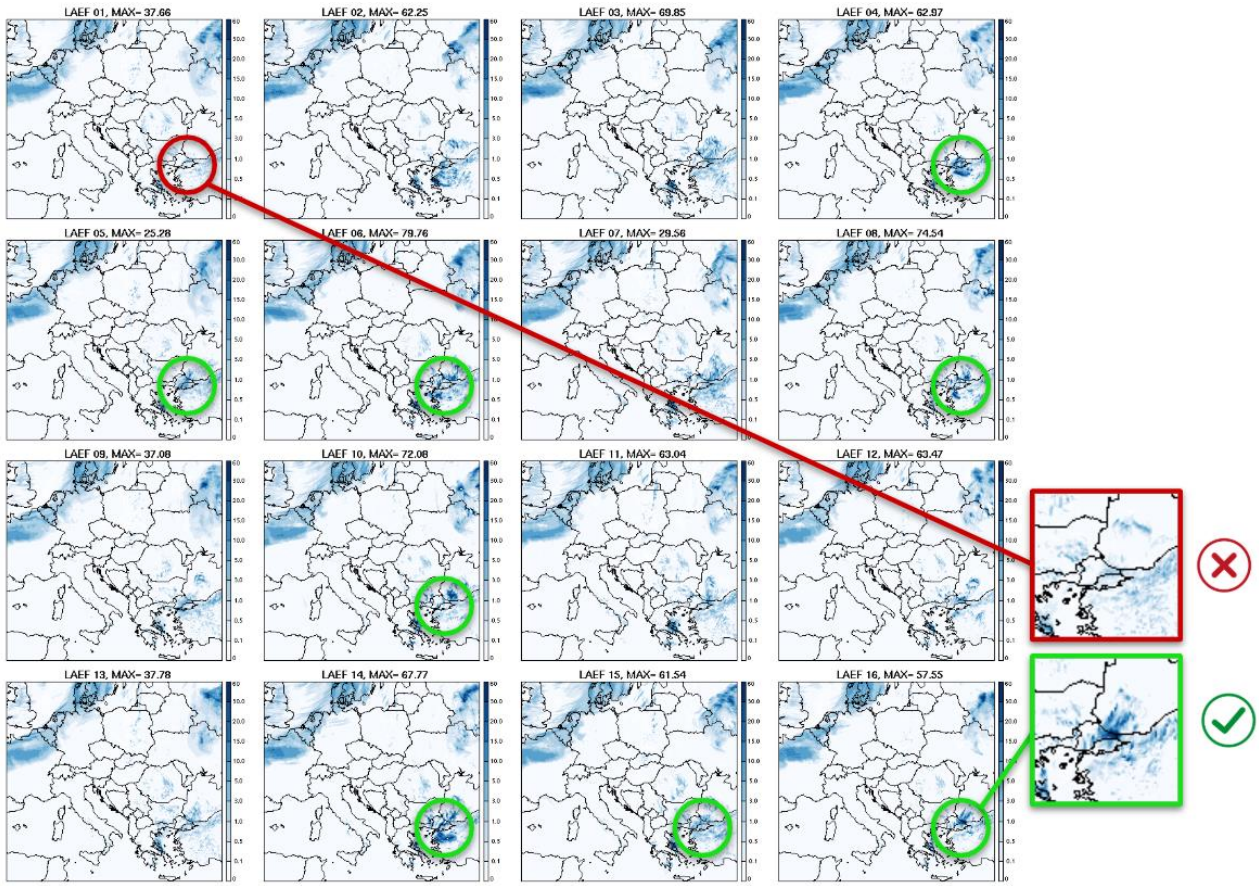
Obrázok 6. Prípad prívalových zrážok v Turecku zo 17. augusta 2019, súvisiacich s mezoškálovým konvektívnym systémom zachyteným v predpovedi A-LAEF ansámbla. Priložený je aj satelitný obrázok z MSG a analýza poveternostnej situácie z MetOffice.

Figure 6. Case study of flash floods in Turkey on August 17th, 2019, related to meso-scale convective system captured in the A-LAEF ensemble forecast. A satellite image from MSG and a weather analysis chart of MetOffice are enclosed.



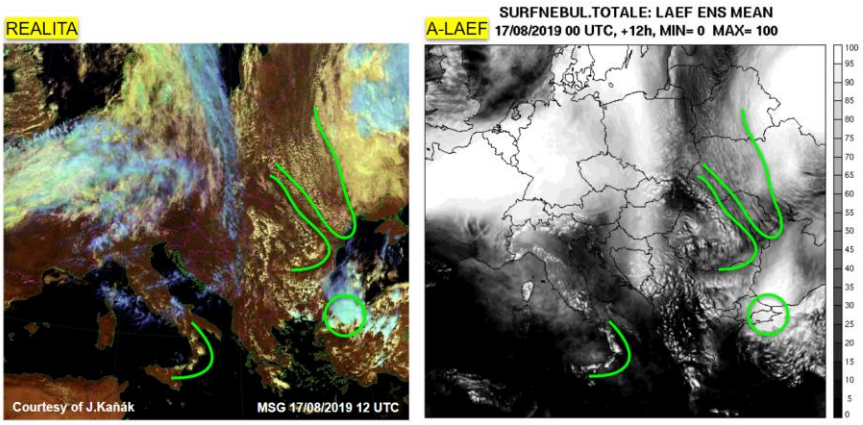
Obrázok 7. Predpoveď zrážkového poľa pre 16 perturbovaných členov A-LAEF ansámbla k prípadovej štúdii v Turecku zo 17. augusta 2019.

Figure 7. Precipitation forecast of 16 perturbed members of the A-LAEF ensemble for the case study in Turkey of August 17th, 2019.



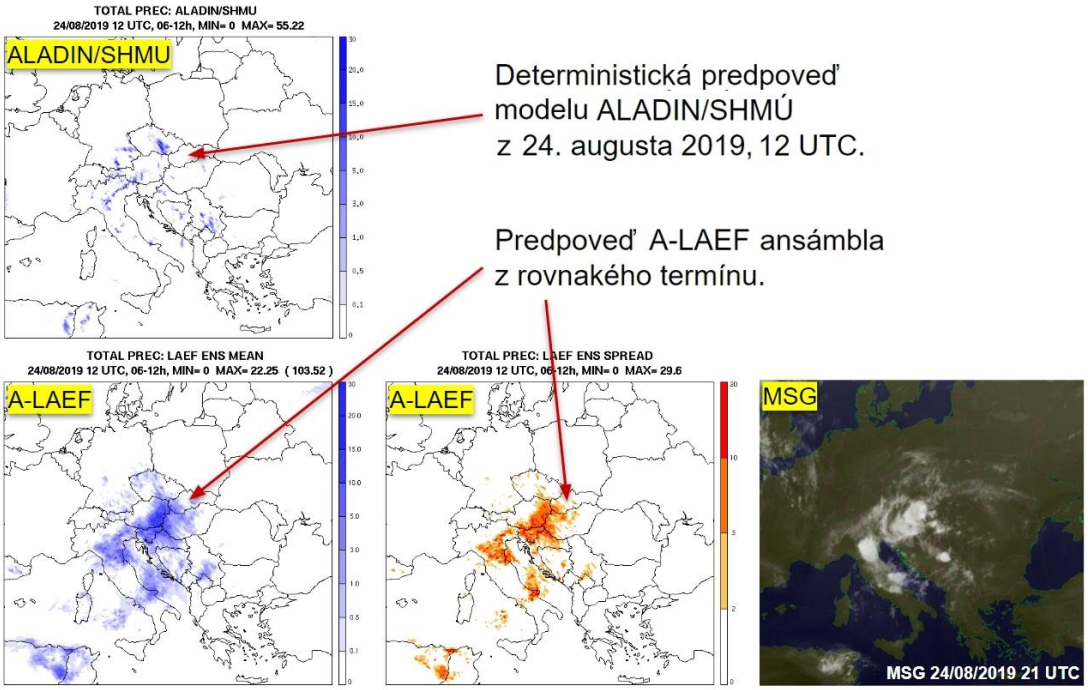
Obrázok 8.
Oblačnosť videná z meteorologickej družice MSG (vľavo) a 12-hodinová predpoveď oblačnosti systémom A-LAEF (priemer ansámbla) zo 17. augusta 2019, 00 UTC platná na rovnaký termín (vpravo).

Figure 8.
Clouds as seen from the meteorological satellite MSG (left) and a 12-hour A-LAEF cloudiness forecast (ensemble mean) from August 17th, 2019, 00 UTC valid at the time (right).



Obrázok 9. Prípadová štúdia nočnej búrky v Bratislave z 24. augusta 2019. Predpoveď 6-hodinových kumulovaných zrážok (úhrn za obdobie 18 až 24 UTC) z deterministického modelu ALADIN/SHMÚ, ansámblového systému A-LAEF (priemer ansámbla a rozptyl ansámbla) a verifikačný IR obrázok z MSG z 21 UTC.

Figure 9. Case study of a night storm in Bratislava on August 24th, 2019. 6-hourly cumulative precipitation forecast (totals for the period 18 to 24 UTC) from the deterministic model ALADIN/SHMÚ, ensemble forecasting system A-LAEF (ensemble mean and spread) and IR (infra-red) image from MSG at 21 UTC for the verification.



Sofistikovanú ALARO fyziku použitú v A-LAEF systéme demonštruje porovnanie 12-hodinovej predpovede oblačnosti s realitou videnou z meteorologickej družice MSG (Obr. 8). Zelenými čiarami sú označené rôzne typy oblačnosti, ako napríklad konvekcia nad južným Talianskom a Sicíliou, ktoré veľmi dobre korešpondujú medzi satelitným obrázkom (vľavo) a predpoveďou A-LAEF (vpravo).

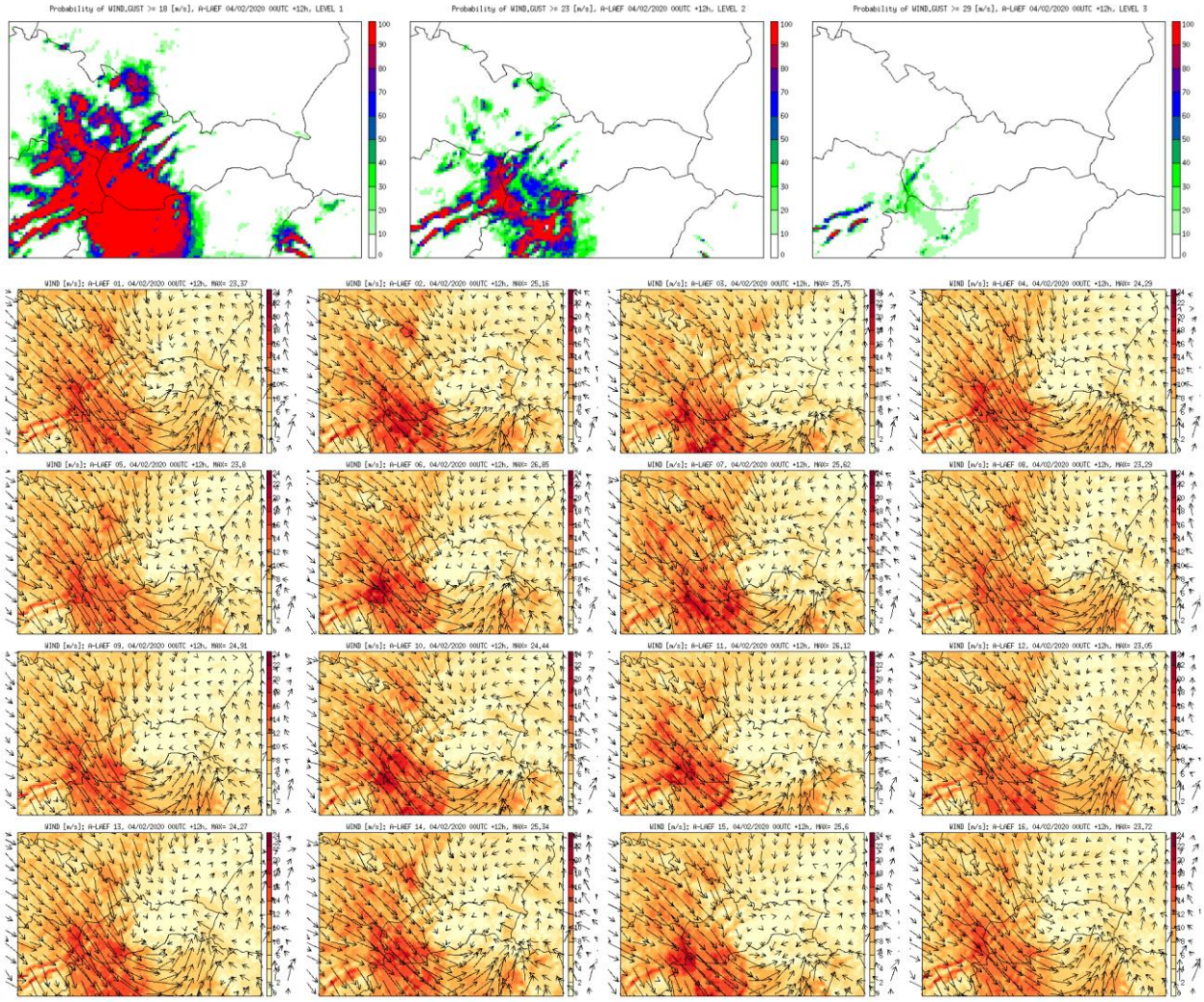
Ďalšou zaujímavou situáciou z pohľadu extrémnych prejavov počasia bola intenzívna nočná búrka z 24. augusta 2019, ktorá zasiahla aj Bratislavu. V nočných hodinách juhozápadnú časť Slovenska postihli silné búrky.

Celkový počet úderov blesku bol v tomto čase okolo 15-tisíc a spadlo 15 až 50 milimetrov zrážok. Priamy zásah blesku dostal aj 30 metrov vysoký stožiar pred slovenským parlamentom a poškodil jeho náter. Predpoveď takýchto nočných konvektívnych javov je vo všeobecnosti problematická, čo dokazuje aj fakt, že naším deterministickým modelom ALADIN/SHMÚ (s podobným horizontálnym aj vertikálnym rozlíšením a rovnakou fyzikou) búrka nebola vôbec zachytená. Napriek tomu bol ansámblový systém A-LAEF z rovnakého termínu v predpovedi úspešný (Obr. 9).

Ansámblový systém je veľmi užitočným nástrojom aj pri vydávaní výstrah na silný alebo nárazový vietor. Keď sa stred hlbokej tlakovej níže nachádzal 4. februára 2020 nad stredným Slovenskom, viedlo to k mimoriadne silnému a nárazovému vetru najmä v juhozápadnej časti nášho územia. V Bratislave a Nitre boli zaznamenané maximálne

Obrázok 10. Víchrica zo 4. februára 2020. Pravdepodobnostné mapy nárazov vetra pre prahové hodnoty 18, 23 a 29 m/s zodpovedajúce stupňu výstrahy 1, 2 a 3 (hore - zľava doprava) a jednotlivé predpovede rýchlosti a smeru vetra pre 16 perturbovaných členov A-LAEF ansámbla zo 4. februára 2020, 00 UTC, platné o 12:00 UTC (dole).

Figure 10. Gale on February 4th, 2020. Probabilistic maps of wind gust for threshold values 18, 23 and 29 m/s corresponding to warning levels 1, 2 and 3 (top - left to right) and individual wind speed and direction forecasts for 16 perturbed A-LAEF members of February 4th, 2020, 00 UTC, valid at 12:00 UTC (bottom).



nárazy vetra okolo 28 m/s. Na malokarpatskom hrebeni boli nárazy vetra aj cez 30 m/s, inde to bolo väčšinou v intervale od 25 do 30 m/s. Nestáva sa často, aby bol najvyšší stupeň výstrahy na vietor (3. stupeň) vydaný pre hlavné mesto, Bratislavu. Silný, nárazový vietor fúkal tiež vo východnej časti Rakúska a severozápadnej časti Maďarska. Obr. 10 ukazuje predpoveď pravdepodobnosti výskytu nárazového vetra pre rôzne hraničné hodnoty zodpovedajúce stupňu výstrahy 1, 2 a 3 (hore) a jednotlivé predpovede poľa vetra pre 16 perturbovaných členov A-LAEF ansámbla (dole).

Ďalšou zaznamenanou situáciou boli extrémne vysoké zrážkové úhrny v priebehu len 24 hodín na území juhozápadného Maďarska. Z 24. na 25. júla 2020 tam spadlo až 178 mm zrážok, čo vyvolalo rozsiahle povodne. Situáciu spôsobenú výškovou tlakovou nížou (zrejme v kombinácii s hlbokou konvekciou) deterministické modely zachytili, ale lokalizácia maximálnych úhrnov nebola dostatočná na spresnenie výstrah, keďže veľké úhrny nad 100 mm za 24 hodín boli predpovedané na relatívne veľkom území. Priemer A-LAEF ansámbla, resp. maximum ansámbla lepšie zodpovedal reálnemu rozloženiu zrážkového poľa (Obr. 11). Situáciu dobre ilustrujú aj pravdepodobnosti 24-hodinových úhrnov zrážok pre hraničné hodnoty 10, 20, 50 a 100 mm (Obr. 12). Tu si však treba uvedomiť, že pravdepodobnosť vysokých úhrnov môže byť nižšia aj napriek tomu, že nenulový počet členov ansámbla takéto (alebo aj väčšie) zrážky predpovedá. V tomto prípade bola pre postihnutú oblasť predpovedaná 10 až 20 percentná pravdepodobnosť zrážkových úhrnov nad 100 mm za 24 hodín.

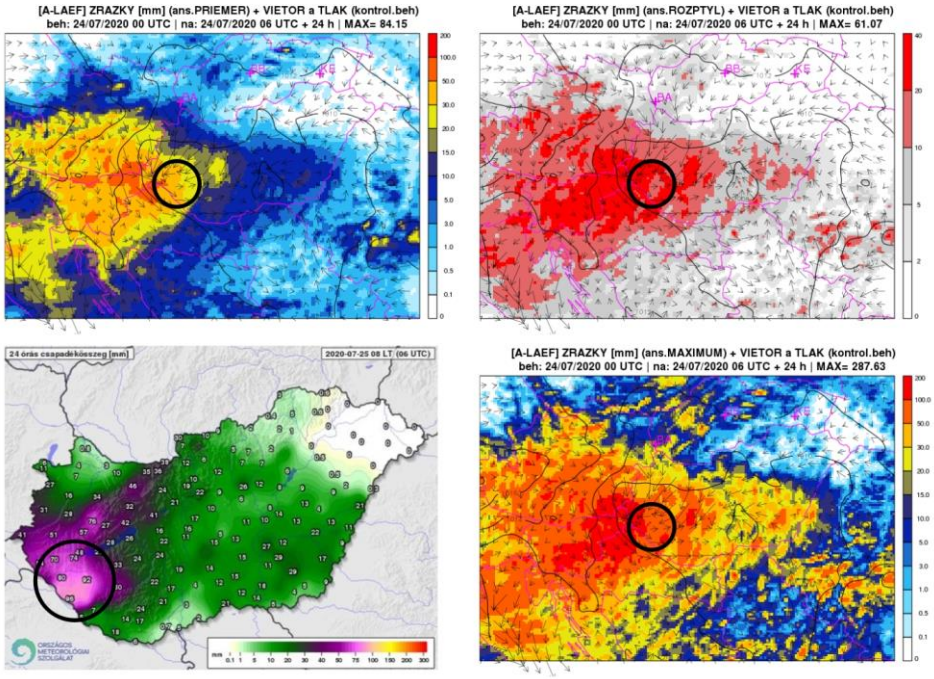
Poslednou prípadovou štúdiou, ktorú by sme tu chceli ukázať, boli búrky súvisiace so studeným frontom. V nočných hodinách (z 28. na 29. júla 2020) postupovala nad naším územím od západu na východ v brázde nízkeho tlaku vzduchu predfrontálna čiara instability s výrazným výtokom chladnejšieho vzduchu v spodných hladinách, ktorý zviditeľňoval shelf cloud (Obr. 13). Podľa prezídia hasičského a záchranného zboru (HaZZ) si búrková činnosť spojená so silným nárazovým vetrom vyžiadala

83 výjazdov hasičov. Vo väčšine prípadov pomáhali pri odstraňovaní popadaných stromov z cestných komunikácií, rodinných domov, budov a zaparkovaných vozidiel. V 13. prípadoch bola ich pomoc potrebná pri odčerpávaní vody zo zatopených pivničných priestorov, garáží a ulíc.

Ansámblový systém A-LAEF aj v tomto prípade veľmi dobre predpovedal vzniknutú situáciu, t.j. intenzívne zrážky sformované do čiary instability postupujúcej od západu na východ (Obr. 14 a 15) a s tým spojený silný nárazový vietor (Obr. 16 a 17).

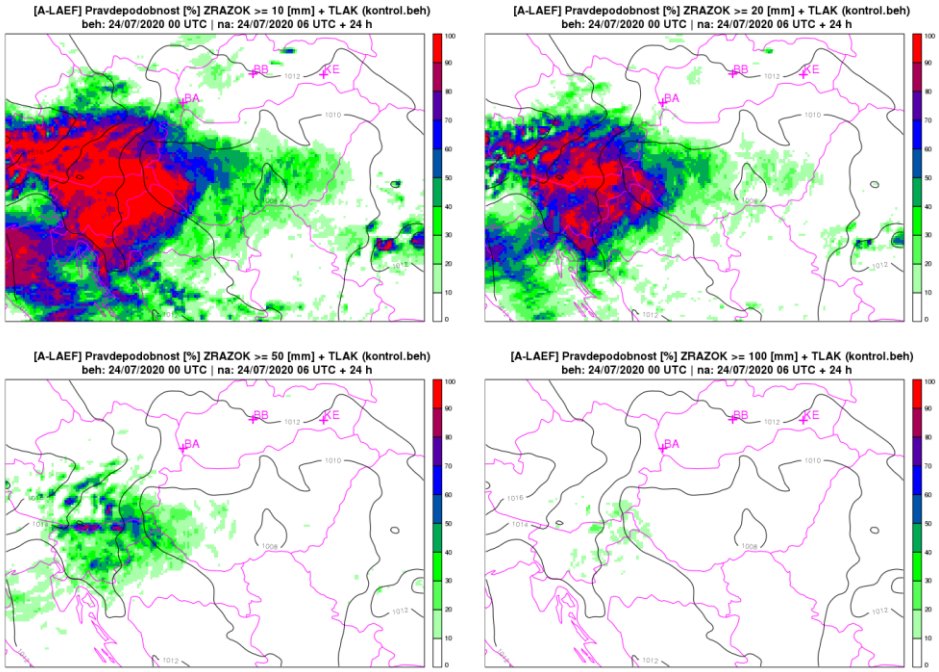
Obrázok 11. Prípad extrémnych zrážok na juhozápade Maďarska z 24. na 25. júla 2020. Predpoveď zrážkového úhrnu za obdobie od 24. júla 06 UTC do 25. júla 06 UTC z A-LAEF ansámbla (priemer ansámbla vľavo hore, rozptyl ansámbla vpravo hore, maximum ansámbla vpravo dole) na pozadí s tlakovým poľom redukovaným na hladinu mora a poľom vetra v 10 metroch z kontrolného behu, a analýza 24-hodinových zrážkových úhrnov za rovnaké obdobie na území Maďarska (vľavo dole, zdroj: OMSZ). Pozn.: mapy nie sú v rovnakej mierke ani s rovnakými škálami.

Figure 11. Case study of extreme rainfall in south-west Hungary from 24th to 25th July 2020. A-LAEF ensemble total precipitation forecast for the period from 24th July 06 UTC to 25th July 06 UTC (ensemble mean top-left, ensemble spread top-right, maximum of ensemble bottom-right), with mean sea level pressure and a wind field at 10 meters from a control run in the background, and total precipitation analysis for the same period of 24 hours in Hungary (bottom-left, source: OMSZ). Note: maps are not in the same scale.



Obrázok 12. Prípad extrémnych zrážok na juhozápade Maďarska z 24. na 25. júla 2020. Pravdepodobnosť úhrnov zrážok pre hraničné hodnoty 10, 20, 50 a 100 mm za 24h, predpovedaná A-LAEF ansámblom z 24. júla 2020, 00 UTC, na pozadí s tlakovým poľom redukovaným na hladinu mora z kontrolného behu.

Figure 12. Case study of extreme rainfall in south-west Hungary from 24th to 25th July 2020. Probability of total precipitation for the threshold values of 10, 20, 50 and 100 mm in 24 hours, forecasted by the A-LAEF ensemble on 24th July 2020, 00 UTC, with mean sea level pressure from a control run in the background.

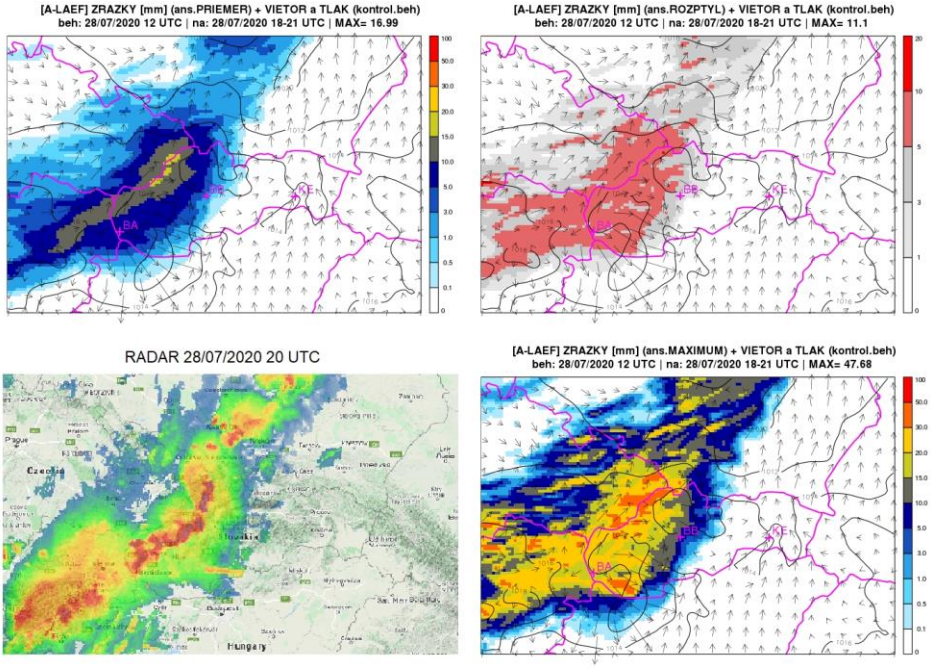


Obrázok 13. Nočná búrka z 28. júla 2020 nad Bratislavou, ako ju zachytil kolega Tibor Csörgei zo strechy budovy SHMÚ.

Figure 13.
The night storm on July 28th, 2020 over Bratislava, as caught by my colleague Tibor Csörgei from the rooftop of the SHMÚ building.

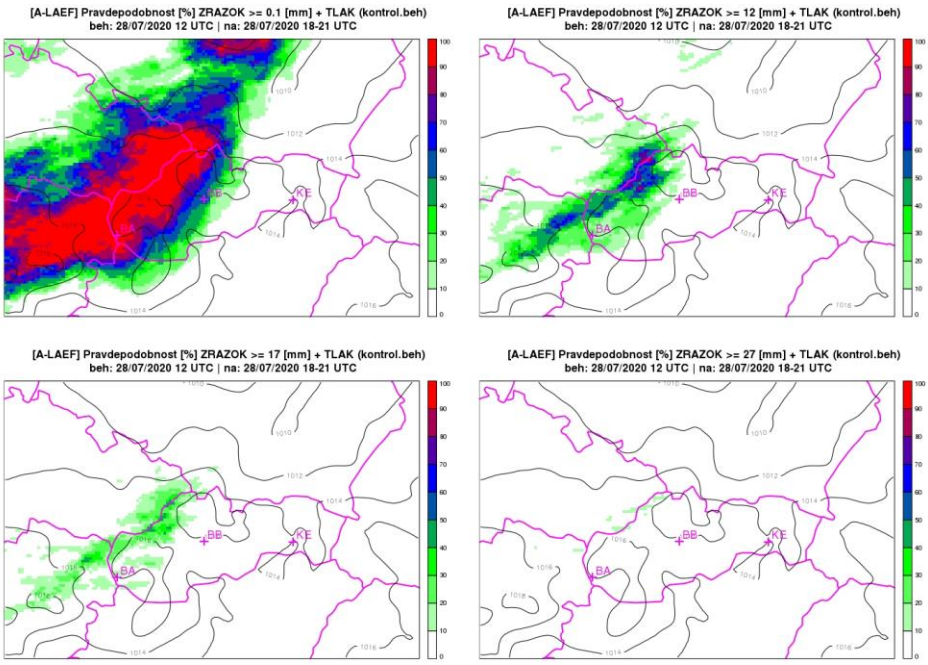
Obrázok 14. A-LAEF predpoveď kumulovaných zrážok na 28. júla 2020, 18 až 21 UTC (priemer ansámbla vľavo hore, rozptyl ansámbla vpravo hore, maximum ansámbla vpravo dole), na pozadí s tlakovým poľom redukovaným na hladinu mora a poľom vetra v 10 metroch z kontrolného behu, a zlúčená radarová informácia z 28. júla 2020, 20 UTC (vľavo dole).

Figure 14.
A-LAEF cumulative precipitation forecast for 28th July 2020, 18 to 21 UTC (ensemble mean top-left, ensemble spread top-right, maximum of ensemble bottom-right), with mean sea level pressure and a wind field at 10 meters from a control run in the background, and merged radar information from 28th July 2020, 20 UTC (bottom-left).



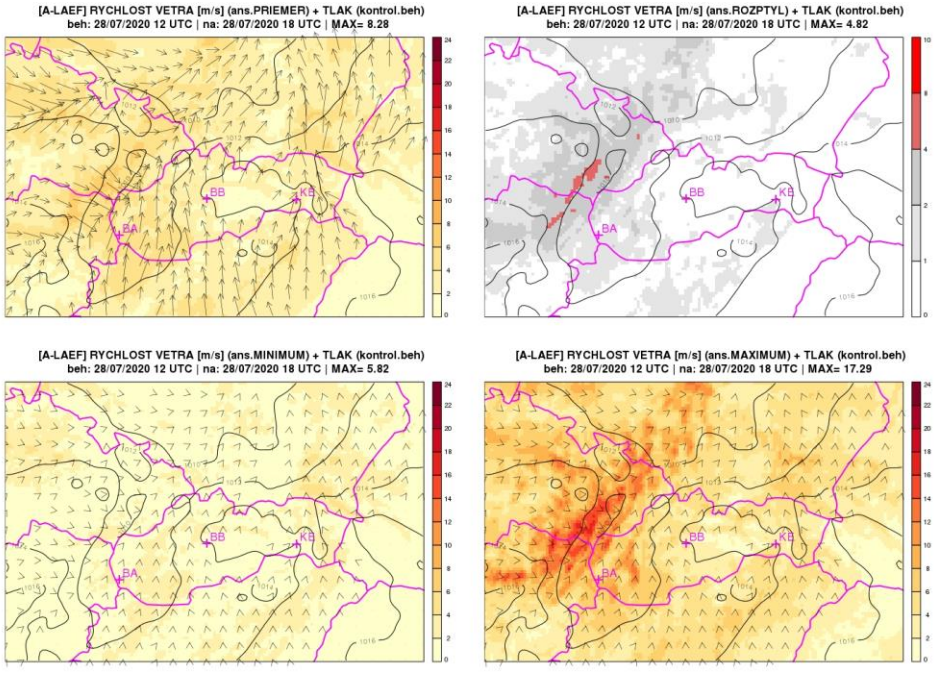
Obrázok 15. Predpoveď pravdepodobnosti výskytu zrážok na 28. júla 2020, 18 až 21 UTC pre hraničné hodnoty 0.1, 12, 17 a 27 mm za 3 hodiny podľa A-LAEF ansámbla, na pozadí s tlakovým poľom redukovaným na hladinu mora z kontrolného behu.

Figure 15.
Precipitation probability forecast for 28th July 2020, 18 to 21 UTC for threshold values of 0.1, 12, 17 and 27 mm in 3 hours according to the A-LAEF ensemble, with mean sea level pressure from a control run in the background.



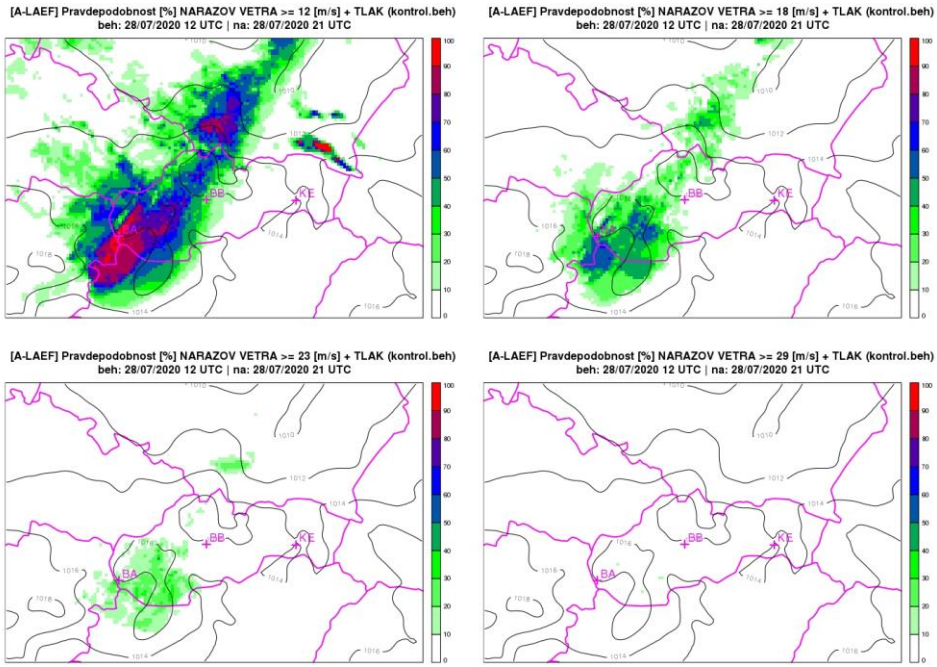
Obrázok 16. A-LAEF predpoveď priemerného smeru a rýchlosti vetra z 28. júla 2020, 12 UTC na 18:00 UTC (priemer ansámbla vľavo hore, rozptyl ansámbla vpravo hore, minimum ansámbla vľavo dole, maximum ansámbla vpravo dole), na pozadí s tlakovým poľom redukovaným na hladinu mora z kontrolného behu.

Figure 16.
A-LAEF average wind speed and direction forecast from 28th July 2020, 12 UTC valid at 18:00 UTC (ensemble mean topleft, ensemble spread top-right, minimum of ensemble bottom-left, maximum of ensemble bottom-right), with mean sea level pressure from a control run in the background.



Obrázok 17. Predpoveď pravdepodobnosti nárazov vetra pre hraničné hodnoty 12, 18, 23 a 29 m/s podľa A-LAEF ansámbla z 28. júla 2020, 12 UTC na 21:00 UTC, na pozadí s tlakovým poľom redukovaným na hladinu mora z kontrolného behu.

Figure 17.
Wind gust probability forecast for threshold values of 12, 18, 23 and 29 m/s according to the A-LAEF ensemble from 28th July 2020, 12 UTC valid at 21:00 UTC, with mean sea level pressure from a control run in the background.



5 ZÁVER A PERSPEKTÍVY

Vývoj regionálneho ansámblového systému A-LAEF a zavedenie jeho výstupov do operatívnej prevádzky na SHMÚ predstavuje veľký technologický aj kvalitatívny krok vpred. Budúcnosť numerickej meteorológie s ohľadom na stále sa zvyšujúce priestorové a časové rozlíšenie modelov je jednoznačne v pravdepodobnostnom ansámblovom prístupe. Podobne, ako to bolo v prípade predpovedania meteorologických javov na dlhšie obdobie dopredu (globálne ansámblové systémy), deterministický popis krátko trvajúcich javov relatívne malej priestorovej mierky v atmosfére bez sofistikovaného simulovania ich neurčitosti, rovnako ako extrémnych poveternostných javov, nebude postačujúci.

Nový ansámblový systém je dostupný pre interné účely Centra predpovedí a výstrah na SHMÚ, ale aj pre širokú laickú verejnosť prostredníctvom SHMÚ webstránky (z legislatívnych dôvodov môžeme zverejňovať len mapy s výrezom pre Slovensko a blízke okolie). Nasledovať bude ďalšie spracovanie pravdepodobnostných výstupov pre využitie napríklad aj do hydrologických odtokových modelov a pre komerčných zákazníkov. V dohľadnej dobe plánujeme výstupy ansámblového systému A-LAEF sprístupniť širšej verejnosti aj prostredníctvom populárnych meteogramov.

Treba si však uvedomiť, že interpretácia pravdepodobnostnej predpovede sa v mnohom líši od toho, ako sú vnímané doteraz bežne dostupné deterministické materiály. V ansámblovej predpovedi je obsiahnutých niekoľkonásobne viac informácií a predpoveď môže byť aj vo forme pravdepodobnosti výskytu daného javu. Hraničné hodnoty jednotlivých meteorologických prvkov, ktorých pravdepodobnosť je hlavným produktom ansámblového systému, sú však priamo závislé na konkrétnom používateľovi, resp. na konkrétnej aplikácii využitia týchto dát. Rôzne nároky na splnenie (či nesplnenie) určitých poveternostných podmienok bude mať stavebná firma, poľnohospodárska firma, energetická spoločnosť prevádzkujúca veterné turbíny, alebo rodina s deťmi zvažujúca víkendový výlet do hôr. Preto pripraviť univerzálny pravdepodobnostný produkt nie je možné. Pri správnej interpretácii výstupov a vhodnej voľbe pravdepodobnostných produktov nám však ansámblový systém dokáže v našom rozhodovaní poskytnúť veľmi užitočné informácie, a to aj napriek tomu, že toto naše rozhodnutie musí byť v konečnom dôsledku vždy deterministické.

Poďakovanie

Chceli by sme vyjadriť vďaku mnohým kolegom z medzinárodných konzorcií RC LACE a ALADIN, ktorí svojou vedeckou prácou prispeli do systému A-LAEF, či už priamo alebo nepriamo, prostredníctvom vývoja kódu numerického modelu ALADIN, najmä však pražskému tímu za vývoj balíka fyzikálnych parametrizácií ALARO. Veľká vďaka patrí menovite aj Xavierovi Abellanovi z ECMWF za technickú a administratívnu pomoc pri operatívnej implementácii A-LAEF suity v Európskom centre.

LITERATÚRA

Belluš, M.–Wang,Y.–Meier,F., 2016, Perturbing surface initial conditions in a regional ensemble prediction system, Mon. Wea. Rev. 144:3377-3390, DOI:10.1175/MWR-D-16-0038.1.

Belluš, M.–Weidle,F.–Wittmann, C.–Wang, Y.–Taşku,S.–Tudor, M., 2019, Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational – Limited Area Ensemble Forecasting (ALADIN-LAEF), Adv. Sci. Res., 16, 63 – 68, DOI:10.5194/asr-16-63-2019.

Derková, M.–Belluš, M., 2007, Various applications of the blending by digital filter technique in the ALADIN numerical weather prediction system, Meteorologický časopis, 10, 27 – 36.

Lorenz, E.N., 1963, Deterministic Nonperiodic Flow, J. Atmos. Sci., 20, 130 – 141, https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2.

Lorenz, E.N., 1972, Investigating the predictability of turbulent motion, Statistical Models and Turbulence, Proceedings of symposium held at the University of California, San Diego, July 15 – 21, 1971, Springer-Verlag, 195 – 204.

Termonia, P.–Fischer, C.–Bazile, E.–Bouyssel, F.–Brožková, R.–Bénard, P.–Bochenek, B.–Degrauwe, D.–Derkova, M.–El Khatib, R.–Hamdi, R.–Mašek, J.–Pottier, P.–Pristov, N.–Seity, Y.–Smolíková, P.–Spaniel, O.–Tudor, M.–Wang, Y.–Wittmann, C.–Joly, A., 2018, The ALADIN System and its Canonical Model Configurations AROME CY41T1 and ALARO CY40T1, Geoscientific Model Development, 1 – 45, DOI:10.5194/gmd-11-257-2018.

Wang, Y.–Belluš,M.–Weidle,F. et al., 2019, Impact of land surface stochastic physics in ALADIN-LAEF, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1–19, DOI:10.1002/qj.3623.

Wang, Y.–Belluš, M.–Geleyn, J.–Ma, X.–Tian,W.–Weidle, F., 2014, A new method for generating initial perturbations in regional ensemble prediction system: blending, Mon. Wea. Rev. 142: 2043 – 2059, DOI:10.1175/MWR-D-12-00354.1.

Wang, Y.–Belluš,M.–Smet,G.–Weidle,F., 2010, Use of ECMWF EPS for ALADIN-LAEF, ECMWF Newsletter, 126, Winter 2010/2011, 18 – 22, DOI:10.21957/d9j1nx7p.

Wang, Y.–Belluš,M.–Ehrlich, A.–Mile,M.–Pristov,N.– Smolikova, P.–Spaniel,O.–Trojakova,A.–Brozkova, R.– Cedilnik, J.–Klaric,D.–Kovacic, T.–Masek, J.–Meier, F.–Szintai, B.–Tascu, S.–Vivoda, J.–Wastl, C.–Wittmann, Ch., 2017, 27 years of Regional Co-operation for Limited Area Modelling in Central Europe (RC LACE), Bulletin of the Am. Met. Soc., Vol. 99 Issue 7, 1415 – 1432, DOI:10.1175/BAMS-D-16-0321.1.

MONITOROVANIE ČASOVÝCH ZMIEN KONTINENTÁLNEHO VODNÉHO ZDROJA VO VYBRANÝCH EURÓPSKYCH POVODIACH

ADAM NOVÁK, BARBORA KOREKÁČOVÁ, JURAJ JANÁK

Katedra geodetických základov, Stavebná fakulta STU v Bratislave

The launch of satellite mission GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) led to a significant improvement in the Earth's mass changes observation, enabling the recovery of monthly changes in continental water storage. As the continental water storage makes up essential part of the global hydrological cycle, monitoring of temporal variations provides valuable information. The total continental water storage consists of water stored in snow and ice, vegetation cover, unsaturated soil zone, groundwater and surface waters such as rivers, wetlands, lakes and reservoirs.

Due to limited computational options of Equivalent Water Thickness (EWT) we propose a new approach based on modifying the existing source code GrafLab working in Matlab software. Our results were compared with data from the global hydrological model WGHM (WaterGAP Global Hydrology Model) in Danube river basin for the period 2002 to 2009 with a standard deviation of 3.1 cm. Our results revealed periodical seasonal variations in the continental water storage and significant extremes corresponding with droughts and floods that occurred in this area after 2002. Using the Least-Squares linear regression of EWT data averaged through the Danube river basin a decrease in height of continental water storage of 9.1 mm per 10 year has been estimated. The same process has been applied to other major European river basins and a map showing the linear trend of EWT variations for each river basin has been made.

Výsledky družicovej misie GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) umožnili výrazné zlepšenie pozorovania presunu zemských hmôt, čo zároveň umožnilo sledovať mesačné zmeny výšky kontinentálneho vodného stĺpca. Nakoľko tieto zmeny tvoria podstatnú časť globálneho hydrologického cyklu, možnosť ich sledovania prináša dôležité informácie. Celkový objem kontinentálnej vody predstavuje súhrn zložiek vody uloženej v podobe snehu a ľadu, vo vegetačných porastoch a na nich, v nenasýtenej pôdnej zóne a v podzemných a povrchových vodách, ako sú rieky, mokrade, jazerá a nádrže.

Vzhľadom na obmedzené výpočtové možnosti veličiny ekvivalentnej výšky vodného stĺpca kontinentálnej vody (EWT) bol navrhnutý nový prístup založený na úprave existujúceho zdrojového kódu GrafLab pracujúceho v programe Matlab. Výsledky výpočtov boli porovnávané s údajmi z globálneho hydrologického modelu WGHM (WaterGAP Global Hydrology Model) v povodí Dunaja za roky 2002 až 2009 so štandardnou odchýlkou 3,1 cm. Naše výsledky odhalili periodické sezónne zmeny výšky kontinentálneho vodného stĺpca a výrazné extrémy, zodpovedajúce významným suchám a povodniam, ktoré sa v tejto oblasti vyskytli od roku 2002. Použitím lineárnej regresie na hodnoty EWT v povodí rieky Dunaj bol pomocou metódy najmenších štvorcov odhadnutý priemerný ročný úbytok vody 9,1 mm za 10 rokov. Rovnaký postup sme uplatnili aj v ostatných významných európskych povodiach, výsledkom ktorého je mapa zobrazujúca hodnoty lineárneho trendu zmien EWT vo vybraných povodiach.

Key words: Satellite mission GRACE, continental water storage, monthly Earth gravity field solutions

ÚVOD

Voda je základnou podmienkou pre existenciu života na Zemi. Ako pitnú vodu označujeme takú vodu, ktorá je vhodná na každodenné použitie, zbavená nečistôt a obsahuje vyvážené množstvo minerálnych látok tak, aby jej užívanie neškodilo zdraviu. Jedným z prirodzených zdrojov pitnej vody je voda podzemná, ktorá je sústredená pod zemským povrchom v horninovom prostredí, nespevnených sedimentoch a pôde (Graham, 1999). Napriek tomu, že sa na Zemi nachádza len v obmedzenom množstve, podzemná voda je jediným zdrojom pitnej vody pre takmer tretinu svetového obyvateľstva. Je však vo veľkej miere čerpaná pre potreby poľnohospodárstva, strojníctva a mnohých ďalších odvetví priemyslu (Margat a Gun, 2013). Využívanie jej zdrojov však v mnohých prípadoch býva neúmerne väčšie ako ich prirodzené doplňanie (Gleeson a Richter, 2016). Vzniká preto potreba tieto zdroje monitorovať za účelom predídenia ich úplnému vyčerpaniu (Hirji a kol., 2016).

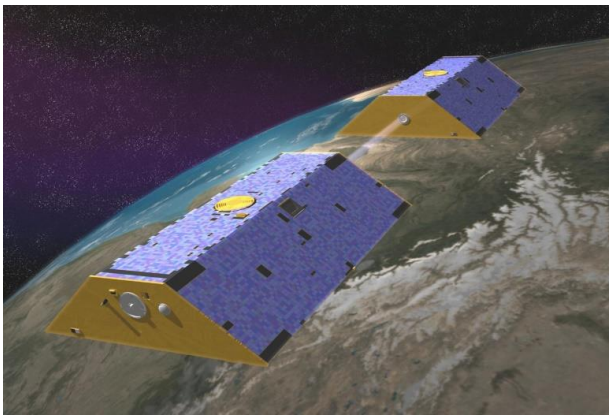
Nakoľko v súčasnosti neexistuje jednotná globálna hydrologická sieť, ktorá by zahŕňala dáta získané unifikovaným spôsobom pozemného zberu a následného spracovania, veľkým prínosom v efektívnom, dlhodobom pozorovaní zmien množstva podzemnej vody priniesla družicová misia GRACE (internetový zdroj: *http://earth.esa.int/hydrospace07/participants/84231/pres_84231.pdf*).

Družicová misia GRACE zahájila svoju činnosť v roku 2002 ako spoločný projekt americkej vedeckej agentúry NASA (National Aeronautics and Space Administration) a nemeckého výskumného centra GFZ (Deutsches Geoforschungs Zentrum). Jej cieľom bolo presné mapovanie tiažového poľa Zeme na dovtedy nedosiahnutej úrovni presnosti a priestorového rozlíšenia (Ditmar a kol., 2012). Bola tvorená dvojicou identických družíc GRACE A a GRACE B, ktoré boli vynesené do výšky približne 500 km nad zemský

povrch a okolo Zeme obiehali po identickej dráhe vo vzdialenosti približne 220 km za sebou. Predpokladaná dĺžka trvania misie GRACE bola odhadovaná na 5 rokov, no nakoniec družice svoju vedeckú činnosť ukončili až v roku 2017, čiže po 15 rokoch.

Obrázok 1. Družice misie GRACE (https://www.nasa.gov/).

Figure 1. GRACE mission satellites.



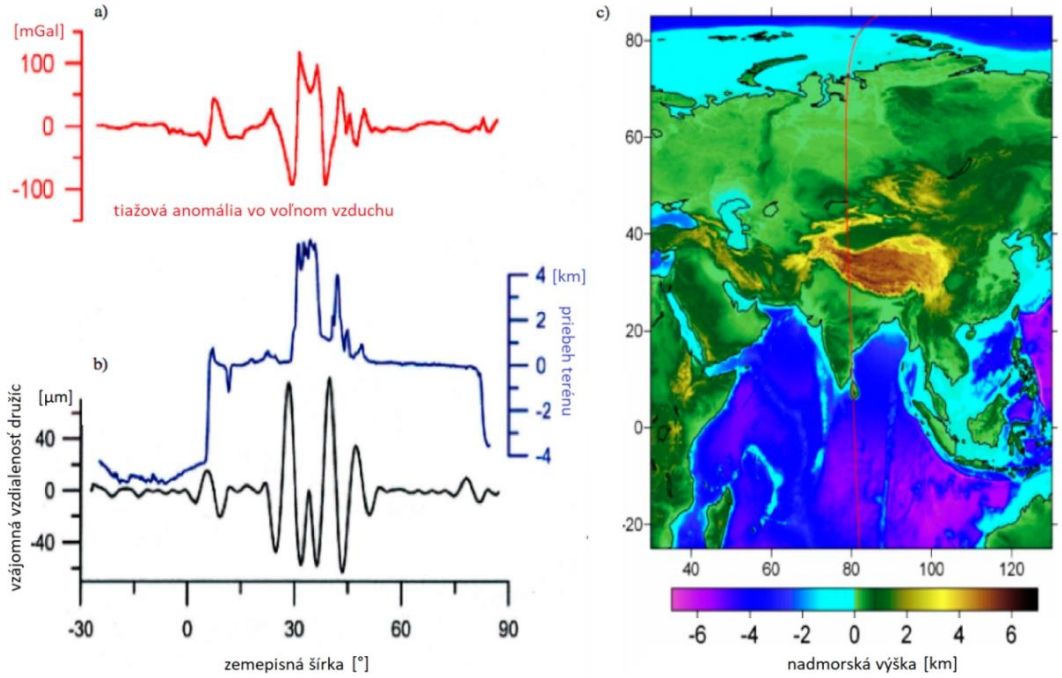
Princíp určovania parametrov tiažového poľa Zeme je založený na meraní vzájomnej vzdialeností medzi dvojicou družíc a súčasným modelovaním zmien vo vzájomnej vzdialenosti spôsobených negravitačnými vplyvmi, ako napríklad odpor atmosféry alebo priamy a nepriamy efekt slnečného žiarenia. Presuny zemských hmôt (a s tým súvisiace zmeny tiažového poľa Zeme) spôsobovali v určitých miestach nad zemským povrchom spomalenia alebo zrýchlenia družíc misie GRACE a nepatrne tak bola ovplyvnená ich vzájomná vzdialenosť (Buis, 2017).

Variácia vzdialenosti bola nepretržite meraná pomocou presného diaľkomera pracujúceho v pásme K rádiového spektra (KBR) s frekvenciou 24 GHz. Každá družica je okrem diaľkomera vybavená sústavou akcelerometrov, ktoré slúžia na určovanie negravitačných vplyvov, prijímačom GNSS slúžiacim na určenie polohy družice a ďalšími zariadeniami (Tapley a kol., 2004). Merané údaje z družíc boli vysielané do pozemných staníc, kde sa dáta z oboch družíc skombinovali, čím sa minimalizoval vplyv ionosféry na meranú vzdialenosť a zohľadnili sa korekcie vzdialenosti z pôsobenia negravitačných vplyvov. Výsledná vzájomná vzdialenosť družíc bola určovaná s presnosťou na úrovni mikrometrov (Wahr, 2015). Znázornenie korelácie medzi meranou vzdialenosťou družíc a zmenou tiažového zrýchlenia na zemskom povrchu sa nachádza na Obr. 2.

V spracovateľských centrách sú opravené vzdialenosti následne ďalej spracované s cieľom vytvoriť rôzne dátové produkty pre používateľov, napríklad globálne geopotenciálne modely (GGM) s časovým odstupom 1 mesiac, tzv. mesačné modely tiažového poľa Zeme. GGM sú najčastejšie publikované ako textové súbory obsahujúci informačnú hlavičku a hodnoty sférických harmonických koeficientov do určitého stupňa a rádu, pri poslednej verzii GRACE GGM bol použitý maximálny stupeň a rád 60 a 96. Sférické harmonické koeficienty sú výsledkom riešenia Laplaceovej rovnice na sfére. Ich výhoda spočíva v efektívnom uložení informácií o tiažovom poli, ktoré je môžné podľa potreby použiť pri výpočte rôznych funkcionálov tiažového poľa. Mesačné modely tiažového poľa Zeme sú veľmi vhodné na analýzu temporálnych zmien tiažového poľa.

Obrázok 2. Korelácia medzi zmenami vzdialenosti družíc GRACE A a B a zmenami tiažového zrýchlenia pre vybraný úsek dráhy (Frappart a kol., 2018).

Figure 2. Correlation between inter-satellite distance changes and changes of gravity along selected track (Frappart et al., 2018).



V návrhu družicovej misie GRACE boli zadefinované tri oficiálne spracovateľské centrá, a to Deutsches GeoForschungs Zentrum (GFZ), The University of Texas, Center for Space Research (CSR) a Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology (JPL), ktoré tvoria GRACE Science Data System (Godah a kol., 2015). GGM sú voľne dostupné napríklad na internetovej stránke Medzinárodného centra pre globálne modely tiažového poľa Zeme (ICGEM), v niekoľkých riešeniach (Release) označených ako RL01 až RL06. Práve RL06 v súčasnosti predstavuje najaktuálnejšie riešenie (Dahle a kol, 2014).

GGM založené na dátach družicovej misie GRACE sú však výrazne ovplyvnené šumom, ktorý vzniká v dôsledku geometrie dráhy družíc misie, chýb senzora KBR, ale pravdepodobne aj následkom obmedzených možností spracovania dát. Tento nepriaznivý jav sa prejavuje vo všetkých veličinách vypočítaných z GGM založených na dátach misie GRACE v podobe pravidelných pásov v meridiánovom smere, a vyžaduje si aplikáciu filtrov, pomocou ktorých dokážeme šum minimalizovať. V súčasnosti sa pri filtrácií modelov najviac využívajú pravdepodobnostné vyhladzovacie dekorelačné metódy, pozri (Kusche, 2007) a (Kusche, 2009) označené DDK1 až DDK8, kde DDK1 predstavuje najvyšší stupeň vyhladenia a DDK8 najnižší. Hlavným problémom je, že pri filtrácií dochádza k čiastočnej strate gravitačného signálu a voľba stupňa vyhladenia závisí od skúmanej oblasti a aplikácie (Godah a kol., 2015). Z celého obdobia operačnej fázy družíc GRACE máme k dispozícií vyše 150 mesačných modelov.

METODIKA

Najväčším zdrojom krátkodobých zmien tiažového poľa Zeme je podľa (Ramilien a kol.,2008) presun hydrologických hmôt tekutého obalu Zeme. Pokiaľ máme dostupné údaje o časových zmenách tiažového poľa Zeme vo forme mesačných GGM, dokážeme inverziou zmeny tiažového potenciálu získať údaje o časových zmenách výšky kontinentálneho vodného stĺpca. Množstvo kontinentálnej vody v zvolenom bode môžeme vyjadriť pomocou veličiny Equivalent Water Thickness, ďalej označovanej ako *EWT*. Veličina *EWT* v sebe zahŕňa všetky zložky kontinentálneho vodného zdroja v danom mieste, ktorými sú podzemná voda, snehová a ľadová pokrývka, vlhkosť pôdy, voda vo vegetácií alebo voda nachádzajúca sa v riekach a jazerách (Rodell a Famiglietti, 1999). Z uvedených zložiek tvorí najväčšiu časť celkového kontinentálneho vodného zdroja práve podzemná voda.

Pre ľubovoľný bod na zemskom povrchu môžeme *EWT* vypočítať zo sférických harmonických koeficientov pomocou vzťahu podľa (Wahr a kol., 1998):

$$EWT = \frac{R \cdot \rho_{av}}{3} \sum_{n=0}^{n_{max}} \frac{2n+1}{1+k_n} \sum_{k=0}^{n} \left(C_{n,k} \cdot \cos k\lambda + S_{n,k} \cdot \sin k\lambda \right) \cdot \overline{P}_{n,k}(\sin\varphi), \quad (1)$$

kde symbol R znamená priemerný polomer použitého referenčného elipsoidu, ρ_{av} je priemerná hustota Zeme, n a k sú stupne a rády sférických harmonických koeficientov, k_n sú Loveho čísla prislúchajúce jednotlivým stupňom n sférických harmonických koeficientov, $C_{n,k}$ a $S_{n,k}$ sú úplne normované sférické harmonické koeficienty, $\overline{P}_{n,k}(\sin\varphi)$ sú normované Legendreove funkcie prvého druhu a φ a λ sú sférické zemepisné súradnice (šírka a dĺžka) výpočtových bodov. Výsledkom výpočtu je hodnota výšky vodného stĺpca v jednotkách kg.m^{-2}, čo je hodnota ekvivalentná milimetrom, pretože 1 kg vody s hustotou 1000 kg.m^{-3} rozliaty na plochu 1 m^2 bude predstavovať 1 mm hrubú vrstvu.

Pri skúmaní zmien veličiny *EWT* je omnoho výhodnejšie pracovať s rozdielmi hodnôt oproti zvolenému referenčnému modelu *ΔEWT*, aby bolo zmeny možné ľahšie pozorovať. Voľba vhodného referenčného modelu je v tomto prípade veľmi dôležitá, podľa (Janák, 2019) je najvhodnejšie referenčný model vypočítať ako priemer všetkých dostupných mesačných modelov použitého riešenia.

Rozdiely mesačných hodnôt oproti referenčnému modelu *ΔEWT* potom vypočítame pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$\Delta EWT_t = EWT_t - EWT_{mean}, \quad (2)$$

kde index t vyjadruje časovú príslušnosť dát ku konkrétnemu mesiacu. Takýmto spôsobom určujeme zmeny množstva kontinentálnej vody *ΔEWT* vzhľadom k priemerným hodnotám EWT_{mean} za celé obdobie z ktorého máme dostupné dáta.

Existuje viacero nástrojov určených na prácu s dátovými produktami družicovej misie GRACE vytvorených v rôznych programovacích jazykoch (Python – Nielsen a kol., 2012, MATLAB – Bucha a Janák, 2013), ako aj interaktívne on-line prístupy k rovnakej problematike (výpočtové centrum služby ICGEM). Nevýhodou týchto nástrojov však je, že sa zaoberajú hlavne výpočtom statických funkcionálov zemskej tiaže, prípadne neumožňujú použitie najnovších riešení mesačných GGM alebo zadanie vlastného časového intervalu dát. Výpočtové centrum služby ICGEM (International Center for Global Gravity Field Models) obsahuje nástroj na určenie *EWT*, výpočet však treba vykonať pre každý mesiac zvlášť, čo je časovo veľmi zdĺhavé. V tejto práci bol preto zvolený taký prístup k výpočtu *EWT*, ktorý využíva modifikovaný zdrojový kód softvéru GrafLab (Bucha a Janák, 2013) a umožňuje automatizáciu výpočtu požadovanej veličiny.

VÝSLEDKY

Hodnoty *EWT* boli určené z mesačných GGM pre celú Zem, s pravidelným krokom 0,5° v zemepisnej šírke a dĺžke. Pri výpočte bolo použité riešenie RL06 vypracované spracovateľským centrom CSR filtrované dekorelačným filtrom DDK2, s maximálnym stupňom sférických harmonických koeficientov 96. Riešenie bolo vybrané na základe predchádzajúcich porovnaní všetkých riešení s nezávisle určenými hodnotami *EWT*, a najviac vyhovovalo povodiam v stredných zemepisných šírkach so stredne veľkými amplitúdami sezónnych zmien. Ďalším spracovaním boli v prostredí softvéru MATLAB z globálneho gridu vyselektované iba také body, ktoré sa nachádzajú vnútri polygónu definujúceho hranice povodia rieky Dunaj.

Hranice povodia Dunaj rieky boli získané z on-line databázy *Interactive Database of the World´s River Basins* (CEO Water Mandate, 2016) vo formáte **.shapefile* a znázornené sú na Obr. 3.

Obrázok 3. Znázornenie hraníc povodia rieky Dunaj.

Figure 3. Boundaries of Danube river basin.

Pre každý vybraný bod bola z mesačných hodnôt *EWT* individuálne vypočítaná jeho priemerná hodnota EWT_{mean} a následne mohol byť určený rozdiel mesačnej hodnoty voči priemernej *ΔEWT*. V poslednom kroku boli z rozdielových mesačných hodnôt výpočtových bodov nachádzajúcich sa vo vnútri povodia vypočítané priemerné mesačné hodnoty celého povodia.

Vypočítané mesačné hodnoty z povodia rieky Dunaj sme porovnali s globálnym hydrologickým modelom WGHM (WaterGAP Global Hydrology Model), ktorý poskytuje mesačné výšky kontinentálneho vodného stĺpca pre kontinenty, s výnimkou Antarktídy, s rovnakým rozlíšením 0,5° (Döll a kol., 2002). Pri výpočte model využíva meteorologické dáta v mesačných intervaloch o množstve zrážok, počte dní z mesiaca v ktorých pršalo, priemerný počet slnečných hodín a ďalšie (Döll a kol., 2002).

Obdobie v ktorom máme k dispozícií dáta z družicovej misie GRACE, a zároveň dáta z modelu WGHM, trvá od roku 2002 do 2009. Priemerná veľkosť rozdielov v tomto období dosahuje hodnotu 3,5 mm a štandardná odchýlka je na úrovni 30,8 mm. Je však potrebné uvedomiť si fakt, že tak ako v prípade postupu využívajúceho dáta družicovej misie GRACE, aj v prípade modelu WGHM, nie sú hodnoty *EWT* priamo monitorované, ale počítané z iných sprostredkujúcich veličín a preto nemôžeme tieto dáta považovať za referenčné, ale len ako testovacie dáta získané nezávislou metódou. Z Obr. 5 si môžeme všimnúť, že okrem rokov 2004 a 2005, kedy sú rozdiely pomerne zreteľné, obe riešenia veľmi dobre súhlasia vo veľkosti amplitúd a umiestnení hodnôt na časovej osi. V oboch riešeniach dosahujú amplitúdy sezónnych zmien veľkosť okolo 10 cm. Maximálne hodnoty dosahujú v zimných mesiacoch na prelome rokov a minimálne hodnoty naopak, v letných mesiacoch.

Priemerné mesačné hodnoty povodia *ΔEWT* boli následne porovnané s analýzami Medzinárodného centra pre ochranu povodia rieky Dunaj (ICPDR) a ďalšími štúdiami (Blöschl a kol., 2016), pričom všetky významné hydrologické udalosti, ktoré sa sa udiali v rokoch 2002 až 2017, dokázala družicová misia GRACE zaznamenať.

Z vypočítaných hodnôt *ΔEWT* bolo následne možné vyselektovať maximá a minimá v každom roku a tiež mesiac, v ktorom sa v danom roku vyskytli. Selekcia bola vykonaná len pre roky 2003 až 2016, nakoľko zber dát v rokoch 2002 a 2017 neprebiehal počas celého roka. Roky 2003 a 2012 boli v oblasti povodia rieky Dunaj charakteristické nadpriemernými teplotami a podpriemerným ročným úhrnom zrážok, dôsledkom čoho sa v roku 2003 v tejto oblasti vyskytli najhoršie suchá (Obr. 4) od roku 1840 (Cogen, 2015).

Výrazné maximá hodnôt, ktoré môžeme vidieť na Obr. 4 prislúchajúce mesiacom rokov 2002, 2006, 2010 a 2013 zas korešpondujú so záplavami ku ktorým došlo na území povodia Dunaja. Rok 2006 bol dokonca špecifický tým, že zvýšená hladina v mnohých prítokoch Dunaja spôsobila, že v jeho centrálnej a dolnej časti toku došlo k prekročeniu hladiny tzv. storočnej vody (Wachter, 2007).

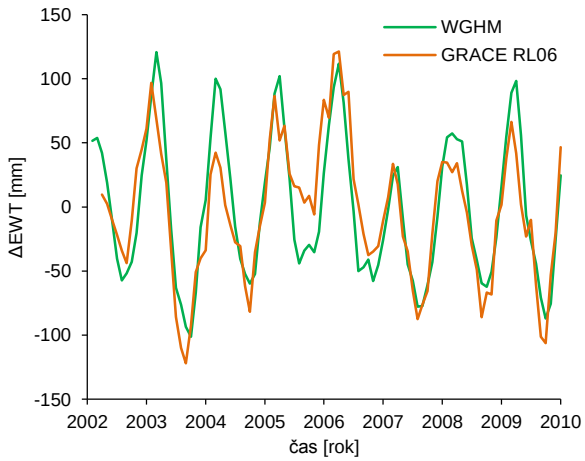
Tabuľka 1. Maximá a minimá ΔEWT povodia rieky Dunaj v rokoch 2003 až 2016

Table 1. Annual maxima and minima of ΔEWT in Danube river basins from 2003 to 2016

Rok	Maximum		Minimum	
	ΔEWT [cm]	Mesiac	ΔEWT [cm]	Mesiac
2003	9,7	Február	-12,2	September
2004	4,2	Marec	-8,2	Október
2005	8,7	Marec	-0,6	November
2006	12,1	Apríl	-3,8	Október
2007	3,4	Marec	-8,8	August
2008	3,5	Január	-8,6	September
2009	6,6	Marec	-10,6	Október
2010	8,6	Marec	-0,2	September
2011	10,1	December	-7,9	Október
2012	2,5	Marec	-13,3	September
2013	8,1	Apríl	-5,5	Október
2014	3,1	Máj	-1,7	August
2015	7,2	Marec	-10,7	September
2016	4,6	Marec	-4,6	August

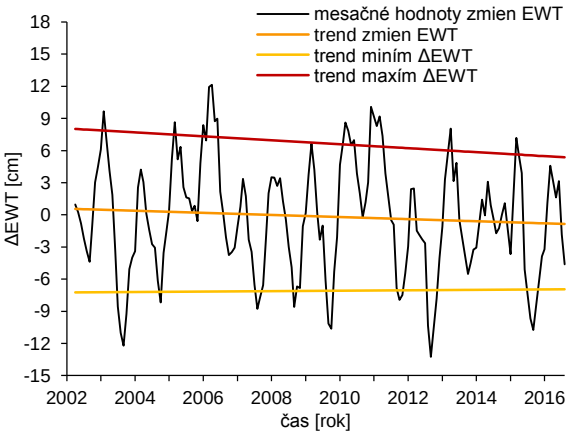
Obrázok 4. Priemerné mesačné hodnoty ΔEWT povodia rieky Dunaj v rokoch 2003 až 2009.;

Figure 4. Average monthly values of ΔEWT for Danube river basin during the years 2003 – 2009.



Obrázok 5. Znázornenie časového radu GRACE RL06 a regresnej priamky.

Figure 5. Graphical representation of GRACE RL06 time series and computed linear trend.



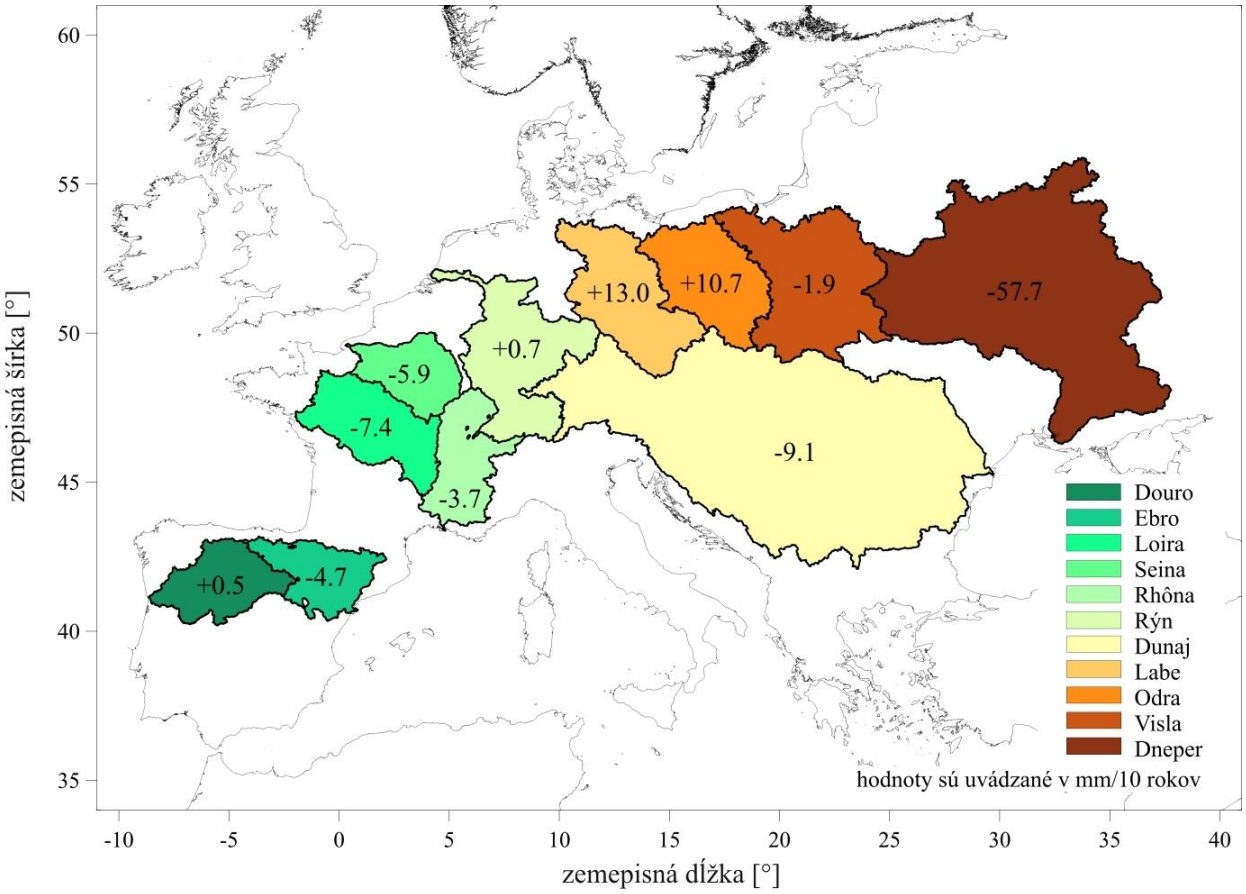
Použitím lineárnej regresie boli pomocou metódy najmenších štvorcov určené parametre regresnej priamky, ktorá charakterizuje dlhodobý trend hodnôt ekvivalentnej výšky vodného stĺpca v rokoch 2002 až 2017 (Obr. 5). Zo smernice odhadnutej funkcie regresnej priamky bola následne určená hodnota ročného poklesu hladiny kontinentálnej vody v povodí 9,1 mm za 10 rokov. Takýmto spôsobom boli spracované aj minimálne a maximálne ročné hodnoty *ΔEWT* pre povodie rieky Dunaj (Tab. 1). Trendy boli vykreslené v grafe na Obr. 5 a vidíme, že ročné maximá, rovnako ako mesačné zmeny *EWT*, vykazujú klesajúci charakter, zatiaľ čo ročné minimá majú naopak stúpajúci trend.

Rovnaký výpočtový postup bol následne aplikovaný na vybrané európske povodia. Celkovo bolo vybraných 11 najväčších európskych povodí, a to: Dunaj, Dneper, Rýn, Visla, Labe, Odra, Loira, Rhôna, Duoro, Ebro a Seina (Obr. 6), pre ktoré sme odhadli lineárny trend zmien *EWT* za obdobie rokov 2002 až 2017. Zo smerníc regresných priamok pre jednotlivé povodia bola pre každé z uvedených povodí určená hodnota zmeny za 10 rokov.

Na Obr. 6 si môžeme všimnúť, že veľkosti odhadnutých desaťročných zmien *EWT* v európskych povodiach sa pohybujú rádovo v jednotkách až desiatkach milimetrov. Z toho môžeme usúdiť, že na území Európy v rokoch 2002 až 2017 nedochádzalo k výraznejším zmenám v množstve kontinentálnej vody. Je však potrebné uvedomiť si, že vzhľadom na rozlohu jednotlivých povodí predstavuje aj veľkosť úbytku 1 mm za rok obrovské množstvo vody, ktoré z danej oblasti ročne odchádza.

Obrázok 6. Znázornenie priemerných 10 ročných zmien výšky EWT vo vybraných európskych povodiach.

Figure 6. Average 10-year changes of EWT values in chosen European river basins.



Významný úbytok vody môžeme pozorovať v šiestich európskych povodiach riek Ebro, Loira, Seina, Dunaj a Dneper. Najväčší ročný úbytok kontinentálnej vody bol zistený pre povodie rieky Dneper, kde dosahuje až hodnotu 5.8 mm za rok, čo je veľkosťou skoro o rád viac ako je to pri ostatných povodiach. Jedným z možných dôvodov tak veľkého úbytku vody v danej oblasti môže byť zvyšovanie poľnohospodárskej produktivity na Ukrajine, a s tým súvisiace čerpanie vodných zdrojov (Ladychenko a kol., 2019). Pri povodiach riek Douro, Labe a Wisla pozorujeme malý ročný prírastok alebo úbytok, ktorý ale z hľadiska presnosti určenia nepovažujeme za významný. Pri povodiach riek nachádzajúcich sa v severnej časti strednej Európy - Odra a Labe môžeme naopak pozorovať významný ročný nárast v množstve kontinentálnej vody.

Rovnako ako v prípade povodia rieky Dunaj, aj v prípade ostatných európskych povodí boli určené ročné minimá a maximá hodnôt *ΔEWT* a mesiace, v ktorých sa vyskytujú. Pre každé povodie bol na základe výsledkov analýzy určený mesiac, v ktorom najčastejšie dochádza k výskytu maximálnych a minimálnych odchýliek hodnôt *EWT*. Určené mesiace sa nachádzajú v Tab. 2. Vidíme, že výskyt ročných miním *ΔEWT* v zásade (s výnimkou povodia Seiny) nastáva v približne rovnakom období ako pri povodí Dunaja. Ročné maximá v prípade povodí situovaných západnejšie od povodia rieky Dunaj, ale aj pri povodí rieky Labe, nastávajú o mesiac skôr.

Tabuľka 2. Mesiace s najčastejším výskytom ročných miním a maxím ΔEWT riešených povodí v rokoch 2003 až 2016.

Table 2. Months with the most frequent occurrence of annual ΔEWT minima and maxima in chosen European river basins during the years 2003 – 2016.

Povodie	Maximum	Minimum
Dunaj	Marec	September
Dneper	Marec	Október
Visla	Marec	September
Labe	Február	September
Odra	Marec	September
Rhôna	Marec	September/Október
Seina	Február	August
Ebro	Február	September
Douro	Február	September
Loira	Február	September
Rýn	Február/Marec	September

Výsledky pre európske povodia sa zatiaľ nejavia ako alarmujúce, no je potrebné si uvedomiť, že dlhodobý úbytok vody 49 mm za 10 rokov v povodí riek Ganga - Brahmaputra (Novák a Korekáčová, 2019) spôsobil, že množstvo ľudí v Indii v súčasnosti čelí nedostatku pitnej vody. Je to v dôsledku toho, že veľká časť kontinentálnej vody je obsiahnutá v zložke podzemnej vody, ktorá v Indii predstavuje jeden z hlavných zdrojov pitnej vody, no zároveň je nadmerne čerpaná pre potreby poľnohospodárstva a priemyslu. Monitorovanie zmien množstva kontinentálnej vody pomocou družicovej misie GRACE môže priniesť včasné varovanie pre niektoré oblasti, aby bolo aspoň čiastočne obmedzené čerpanie podzemnej vody, ktoré je v mnohých oblastiach väčšie ako je rýchlosť jej dopĺňania v zásobníkoch.

ZHRNUTIE VÝSLEDKOV

Výsledky družicovej misie GRACE priniesli nové možnosti monitorovania časových variácií tiažového poľa Zeme. Porovnaním mesačných globálnych geopotenciálnych modelov môžeme pozorovať krátkodobé zmeny tiažového poľa Zeme, ktoré sú spôsobené najmä presunmi kontinentálnych hydrologických hmôt. Inverziou zmien tiažového poľa Zeme dokážeme určiť zmeny vo výške kontinentálneho vodného stĺpca, ktorý je v článku označovaný ako hodnota *EWT* (Equivalent Water Thickness). Tá v sebe zahŕňa všetky zložky kontinentálnej vody ako podzemnú vodu, vodu riek a jazier, vodu v podobe ľadu a snehu a vodu obsiahnutú v rastlinách.

V dôsledku obmedzených existujúcich možností výpočtu *EWT* sme zvolili nový prístup, ktorý spočíval v modifikácií zdrojového kódu softvéru GrafLab. Mesačné hodnoty získané použitím nového prístupu boli porovnané s globálnym hydrologickým modelom WGHM v povodí rieky Dunaj. Na základe porovnania v rokoch 2002 až 2009, kde máme k dispozícií dáta z družicovej misie GRACE a zároveň z modelu WGHM, bola stanovená štandardná odchýlka 3,1 cm a priemerná hodnota rozdielov 3,5 mm. Vypočítané hodnoty sú charakteristické sezónnymi zmenami s ročnou periódou a kopírujú prítomnosť ročných období. Veľkosť amplitúd sezónnych zmien sa pohybuje okolo 10 cm, pričom maximá nadobúdajú v zimných mesiacoch, na prelome rokov a minimá v letných mesiacoch. Rovnako je možné spätne vidieť prítomnosť povodní, ktoré sa vyskytli v povodí Dunaja v rokoch 2002, 2006, 2010 a 2013 a tiež suchá, ktoré postihli oblasť v rokoch 2003 a 2012. Použitím regresnej analýzy sme určili lineárny trend hodnôt *EWT*, ktorý poukazuje na ročný úbytok množstva kontinentálnej vody v povodí Dunaja o veľkosti 9,1 mm za 10 rokov.

Aplikáciou rovnakého výpočtového postupu na 10 ďalších európskych povodí boli odhadnuté ich priemerné hodnoty ročných prírastkov, resp. poklesov výšky kontinentálneho vodného zdroja. Celkovo šesť z jedenástich vybraných povodí v Európe vykazuje významný klesajúci trend v množstve kontinentálnej vody, pričom najvýraznejší pokles hladiny bol zaznamenaný v povodí rieky Dneper, pravdepodobne v dôsledku nadmerného čerpania podzemnej vody pre účely poľnohospodárstva. Pri troch povodiach bola veľkosť určených ročných prírastkov alebo úbytkov kontinentálnej vody na úrovni presnosti ich určenia, preto ich nepovažujeme za významné. Z celkových jedenástich európskych povodí iba dve dlhodobo vykazujú nárast v množstve kontinentálneho vodného zdroja. Monitorovanie zmien množstva kontinentálnej vody pomocou družicovej misie GRACE môže priniesť včasné varovanie pre oblasti, v ktorých sa podzemná voda v nadmernej miere využíva na priemyselné alebo poľnohospodárske účely, a predísť úplnému vyčerpaniu zásob podzemnej vody, čím by časť obyvateľstva prišla o jediný zdroj pitnej vody.

Úspešnosť družicovej misie GRACE vyústila v roku 2018 do rozhodnutia americkej agentúry NASA a nemeckého výskumného centra GFZ vypustiť na obežnú dráhu dvojicu družíc misie Gravity Recovery And Climate Experiment – Follow On (GRACE-FO), ktorej cieľom je

pokračovať v činnosti mapovania časových zmien tiažového poľa Zeme. Družice sú vybavené identickým prístrojovým vybavením ako v prípade družicovej misie GRACE, no sú doplnené experimentálnym zariadením, ktoré má byť prínosom v určovaní vzájomnej vzdialenosti budúcich generácií družíc programu GRACE. Jedná sa o laserový interferometer, ktorý má v dôsledku vyššej frekvencie lasera potenciál priniesť spresnenie určovanej vzájomnej vzdialenosti, a tým aj spresnenie modelov tiažového poľa Zeme (NASA, 2017).

LITERATÚRA

Bucha, B.–Janák, J., A MATLAB-based graphical user interface program for computing functionals of the geopotential up to ultra-high degrees and orders: Efficient computation at irregular surfaces. Computers & Geosciences [online]. 2014, 66, 219 – 227 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.02.005. ISSN 00983004.

Blöschl, G.–Szolgay, J.–Parajka, J.–Kohnová, S.–Miklánek, P., 2016, Thematic Issue on Floods in the Danube basin - Processes, patterns, predictions. Journal of Hydrology and Hydromechanics. 64. 10.1515/johh-2016-0043.

Buis, A., Grace Mission: 15 Years of Watching Water on Earth, NASA/JPL, Feature 2017-070, March 15, 2017, URL: https://grace.jpl.nasa.gov/news/89/grace-mission-15-years-of-watching-water-on-earth/.

CEO Water Mandate, 2016, Interactive Database of the World's River Basins. Web http://ceowatermandate.org/riverbasins.

Cogen, M., 2015, International Commission for the Protection of the Danube River (ICPDR) [online] [cit. 21. október 2019]. ISBN 978-1-4724-4571-1; 978-1-4724-4570-4. Dostupné na: https://www.icpdr.org/main/issues/droughts

Dahle, Ch. a kol., GFZ GRACE Level-2 Processing Standards Document for Level-2 Product Release 0005: Scientific Technical Report STR12/02 - Data. Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences, 2013. DOI: 10.2312/ GFZ.b103 -1202- 25. ISSN 1610-0956.

Ditmar, P.–Teixeira da Encarnação, J.–Hashemi Farahani H., Understanding data noise in gravity field recovery on the basis of inter-satellite ranging measurements acquired by the satellite gravimetry mission GRACE. Journal of Geodesy [online]. 2012, 86(6), 441-465 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1007/s00190-011-0531-6. ISSN 0949-7714.

Döll, P.–Lehner, B.–Kaspar, F., 2002, Global modeling of groundwater recharge. In: Schmitz, G.H. (ed.): Proceedings of Third International Conference on Water Resources and the Environment Research, Technical University of Dresden, Germany, ISBN 3-934253-17-2, Vol. I, 27 – 31.

Frappart, F.–Ramillien, G., 2018, Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review [online]. 1. jún 2018. B. m.: MDPI AG. Dostupné na: doi:10.3390/rs10060829.

Gleeson, T.–Richter, B., 2016, How much groundwater can we pump and protect environmental flows through time? Presumptive standards for conjunctive management of aquifers and rivers. River Research and Applications, 34(1), 83 – 92. https://doi.org/10.1002/rra.3185.

Grabs, W.E., The State of Hydrological Observation Networks [online]. World Meteorological Organization [cit.2019-10-21]. Dostupné z: http://earth.esa.int/hydrospace07/ participants/84231/pres_84231.pdf.

Graham, Nigel, 1999, Guidelines for Drinking-Water Quality, 2nd edition, Addendum to Volume 1 – Recommendations, World Health Organisation, Geneva, 1998, 36 pp. Urban Water [online]. 1999, roč. 1, č. 2, s. 183 [cit. 22. október 2019]. ISSN 14620758. Dostupné na: doi:10.1016/s1462-0758(00)00006-6.

Godah, W.–Szelachowska, M.–Krynski, J., 2015, On the selection of GRACE-based GGMs and filtering method for estimating mass variations in the system earth over Poland. Geoinf Issues 7(1(7)):5 – 14.

Hirji, R.–Mandal, S.–Pangare, G. (Eds.), 2017, South Asia Groundwater Forum: Regional Challenges and Opportunities for Building Drought and Climate Resilience for Farmers, Cities, and Villages, New Delhi, India: Academic Foundation, 116 pp.

Janák, J., Comparison of GRACE monthly gravity field solutions. Proceedings from Geodesy, Cartography and Geoinformatics 2019 in press.

Kusche, J., 2007, Approximate decorrelation and non-isotropic smoothing of time-variable GRACE-type gravity field models. Journal of Geodesy [online]. 2007, 81(11), 733 – 749 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1007/s00190-007-0143-3. ISSN 0949-7714.

Kusche, J.–Schmidt, R.–Petrovic, S.–Rietbroek, R., 2009, Decorrelated GRACE time-variable gravity solutions by GFZ, and their validation using a hydrological model. Journal of Geodesy [online]. 2009, 83(10), 903-913 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1007/s00190-009-0308-3. ISSN 0949-7714.

Ladychenko, V.–Yara, O.–Golovko, L.–Serediuk, V., Groundwater Management in Ukraine and the EU. European Journal of Sustainable Development (2019), 8, 1, 31 – 39, ISSN 2239-5938

NASA, 2017, GRACE-FO Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On Tracking Earth´s Mass in Motion. [cit. 2019-04-18] Dostupné z: https://gracefo.jpl.nasa.gov/system/downloadable_items/19_GRACE_FO_Mission_Brochure_508.pdf.

Nielsen, J.–Tscherning, C.C.–Jansson, T.R.N.–Forsberg, R., Development and User Testing of a Python Interface to the GRAVSOFT Gravity Field Programs. KENYON, Steve, Maria Christina PACINO a Urs MARTI, ed. Geodesy for Planet Earth [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012, 2012-7-26, 443 – 449 [cit. 2019-05-08]. International Association of Geodesy Symposia. DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1_53. ISBN 978-3-642-20337-4.

Margat, J.–Gun, J., 2013, Groundwater around the World. London: CRC Press, https://doi.org/10.1201/b13977.

Novák, A.–Korekáčová, B., Monitorovanie úbytku vody vo vybraných regiónoch pomocou globálnych modelov tiažového poľa družicovej misie GRACE. In: Zborník súťažných prác mladých odborníkov 2019 [elektronický zdroj]: Bratislava, 14.11.2019. 1. vyd. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, 2019, CD-ROM, [12] s. ISBN 978-80-99929-03-7.

Ramillien, G.–Famiglietti, J.S.–Wahr, J., Detection of Continental Hydrology and Glaciology Signals from GRACE: A Review. Surveys in Geophysics [online]. 2008, 29(4-5), 361 – 374 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1007/s10712-008-9048-9. ISSN 0169-3298.

Rodell, M.–Famiglietti, J.S., Detectability of variations in continental water storage from satellite observations of the time dependent gravity field. Water Resources Research [online]. 1999, 35(9), 2705-2723 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1029/1999WR900141. ISSN 00431397.

Tapley, B.D.–Bettadpur S.–Watkins, M.–Reigber, C., The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. Geophysical Research Letters [online]. 2004, 31(9), n/a-n/a [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1029/2004GL019920. ISSN 00948276.

Wahr, J.–Molenaar M.–Bryan, F., Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. Journal of Geophysical Research: Solid Earth [online]. 1998, 103(B12), 30205-30229 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1029/98JB02844. ISSN 01480227.

Wahr, J., 2015, Time-Variable Gravity from Satellites. Treatise on Geophysics [online]. Elsevier, 193 – 213 [cit. 2019-04-18]. DOI: 10.1016/B978-0-444-53802-4.00065-8. ISBN 9780444538031.

ŠTATISTIKA ZRÁŽKOVÝCH EPIZÓD AKO VSTUP ANALYTICKO-PRAVDEPODOBNOSTNÝCH MODELOV MODROZELENEJ INFRAŠTRUKTÚRY

MILAN ONDERKA[1,2], JOZEF PECHO[2,4], JAKUB MÉSZÁROS[3]

[1] *Ústav vied o Zemi Slovenskej akadémie vied, Dúbravská cesta 9, 840 05 Bratislava, milan.onderka@savba.sk*
[2] *Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava*
[3] *Ústav hydrológie, Slovenská akadémia vied, Dúbravská cesta 9, 840 05Bratislava*
[4] *Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského, Mlynská dolina, 842 48 Bratislava*

Intensive rainfall and long periods of drought are becoming increasingly frequent and widespread phenomena in Slovakia and are expected to have a severe impact on urban infrastructure in the coming decades. Blue-green infrastructure has the potential to alleviate this problem by providing an alternative source of water or a sink for excess surface runoff. Storing rain water for later use or simply letting it infiltrate into the soil may reduce vulnerability of individual properties and even the whole cities to precipitation extremes. However, the design values and subsequently the overall operation of blue-green infrastructure ultimately depend on the local rainfall regime. The probabilistic-analytical approach is gaining on popularity in the design of blue-green infrastructure. In this paper, we present statistics of selected event-based rainfall characteristics that are applicable as as input parameters in probabilistic-analytical models of blue-green infrastructure. The event-based statical properties of rainfall such as duration, depth, inter-event time and annual event incidence of an average rainfall episode along with the Minimum Inter-event Time were estimated for 83 rain gauges in Slovakia. Statistically independent events were identified and separated from 1-minute rainfall data covering the period 1991 – 2009.

V mestskom prostredí tvorí modrozelenú infraštruktúru všetko od mestskej zelene, vsakovacích priekop, dažďových záhrad až po retenčné nádrže, teda v skutočnosti to, čo pomáha absorbovať, zdržiavať a zachytávať dažďovú vodu a zmierňovať povrchový odtok. Modozelená infraštruktúra pozitívne ovplyvňuje mestskú mikroklímu hlavne počas horúcich letných dní. Intenzívna zrážková činnosť a obdobia dlhotrvajúceho sucha sú čoraz častejšie vyskytujúcimi sa javmi aj na Slovenku. Očakáva sa, že takýto vplyv klimatických zmien na celkovú mestskú infraštruktúru sa v nasledujúcich desaťročiach ešte viac zvýrazní. Technické riešenia navrhnuté na zachytávanie dažďovej vody majú potenciál tento problém aspoň čiastočne zmierniť, pokiaľ sa použijú ako alternatívny zdroj vody pre mestskú modrozelenú infraštruktúru v časoch sucha, alebo ako spôsob odľahčenia stokovej siete počas krátkodobých intenzívnych zrážok. Zahraničné skúsenosti ukazujú, že zachytávanie dažďovej vody za účelom jej neskoršieho využitia, alebo jej zasakovaním do pôdy, môže aspoň čiastočne znížiť ohrozenie jednotlivých nehnuteľností a dokonca aj celých mestských štvrtí pred ničivými dôsledkami extrémnych zrážok. Aplikácia všetkých vodozádržných opatrení však v konečnom dôsledku závisí od lokálneho režimu zrážok. V tomto článku sme sa zamerali na analyticko-pravdepodobnostný prístup pri navrhovaní a dimenzovaní vodozádržných opatrení, ktorý získava na popularite hlavne v zahraničí. Prinášame krátky prehľad aplikácií analyticko-pravdepodobnostných modelov použiteľných pri návrhu vodozádržných opatrení v urbanizovanom prostredí (napr. retenčné dažďové nádrže, dažďové záhrady, zelené strechy, vsakovacie jamy a rigoly a pod.). V príspevku sa ďalej zaoberáme hodnotami vstupných parametrov analyticko-pravdepodobnostných modelov (bodové odhady a ich priestorové rozloženie), ktoré sme vypočítali z jednotlivých štatisticky nezávislých zrážkových epizód. Ide o parametre ako priemerná doba trvania zrážkovej epizódy, priemerný zrážkový úhrn zrážkovej epizódy, priemerná doba medzi dvomi zrážkovými epizódami, ročná (resp. sezónna) početnosť zrážkových epizód, a nakoniec tzv. „Minimum Inter-event Time" (prekl. Minimálna doba medzi epizódami), ktorá je nevyhnutná na identifikáciu a následnú separáciu jednotlivých štatisticky nezávislých zrážkových epizód. Prezentované mapové výstupy bodových odhadov boli vytvorené z pozorovaní v 83 zrážkomeroch v rámci klimatologickej siete SHMÚ. Štatisticky nezávislé zrážkové epizódy boli odseparované z 1-minútových časových radov zrážok pokrývajúcich obdobie rokov 1990 – 2009.

Key words: blue-green infrastructure, water retention measures, probabilistic-analytical models, rainfall

ÚVOD

Do pojmu modrozelená infraštruktúra môžeme zahrnúť všetko od vsakovacích priekop, vegetačných striech, dažďových záhrad, detenčných nádrží až po mestskú zeleň – inými slovami všetko, čo pomáha absorbovať a zachytávať dažďovú vodu. Modrozelená infraštruktúra súčasne pozitívne ovplyvňuje mestskú mikroklímu hlavne počas horúcich letných dní. Intenzívna zrážková činnosť a obdobia dlhotrvajúceho sucha sú čoraz častejšie vyskytujúcimi sa javmi v našich zemepisných šírkach (Svoboda a kol., 2016). Očakáva sa, že takýto vplyv klimatických zmien na celkovú mestskú infraštruktúru sa v nasledujúcich desaťročiach ešte viac zvýrazní. Zachytávanie dažďovej vody má potenciál tento problém aspoň čiastočne zmierniť, pokiaľ sa zachytené zrážky použijú ako alternatívny zdroj vody pre mestskú zeleň v časoch sucha, alebo ako spôsob odľahčenia stokovej siete počas krátkodobých intenzívnych zrážok. Zahraničné skúsenosti dokazujú, že zachytávanie dažďovej vody za účelom jej neskoršieho využitia, alebo jej zasakovaním do pôdy, môže znížiť ohrozenie jednotlivých nehnuteľností a dokonca aj celých mestských štvrtí pred

ničivými dôsledkami extrémnych zrážok. Viaceré štúdie už dnes dokazujú, že technické opatrenia navrhnuté na zber dažďovej vody majú potenciál sa stať alternatívnym zdrojom vody pre mestskú modrozelenú infraštruktúru (Behzad a kol., 2020; Zhang a kol., 2020; Rahman a kol. 2014; Becciu a kol., 2018; Tammaddun a kol., 2018), prostriedkom zmierňovania a spomaľovania odtoku zrážkovej vody z intenzívnych zrážok (Tamagnone et al., 2020), a v prípade zelených striech aj opatrením na zlepšenie energetickej efektívnosti budov (Guo a kol., 2016). V podmienkach Slovenska sa v poslednom období problematikou modrozelenej infraštruktúry zaoberali štúdie Csicsaiová a Stanko (2019), Csicsaiová a kol. (2019), Hrudka a kol, Lukáčová a kol. (2018 a, b), Csicsaiová (2018), Rusnák a kol. (2018) a Stanko a kol. (2019). Ako vyplýva aj z vyššie uvedených prác, technické opatrenia na zachytávanie zrážkovej vody umožňujú nielen znížiť zaťaženosť stokových sietí, ale aj zabezpečiť vodu pre rôzne ďalšie formy jej využitia, ako je napríklad zavlažovanie mestskej zelene, splachovanie verejných toaliet a pod. Je prirodzeným záujmom investorov a majiteľov budov, aby sa zrážkové vody z povrchového odtoku nevypúšťali priamo do verejnej stokovej siete, lebo vtedy možno ušetriť na poplatkoch za stočné. V rozvinutom svete sa zrážková voda zachytená zo striech budov čoraz viac používa aj v domácnostiach a na závlahu mestských záhrad a parkov, čím sa šetria jednak náklady na vodu a zároveň sa chránia dostupné zdroje kvalitnej pitnej vody z verejných vodovodov. Treba spomenúť, že obyvatelia rozvojových krajín používajú dažďovú vodu aj na základné prežitie vrátane priameho konzumu, varenia a sanity.

Pri návrhu vodozádržných opatrení v urbanizovanom prostredí je možné využiť niekoľko prístupov (Semaan et al., 2020). Ako prvé je potrebne spomenúť tradičné deterministické modely, ako napr. model SWMM – „Storm Water Management Model“, navrhnutý Agentúrou pre životné prostredie v USA. Aplikácia tohto modelu pri návrhu zelených striech je opísaná v práci Alfredo a kol. (2010). Ďalším prístupom pri návrhu vodozádržných opatrení sú štatistické metódy založené na koncepte čiar intenzít a trvania dažďa (tzv. IDF krivky). Tretia skupina metód je založená na simuláciách kontinuálnej bilancie vody s použitím časových radov zrážok a odtoku (Rahman a kol., 2014; Semaan a kol., 2020). Nevýhodou prístupu simulácií je potreba spracovania dlhých časových radov zrážok, ktorých dostupnosť je pre bežného projektanta obmedzená. Posledná skupina metód zahŕňa analyticko- pravdepodobnostné metódy. V podmienkach Slovenska je dostupnosť návrhových hodnôt zrážok, resp. parametrov analyticko-pravdepodobnostných modelov pre projekčnú činnosť limitovaná. V súčasnosti väčšina projektov modrozelenej infraštruktúry vychádza zväčša z nemeckých technických noriem DWA A-138 „Návrh, výstavba a prevádzka vsakovacích zariadení dažďových vôd“, a DWA A-117 „Dimenzovanie retenčných nádrží“, prípadne z českej technickej normy ČSN 75 9010 „Vsakovací zařízení srážkových vod“. V týchto normách sa vplyv zrážok (trvanie a intenzita) na dimenzovanie určuje pomocou tzv. IDF kriviek, počítaných pre konkrétnu lokalitu a pre požadovanú periodicitu opakovania (Bara a kol., 2010; Šamaj a Valovič, 1973). Ako alternatívu k hore uvedeným postupom sa v tomto článku venujeme hodnoteniu vstupných parametrov pre analyticko-pravdepodobnostné metódy návrhu modrozelených projektov. Stručný prehľad literatúry pojednávajúcej práve o analyticko-pravdepodobnostných metódach spolu s ich aplikáciami v praxi je uvedený v Tab. 1.

Pravdepodobnostné modely uvedené v Tab. 1 vyžadujú vstupné parametre založené na poznaní štatistiky zrážkových epizód, ako je priemerná dĺžka dažďovej epizódy, priemerný zrážkový úhrn pripadajúci na jednu epizódu, priemerný čas medzi po sebe nasledujúcimi epizódami, a priemerný výskyt epizód za uvažované obdobie. Je známe, že lokálne klimatické pomery, topografia záujmového územia spolu s nadmorskou výškou výrazne ovplyvňujú štatistické charakteristiky zrážok. Semaan a kol. (2020) upozornil, že z pohľadu optimálneho fungovania technických opatrení určených na záchyt dažďovej vody je potrebné hlavne správne dimenzovanie retenčného objemu zberných nádrží. Objem zberných nádrží je v prvom rade ovplyvnený požadovaným stupňom zabezpečenosti, t.j. schopnosti vodozádržného opatrenia plniť svoju funkciu za rôznych meteorologických podmienok. Napríklad autori Guo a kol. (2007), definujú stupeň zabezpečenosti ako percentuálny podiel času, počas ktorého je zberná nádrž na dažďovú vodu zo strechy schopná plniť požiadavky na denné objemy odberu vody z nej určené na závlahu záhrad. Je zrejmé, že dimenzovanie zberných nádrží je potrebné posúdiť pre širokú škálu meteorologických podmienok, t.j. pre obdobia výdatnej zrážkovej činnosti, ale aj dlhé obdobia sucha. Cieľom tejto štúdie je jednak poskytnúť krátky prehľad alternatívnych spôsobov (analytických pravdepodobnostných modelov vyvinutých v zahraničí) pre dimenzovanie a optimalizáciu rôznych technických riešení modrozelenej infraštruktúry, a následne zhodnotiť štatistiku nezávislých zrážkových epizód na údajoch zo Slovenska, ktoré v týchto modeloch vystupujú ako vstupné parametre.

Tabuľka 1. Prehľad využitia stochastického a analyticko pravdepodobnostného modelovania vodozádržných opatrení v zahraničí.

Table 1. Overview of the stochastic and analytical-probabilistic modelling of water retention measures applicated in listed references.

Autor	Aplikácia
Raimondi & Becciu (2014)	Viacúčelové využitie nádrží na dažďovú vodu
Alfredo a kol., 2010	Zelené strechy
Bacchi a kol. (2008)	Dažďové detenčné nádrže
Becciu a kol. (2018)	Dažďové detenčné nádrže
Guo a kol. (1998)	Odtok zo spevnených plôch
Guo a kol. (1999)	Protipovodňové poldre
Guo a kol. (2001)	Zasakovacie jamy
Guo a kol. (2007)	Zberné nádrže na dažďovú vodu
Guo a Boetz (2014)	Zavlažovací systém pre zelené strechy
Guo a kol. (2016)	Zelené strechy
Zhang a kol. (2014)	Bioretenčné systémy
Raimondi a kol. (2020)	Optimalizácia závlah vegetačných striech
Raimondi a Becciu (2017)	Efektívnosť odstránenia polutantov v detenčných nádržiach
Becciu a Raimnondi (2015)	Zdržná doba dažďovej vody v detenčných nádržiach

Pokiaľ je nám známe, v podmienkach Slovenska doposiaľ sa uskutočnila a publikovala iba jedna štúdia zameraná na návrh modrozelenej infraštruktúry pomocou analyticko-pravdepodobnostného prístupu (Onderka a kol, 2020). Aktuálnosť problematiky návrhových hodnôt pre projekty na budovanie dažďových záhrad, zelených striech, zberných systémov na zadržanie zrážkovej vody je nesporná.

Celkovým zámerom tejto štúdie je poskytnúť čiastočný prehľad alternatívnych prístupov k modelovaniu, resp. návrhu modrozelenej infraštruktúry pomocou analyticko-pravdepodobnostných metód oproti klasickým postupom založených na odhade intenzite a trvaní dažďa. Cieľom tohto článku je štatisticky zhodnotiť zrážkové záznamy z 83 zrážkomerov v rámci klimatologickej siete SHMÚ na Slovensku a z odseparovaných štatisticky nezávislých zrážkových epizód z obdobia rokov 1991 – 2009 odhadnúť stredné návrhové hodnoty parametrov (priemerná dĺžka dažďovej epizódy, priemerný zrážkový úhrn pripadajúci na jednu epizódu, priemerný čas medzi po sebe nasledujúcimi epizódami, a priemerný výskyt epizód za uvažované obdobie), použiteľných ako vstup do analyticko-pravdepodobnostných modelov používaných pre návrh modrozelenej infraštruktúry.

MATERIÁLY A METÓDY

Použité údaje a pozorovacia sieť

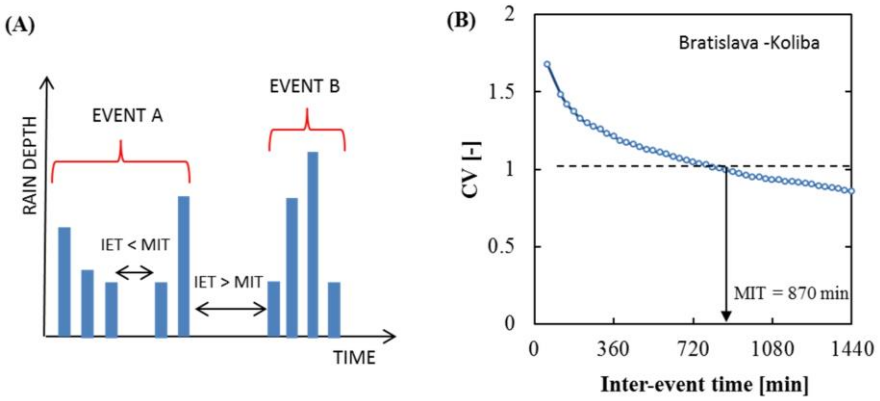
Údaje o zrážkach analyzované v tomto článku boli získané z databáz Slovenského hydrometeorologického ústavu za obdobie rokov 1991 – 2009. V predmetnej štúdii sme využili sieť ombrografov typu Metra 890-IBA československej výroby. Merania zrážok na väčšine ombrografov sa v štátnej sieti SHMÚ ukončili rokom 2009. Po roku 2009 sú merania zrážok robené automatickými stanicami, preto nebolo možné spracovať ombrografické záznami až po rok 2019, a nadpájanie časových radov získaných z ombrografov s automatikou by viedlo k nehomogenitám. Analyzovali sme digitalizované 1-minútové ombrografické záznamy zrážok z teplej časti roka (apríl – október) v 83 klimatologických staniciach nachádzajúcich na celom území Slovenska v širokom rozsahu nadmorských výšok. Najnižšie položená je stanica Somotor (97 m n.m.) a najvyššie položená je stanica Štrbské pleso v nadmorskej výške 1322 m n.m. Údaje z niektorých zrážkomerov pokrývali v niektorých rokoch aj mesiace marec a november, čo nám umožnilo spracovať údaje jednak pre celú teplú časť roka a následne zvlášť pre tri ročné obdobia definované ako jar: marec-apríl-máj; leto: jún-júl-august, jeseň: september-október-november. V prípade, ak údaje za mesiace marec a október neboli k dispozícii, hodnotenie jarnej a jesennej sezóny boli zredukované na mesiace apríl a máj, resp. iba na september a október, v prípade ak údaje z novembra neboli k dispozícii.

Separácia štatistiky nezávislých zrážkových epizód a odhad štatistických parametrov

Určenie minimálnej doby medzi zrážkovými epizódami (tzv. Minimum Inter-Event Time) je prvým nevyhnutným krokom na identifikáciu a separáciu štatisticky nezávislých zrážkových epizód a pre následný odhad štatistických charakteristík dažďa. Minimálna doba medzi epizódami (MIT), ako je pôvodne definovaná v štúdii autorov Restrepo a Eagleson (1982), sa vzťahuje na bezzrážkové obdobie medzi dvoma po sebe nasledujúcimi dažďovými epizódami (Wang et al., 2019). Dve po sebe nasledujúce zrážkové epizódy sa považujú za jednu epizódu, ak sú bezzrážkové obdobia medzi dvoma zrážkovými epizódami kratšie ako je hodnota MIT (Obr. 1). Ak je obdobie bez zrážok dlhšie ako MIT, tak sa takéto dažďové epizódy považujú za štatisticky nezávislé. Postup výberu epizód je založený na predpoklade, že časy medzi dažďovými epizódami majú exponenciálne rozdelenie (Restrepo a Eagleson, 1982). Ak je trvanie zrážkovej epizódy oveľa kratšie ako čas medzi epizódami, systém sa správa podľa Poissonovho procesu. Pri exponenciálnom rozdelení sú priemerná hodnota a štandardná odchýlka zhodné, a preto sa odhadovaný variačný koeficient času (CV) medzi zrážkovými epizódami (MIT) musí približovať svojou hodnotou k jedna, keďže variačný koeficient je definovaný ako pomer štandardnej odchýlky a priemernej hodnoty.

Obrázok. 1. a) Separácia nezávislých zrážkových epizód (IET: Inter-Event Time; MIT: Minimum Inter-Event Time); b) určenie MIT pre stanicu Bratislava-Koliba. CV označuje variačný koeficient definovaný ako pomer štandardnej odchýlky časov medzi epizódami a ich priemernými hodnotami.

Figure 1.
a) Separation of independent rainfall episodes (IET: Inter-Event Time; MIT: Minimum Inter-Event Time); b) definition of MIT for the raingauge at Bratislava-Koliba. CV stands for the coefficient of variation.



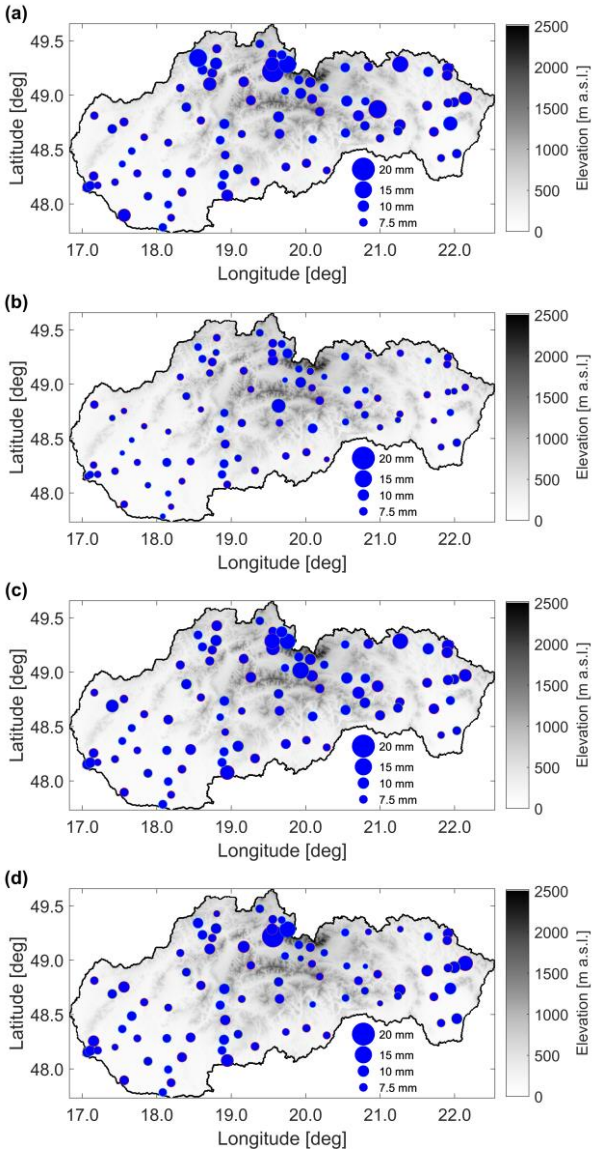
Celý postup separácie nezávislých zrážkových epizód je založený na priraďovaní hodnôt MIT z intervalu očakávaných hodnôt, až kým sa variačný koeficient hodnoty MIT priblíži k hodnote jedna (Bedient et al., 2008). Za účelom stanovenia minimálneho času medzi zrážkovými epizódami (MIT) bol pre každú klimatologickú stanicu vytvorený interval MIT s 20-minútovým inkrementom (od 2 hodín do 48 hodín). Interval 2 – 48 hodín pokrýva očakávané hodnoty MIT. Tento interval sme zvolili na základe rešerše zameranej na hodnoty MIT v iných častiach sveta, na základe ktorej sme zvolili interval očakávaných hodnôt 2 – 48 hodín (napr. Wang et al., 2019; Restrepo a Eagleson, 1982).

Každú nezávislú zrážkovú epizódu možno charakterizovať jej štatistickými charakteristikami, napr. celkový úhrn zrážok, doba trvania zrážkovej epizódy, doba medzi zrážkovými epizódami, čas od začiatku epizódy k vrcholu a maximálna intenzita zrážok (Wang et al., 2019; Dunkerley 2008, 2015). Na účely tejto štúdie sme pre každú klimatologickú stanicu vypočítali priemernú dobu trvania epizódy, priemernú hodnotu úhrnu a priemernú dobu medzi dvoma po sebe nasledujúcimi nezávislými zrážkovými epizódami z množiny odseparovaných štatisticky nezávislých zrážkových epizód. Interval medzi dvoma po sebe nasledujúcimi nezávislými zrážkovými epizódami je v tomto článku definovaný ako čas, ktorý uplynul medzi koncom predchádzajúcej dažďovej epizódy a začiatkom aktuálnej dažďovej epizódy. Doba trvania epizódy je čas, počas ktorého epizóda trvá. Celkový úhrn pripadajúci na jednu zrážkovú epizódu je stanovený kumulatívne ako množstvo dažďa, ktoré bolo zaznamenané v zrážkomere medzi začiatkom a koncom epizódy.

VÝSLEDKY A DISKUSIA

Štatisticky nezávislé zrážkové epizódy boli odseparované z časových radov zrážok z 83 zrážkomerných staníc. Celkovo sme identifikovali a odseparovali viac ako 72 000 zrážkových epizód, z čoho vyše 33 000 epizód sme identifikovali pri analyzovaní údajov z celej teplej časti roka, vyše 18 000 epizód bolo identifikovaných a separovaných na údajoch z jarného obdobia (M-A-M), vyše 30 000 epizód v lete (J-J-A), a viac ako 21 000 epizód z údajov zaznamenaných počas jesene (S-O-N). Jednotlivé zrážkové epizódy sme použili pre výpočet dlhodobých štatistických charakteristík zrážok, ako sú priemerná doba trvania zrážkovej epizódy, priemerný úhrn počas epizódy a priemerná doba medzi epizódami pre každú jednu stanicu zvlášť. Empirické odhady priemerného úhrnu zrážok počas jednej epizódy, priemernej doby trvania epizódy a priemernej doby medzi epizódami sú uvedené na Obr. 2 – 4. Priemerné hodnoty incidencie štatisticky nezávislých zrážkových epizód pre celú teplú časť roka sú zobrazené na Obr. 5. Priestorové rozloženie bodových odhadov minimálnej doby potrebnej na odseparovanie štatistiky nezávislých zrážok (MIT) je zobrazené na Obr. 6.

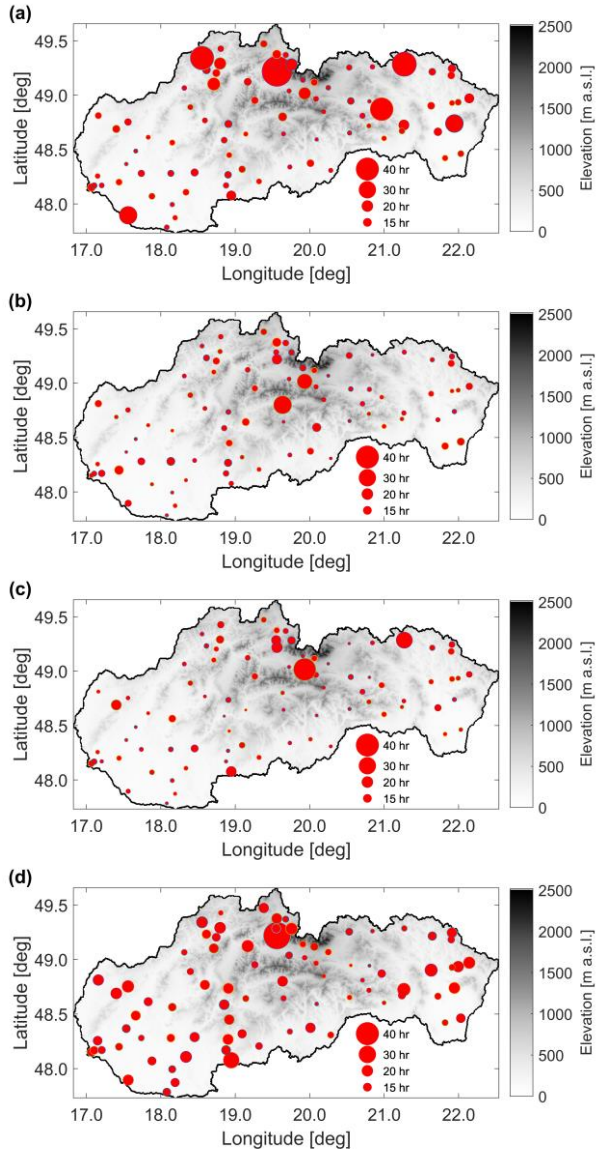
Ako príklad empirických odhadov spracovania zrážkových epizód v konkrétnej stanici uvádzame hodnoty pre zrážkomernú stanicu Bratislava-Koliba v Tab. 2. Priemerný úhrn jednej zrážkovej epizódy v stanici Bratislava-Koliba v jarnom období je 6,4 mm, zatiaľ čo v letnom období jedna zrážková epizóda má priemerný úhrn už 8,9 mm a priemerný výskyt zrážkových epizód je 24,1 krát za letnú sezónu. Najnižší výskyt zrážkových epizód v rámci roka je na jeseň (12,9 epizód) a na jar (13,9 epizód). Štatistická nezávislosť po sebe nasledujúcich zrážkových udalostí dosiahnutá pri použití minimálnej doby medzi zrážkovými epizódami (MIT) je 13 hodín v prípade jarnej sezóny, 15 hodín v lete a 18,5 hodín v jesennom období. Rovnako priemerné trvanie jednej epizódy sa predlžuje od jari po jeseň od 9,4 až 14,6 hodín, čo je možné vysvetliť zmenou pôvodu zrážok počas roka (stratiformné zrážky vs. konvektívne zrážky).



Obrázok 2. Priestorové rozloženie priemerného úhrnu zrážok pripadajúcich na jednu štatisticky nezávislú zrážkovú epizódu; sezónne priemery pre celú teplú časti roka (a) a obdobia jar (b), leto (c) a jeseň (d). Hodnoty sú uvedené v milimetroch.

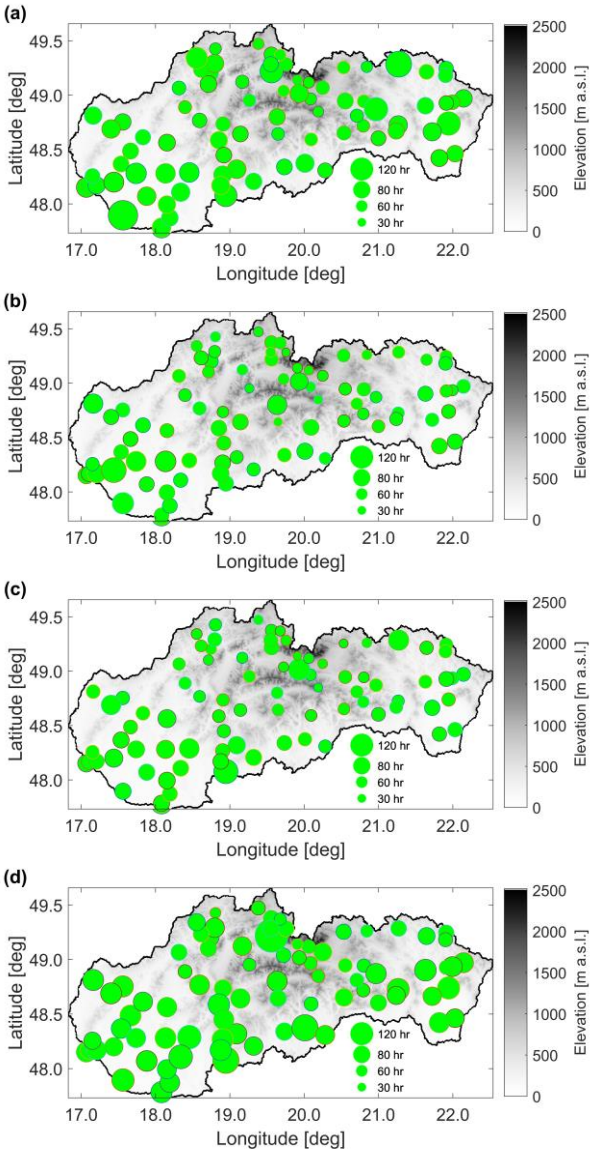
Figure 2. Average precipitation depth during a statistically independent rainfall episode within the whole warm part of the year (a), and seasonal average values calculated for the springtime (b), summertime (c) and the fall season (d).

Celková štatistika počítaná zo všetkých analyzovaných zrážkomerných staníc je uvedená v Tab. 3, ktorá čiastočne poukazuje aj na priestorovú variabilitu štatistických charakteristík dažďových epizód určených pre jednotlivé analyzované zrážkomerné stanice. Z rozptylu hodnôt na Obr. 2 – 4 vyplýva, že každá zrážkomerná stanica vykazuje špecifickosť z hľadiska počítaných štatistických charakteristík. Ako príklad vplyvov sezónnosti možno uviesť hodnoty trvania zrážkových epizód, ktoré sa menia v závislosti od ročného obdobia a vykazujú veľkú variabilitu medzi stanicami s koeficientom variácie 0,6 v letnom období (Tab. 3). V priemere za všetky analyzované zrážkomerné stanice na Slovensku je priemerná dĺžka trvania jednej epizódy v lete 9,2 hodín a 14,6 hodín na jeseň. Ročné hodnoty MIT sa v analyzovaných zrážkomerných staniciach pohybujú od 8 hodín do 45 hodín s priemerom 17,2 hodín. Tieto hodnoty sa javia byť realistické v porovnaní s hodnotami vypočítanými inde vo svete. Napríklad, autori Restrepo a Eagleson (1982) odhadli hodnoty MIT pre rôzne klimatické zóny, pričom ich odhady MIT sa pohybovali od jednej hodiny v Columbii po 9 hodín v Ohiu, USA, a až 132 hodín pre Saudskú Arábiu. Guo a Baetz (2007) prezentovali hodnotu 10 hodín pre Chicago a 12 hodín pre Phoenix, čiže pre dve klimaticky kontrastné miesta v kontinentálnej časti USA.



Obrázok 3. Priestorové rozloženie doby trvania zrážok pripadajúcich na jednu štatisticky nezávislú zrážkovú epizódu; sezónne priemery pre celú teplú časti roka (a) a obdobia jar (b), leto (c) a jeseň (d). Hodnoty sú uvedené v hodinách.

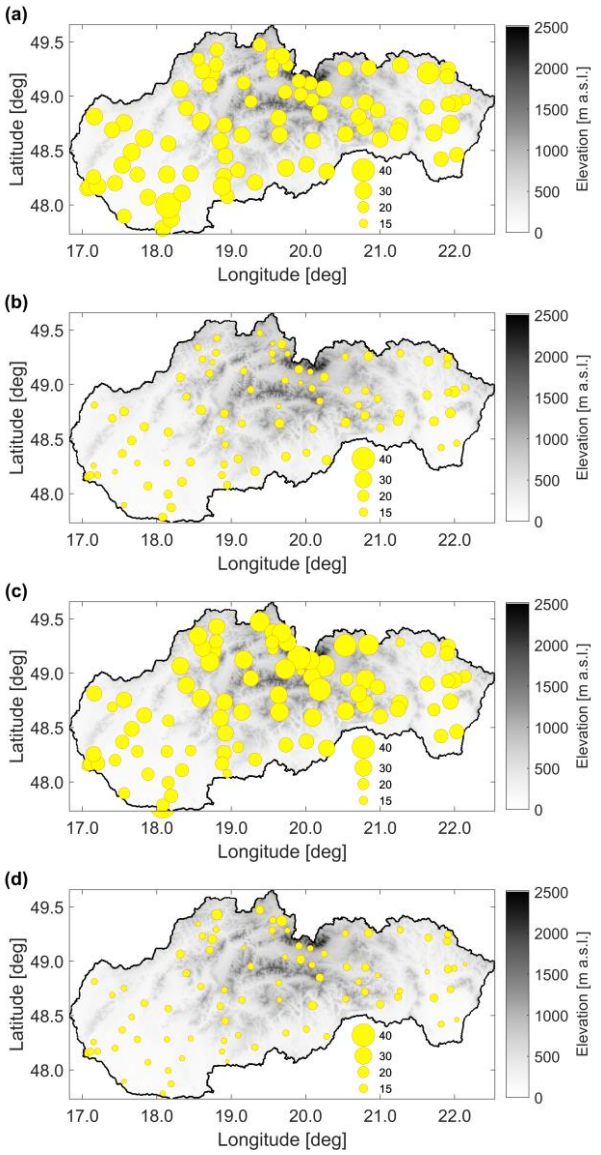
Figure 3. Average duration of statistically independent rainfall episodes within the whole warm part of the year (a), and seasonal average values calculated for the springtime (b), summertime (c) and the fall season (d).



Obrázok 4. Priestorové rozloženie trvania bezzrážkového obdobia medzi dvomi po sebe idúcimi štatisticky nezávislými zrážkovými epizódami; sezónne priemery pre celú teplú časti roka (a) a obdobia jar (b), leto (c) a jeseň (d). Hodnoty sú uvedené v hodinách.

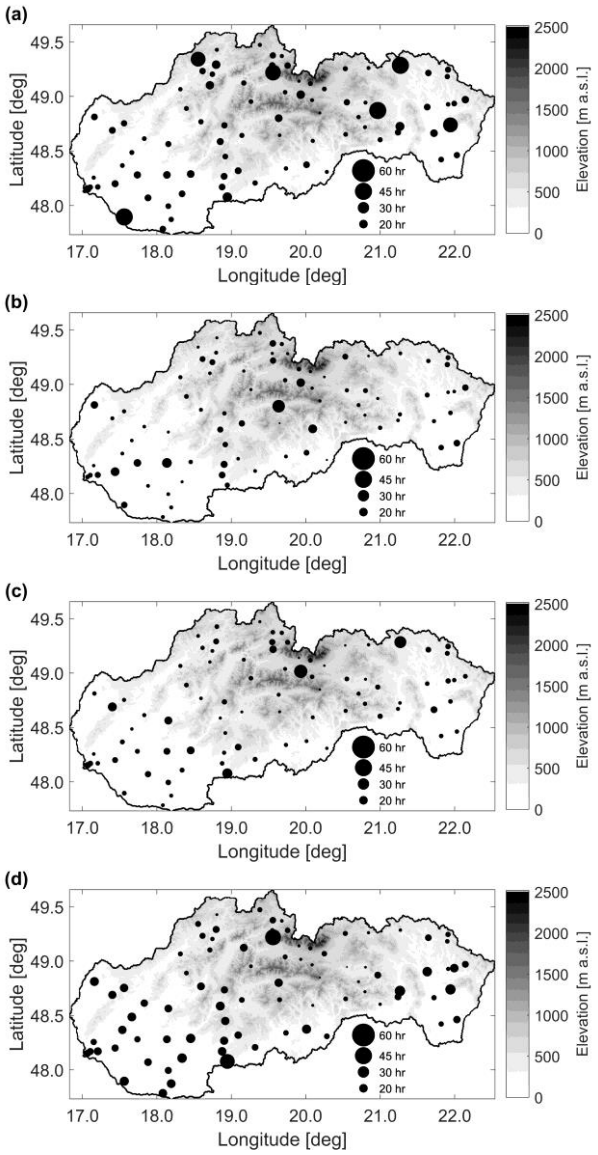
Figure 4. Inter-event time between two successive statistically independent rainfall episodes within the whole warm part of the year (a), and seasonal average values calculated for the springtime (b), summertime (c) and the fall season (d).

Autori Wang et al. (2019) vo svojej nedávnej práci identifikovali hodnoty MIT v monzúnovom regióne Číny v rozmedzí od 7,6 hodiny do 16,6 hodín. Guo a Boetz (2014) odhadli, že MIT v semiaridnej oblasti štátu Montana v USA a vo vlhkej subtropickej časti Georgie je 8 hodín. Naše výsledky (Tab. 3) naznačujú, že priemerné hodnoty MIT odrážajú miestnu klímu a sú špecifické pre každú lokalitu. Pokiaľ je nám známe, v stredoeurópskom prostredí sa neuskutočnila žiadna analýza hodnôt MIT, ktorá by sa špecificky zameriavala aj na sezónnosť MIT. Okrem ročných hodnôt (v teplej časti roka), v tejto práci prezentujeme vypočítané hodnoty MIT separátne aj pre tri ročné obdobia. Napríklad, na jar (M-A-M) je priemerná hodnota MIT pre všetky stanice 12,4 hodín, respektíve 12,8 hodín pre obdobie leta (J-J-A). Na jeseň priemerná hodnota MIT dosahuje svoje sezónne maximum 16,9 hodín. Túto sezónnu variabilitu je možné vysvetliť odlišnou genézou dažďa (stratiformné vs. konvekčné zrážky). Najvyššie stredné hodnoty zrážkových úhrnov na jednu epizódu sa vyskytujú v lete, keď je priemerná hodnota pre všetky stanice 8,6 mm (Tab. 3). Je zrejmé, že aj incidencia nezávislých zrážkových epizód vykazuje výraznú sezónnosť. Najvyšší výskyt zrážkových epizód je pozorovaný v lete, keď priemerná hodnota stanovená zo všetkých staníc je 27 epizód za letnú sezónu.



Obrázok 5. Priestorové rozloženie incidencie štatisticky nezávislých zrážkových epizód; sezónne priemery pre celú teplú časti roka (a) a obdobia jar (b), leto (c) a jeseň (d). Hodnoty udávajú početnosť za zvolené obdobie.

Figure 5. Incidence of statistically independent rainfall episodes within the whole warm part of the year (a), and seasonal average values calculated for the springtime (b), summertime (c) and the fall season (d).



Obrázok 6. Priestorové rozloženie minimálnej doby medzi zrážkovými epizódami (Minimum Inter-Event Time) potrebného na odseparovanie štatisticky nezávislých zrážkových epizód; sezónne priemery pre celú teplú časť roka (a) a obdobia jar (b), leto (c) a jeseň (d). Hodnoty sú uvedené v hodinách.

Figure 6. Spatial coverage of Minimum Inter-Event time within the whole warm part of the year (a), and seasonal average values calculated for the springtime (b), summertime (c) and the fall season (d).

Tabuľka 2. Hodnoty priemerného úhrnu zrážkovej epizódy, priemernej doby trvania epizódy, priemernej doby medzi epizódami, priemerného výskytu (incidencia) zrážkových epizód a MIT určené na základe údajov zo zrážkomernej stanice Bratislava-Koliba (Zra_ind: 17140; zemepisná šírka: 48,16778; zemepisná dĺžka: 17,10611, nadmorská výška: 283 m n.m).

Table 2. Average volume of rainfall episodes, average duration of rainfall episodes, average incidence and MIT calculated for the raingauge at Bratislava-Koliba.

	Úhrn epizódy [mm]	Trvanie epizódy [h]	Doba medzi epizódami [h]	Výskyt [-]	MIT [h]
Teplá časť roka	8,0	10,3	83,3	30,1	14,5
Jar	6,4	9,4	82,4	13,9	13,0
Leto	8,9	10,2	81,6	24,1	15,0
Jeseň	8,8	14,6	92,4	12,9	18,5

Tabuľka 3. Štatistika priemerného úhrnu epizódy, priemernej doby trvania epizódy, priemernej doby medzi epizódami, priemerného výskytu (incidencia) zrážkových epizód a MIT zo všetkých analyzovaných zrážkomerných staníc.

Table 3. Statistics of the average precipitation totals of rainfall episodes, average duration of rainfall episodes, average inter-event time between successive episodes, incidence of rainfall episides and MIT. The statistics were calculated from all analyzed raingauges.

		Úhrn epizódy [mm]	Trvanie epizódy [h]	Doba medzi epizódami [h]	Výskyt [-]	MIT [h]
Celá teplá časť roka (jar-leto-jeseň)	Minimum	6,2	7,0	52,1	18,0	8,0
	Maximum	18,8	52,4	156,0	44,3	45,0
	Priemer	8,8	13,4	86,2	27,7	17,2
	Smer. odchýlka	2,3	8,3	18,4	3,5	8,0
	Medián	8,2	10,9	85,0	27,7	16,0
	P25	7,5	9,0	73,9	25,9	12,5
	P75	9,0	13,2	96,5	29,4	18,0
	Koeficient variácie	0,3	0,6	0,2	0,1	0,5
Jar	Minimum	4,7	5,1	46,1	8,1	5,0
	Maximum	12,3	31,6	130,9	19,4	33,0
	Priemer	6,6	9,7	73,0	13,4	12,4
	Smer. odchýlka	1,1	4,0	15,6	2,3	4,7
	Medián	6,4	8,5	71,3	13,1	11,0
	P25	5,9	7,4	62,8	12,0	9,5
	P75	7,0	11,2	80,4	15,4	14,6
	Koeficient variácie	0,2	0,4	0,2	0,2	0,4
Leto	Minimum	6,2	4,9	45,9	13,9	6,5
	Maximum	14,8	39,0	127,7	41,2	35,0
	Priemer	8,6	9,2	73,1	27,0	12,8
	Smer. odchýlka	1,7	4,9	15,4	5,5	4,8
	Medián	8,3	8,2	70,8	26,9	12,0
	P25	7,6	6,7	62,8	23,9	10,4
	P75	9,4	10,3	81,4	30,8	14,0
	Koeficient variácie	0,2	0,5	0,2	0,2	0,4
Jeseň	Minimum	4,8	5,6	56,9	4,7	4,5
	Maximum	19,0	47,8	175,0	18,7	42,0
	Priemer	8,0	14,6	95,5	11,6	16,9
	Smer. odchýlka	2,0	5,7	19,8	2,2	6,7
	Medián	7,6	14,3	97,4	11,5	17,3
	P25	7,0	11,1	81,9	10,6	12,4
	P75	8,6	17,6	106,7	12,6	21,5
	Koeficient variácie	4,0	2,6	4,8	5,3	2,5

ZÁVER

Za najúčinnejšie opatrenia v boji proti prejavom klimatických zmien v mestách sa považuje zavádzanie, resp. rozširovanie už vybudovanej modrozelenej infraštruktúry a zlepšenie vodozádržných opatrení. Je zrejmé, že technická infraštruktúra sa nedá optimálne navrhnúť bez zohľadnenia lokálnych klimatických pomerov, a to hlavne režimu zrážok. V predloženej štúdii sme vyhodnotili digitalizované ombrografické záznamy z 83 zrážkomerných staníc na území Slovenska. Hlavným motívom tejto štúdie bolo identifikovať, separovať a následne štatisticky spracovať sériu nezávislých zrážkových epizód na Slovensku, za účelom odvodenia vstupných parametrov pre vybrané analytické pravdepodobnostné modely, ktoré sú použiteľné pri návrhu projektov modrozelenej infraštruktúry. Celkovo sme identifikovali viac ako 72 000 zrážkových epizód. Pre každú zrážkomernú stanicu sme zo separovaných epizód vypočítali priemernú dobu dažďovej epizódy, priemerný úhrn dažďovej epizódy, dobu medzi epizódami, výskyt epizód za zvolené obdobie (celá teplá časť roka, a zvlášť jar, leto, jeseň) a hodnotu MIT, ktoré sú použiteľné ako parametre analyticko-pravdepodobnostných modelov. Výsledky štatistického spracovania všetkých staníc poukazujú na vysokú mieru priestorovej a sezónnej variability analyzovaných parametrov. Výsledky našich analýz sú použiteľné v praxi, napríklad pri návrhu zberných nádrží na dažďovú vodu je možné použiť analyticko-pravdepodobnostný model autorov Guo a kol. (2007) s použitím parametrov zrážok, ktoré sme opísali v tomto článku. Prezentované charakteristiky dažďa majú mnohostranné využitie, napríklad pri návrhu vegetačných striech a optimalizáciu ich závlah (Raimondi a kol., 2020; Guo a Boetz, 2014), prípadne pri návrhu dažďových detenčných nádrží (Bacchi a kol., 2008, 2018), zberných nádob na dažďovú vodu (Onderka a kol., 2020), protipovodňových poldrov (Guo a kol., 1999), alebo zasakovacích priekop (Guo a kol., 2001). V tejto práci boli prezentované bodové odhady návrhových hodnôt zrážok pre vybrané analyticko-pravdepodobnostné modely. Prezentované výsledky vychádzajú z údajov z obdobia rokov 1991 – 2009, preto je pochopiteľné, že v budúcnosti bude potrebné tieto analýzy aktualizovať s použitím novších údajov o zrážkach získaných z väčšieho počtu automatických zrážkomerných staníc. Príklady aplikácie prezentovaných štatistík, napríklad pri návrhu vegetačných striech, plánujeme publikovať v blízkej budúcnosti.

Poďakovanie

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.

LITERATÚRA

Alfredo, K.–Montalto, F.–Goldstein, A., 2010, Observed and modeled performances of prototype green roof test plots subjected to simulated low- and high-intensity precipitations in a laboratory experiment. Journal of Hydrology, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000135, 444 – 457.

Bacchi, B.–Balistrocchi, M.–Grossi, G., 2008, Proposal of a semi-probabilistic approach for storage facility design. Urban Water Journal, 5, 3, 195 – 208.

Bara, M.–Gaál, L.–Kohnová, S.–Szolgay, S.–Hlavčová, K., 2010, On the use of the simple scaling of heavy rainfall in a regional estimation of IDF curves in Slovakia. Journal of Hydrology and Hydromechanics. 58(1), 49 – 63, doi: 10.2478/v10098-010-0006-0.

Becciu, G.–Raimondi, A., 2015, Retention times of storm water detention facilities. Procedia Engineering 119,1299 – 1307. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.951.

Becciu, G.–Raimondi, A.–Dresti, C., 2018, Semi-probabilistic design of rainwater tanks: a case study in Northern Italy. Urban Water Journal, 15, 3, 192 – 199.

Bedient, P.B.–Huber, W.C.–Vieux, B.E., 2008, Hydrology and floodplain analysis. Published by Prentice Hall, ISBN 13>0-13-242285-7, 373 s.

Behzad, J.–Bach, P.M.–Deletic, A., 2020, Rainwater harvesting for urban flood management-An integrated modelling framework. Water Research 171, 115372.

Csicsaiová, R.–Stanko, Š., 2019, Redukcia dažďového prítoku do jednotnej stokovej siete pomocou podpovrchových vsakovacích zariadení. In: Juniorstav 2019 [elektronický zdroj]: sborník příspěvků. 21. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí. Brno, ČR, 31. 1. 2019 = Juniorstav 2019, proceedings of the 21st International Conference of Doctoral Students. 1. vyd. Brno: ECON publishing, 2019, USB kľúč, 384 – 388. ISBN 978-80-86433-71-4.

Csicsaiová, R.,2018, Redukcia dažďového prítoku do stokovej siete pomocou umelých infiltračných zariadení. In: Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj]: 28th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 24th 2018, Bratislava. 1. vyd. Bratislava: Spektrum STU, 2018, CD-ROM, 429 – 434. ISBN 978-80-227-4864-3.

Csicsaiovák, R.–Stanko, Š.–Marko, I.–Hrudka, J., 2019, Implementation of the percolation facilities for rainwater runoff reduction. In: Pollack Periodica. Vol. 14, No. 2, 201 – 210. ISSN 1788-1994 (2019).
V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85072226566 ;
DOI: 10.1556/606.2019.14.2.18.

Dunkerley, D., 2008, Rain event properties in nature and in rainfall simulation experiments: a comparative review with recommendations for increasingly systematic study and reporting. Hydrol. Process., 22, 4415 – 4435.

Dunkerley, D., 2015, Intra-event intermittency of rainfall: an analysis of the metrics of rain and no-rain periods. Hydrol. Process. 29, 3294 – 3305.

Guo, Y.–Baetz, B., 2014, Runoff reduction capabilities and irrigation of green roofs. Water Resources Management, 10.1007/s11269-014-0555-9.

Guo, Y., 2016, Stochastic analysis of hydrologic operation of green roofs. J. Hydrol. Eng. 21, 7, 04016016.

Guo, Y.–Adams, B.J., 1998, Hydrologic analysis of urban catchments with event-based probabilistic models 1. Runoff volume. Water Resources Research, 34, 12, 3421 – 3431.

Guo, Y.–Adams, B.J., 1999, An analytical probabilistic approach to sizing flood control detention facilities. Water Resources Research, 35, 8, 2457 – 2468.

Guo, Y.–Hughes, W., 2001, Storage volume and overflow risk for infiltration basin design. Journal of Irrigation and Drainage engineering. 170 – 175.

Hrudka, J.–Rusnák, D.–Červeňanská, M.–Soldánová, V., a kol., 2018, Analýza povrchového odtoku na území mesta Bratislava. In: Zborník prednášok z Konferencie mladých výskumníkov - KOMVY 2018 [elektronický zdroj]: Podhájska, SR, 17. – 19. 9. 2018. 1. vyd. Bratislava: Spektrum STU, CD-ROM, 55 – 62. ISBN 978-80-227-4847-6.

Lukáčová, K.–Csicsaiová, R.–Marko, I., 2018a, Zelená a modrá infraštruktúra: príležitosť pre vytváranie „smarter“miest? In: Zborník prednášok z Konferencie mladých výskumníkov - KOMVY 2018 [elektronický zdroj]: Podhájska, SR, 17. – 19. september 2018. 1. vyd. Bratislava: Spektrum STU, CD-ROM, 21 – 25. ISBN 978-80-227-4847-6.

Lukáčová, K.–Dubcová, M.–Holubec, M., 2018b, Vplyv zelených striech na urbanizované územie. In: Zborník prednášok z Konferencie mladých výskumníkov - KOMVY 2018 [elektronický zdroj]: Podhájska, SR, 17. – 19. September 2018. 1. vyd. Bratislava: Spektrum STU, 2018, CD-ROM, 85 – 91. ISBN 978-80-227-4847-6.

Rahman, S.–Khan, M.T.R.–Akib, S., 2014, Sustainability of rainwater harvesting system in terms of water quality. The Scientific World Journal. 2014: 721357.

Onderka, M.– Pecho, J.–Nejedlík, P., 2020, On how rainfall characteristics affect the sizing of rain barrels in Slovakia. Journal of Hydrology: Regional Studies, 32, doi: 10.1016/j.ejrh.2020.100747.

Raimondi A. and Becciu G., 2017, On the efficiency of stormwater detention tanks in pollutant removal. Int. J. Sus. Dev. Plann. 12(1), 144 – 154.

Raimondi, A.–Marchioni, M.–Sanfilippo, U.–Becciu, G., 2020, Vegetation Survival in Green Roofs without Irrigation. 10.20944/preprints202008.0172.v1.

Raimondi, A.–Becciu, G., 2014, Probabilistic Modeling of Rainwater Tanks. Procedia Engineering. 89. 1493 – 1499.

Restrepo, P.–Eagleson, P., 1982, Identification of Independent Rainstorms. Journal of Hydrology. 55. 303 – 319. 10.1016/0022-1694(82)90136-6.

Rusnák, D.–Stanko, Š.–Trošanová, M., 2018, Design rainfall analysis tool for urbanized areas in Slovak Republic. In: Pollack Periodica. Vol. 13, no. 2 (2018), 107 – 116. ISSN 1788-1994. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85050269281; doi: 10.1556/606.2018.13.2.11.

Semaan, M.–Day, S.D.–Garvin, M.–Ramakrishnan, N.–Pearce, A., 2020, Optimal sizing of rainwater harvesting systems for domestic water usages: A systematic literature review. Resources, Conservation & Recycling: X 6 (2020) 100033.

Stanko, Š.–Hrudka, J., 2019, Predpoklady moderných spôsobov znovuvyužívania dažďových vôd v urbanizovanom území. In: Rekonštrukcie stokových sietí a čistiarní odpadových vôd, zborník prednášok a posterov. Podbanské, 15. – 17. október 2019. 1. vyd. Bratislava: Výskumný ústav vodného hospodárstva, USB kľúč, 122 – 124. ISBN 978-80-89740-23-9.

Svoboda, V.–Hanel, M.–Máca, P.–Kyselý, J., 2016, Projected changes of rainfall event characteristics for the Czech Republic. J. Hydrol. Hydromech., 64, 4, 415 – 425.

Šamaj, F.–Valovič, Š., 1973, Intenzity krátkodobých dažďov na Slovensku. Zborník prác Hydrometeorologického ústavu v Bratislave, 5. s 84.

Tamagnone, P.–Comino, E.–Rosso, M., 2020, Rainwater harvesting techniques as an adaptation strategy for flood mitigation. Journal of Hydrology 586, 124880.

Tammaddun, K.–Kalra, A.–Ahmad, S., 2018, Potential of rooftop rainwater harvesting to meet outdoor water demand in arid regions . J Arid Land . 10(1): 68 – 83 https://doi.org/10.1007/s40333-017-0110-7.

Wang, W.–Yin, S.–Xie, Y.–Nearing, M.A., 2019, Minimum inter-event times for rainfall in the eastern monsoon region of China. American Society of Agricultural and Biological engineers. ISSN 2151-0032, Vol. 62, 1, 9 – 18.

Zhang, S.–Guo, Y., 2014., Stormwater capture efficiency of bioretention systems. Water Resour Manage., 28, 149 – 168.

POROVNANIE ZMIEN ÚZEMNÉHO VÝPARU VO VYBRANÝCH POVODIACH SLOVENSKA

ANITA KESZELIOVÁ

Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Radlinského 11, 813 68, Bratislava, Slovenská republika, anita.keszeliova@stuba.sk

Potential changes in the hydrological regime caused by the changing climate represent one of the sources of uncertainties in water resources management. In Slovakia, they may manifest themselves in a decrease in the abundance of water resources, a change in the seasonality of runoff, and an increase in the extremes of floods and droughts, as well as changes in the water content of the snowpack. The aim of the paper was to examine the possibilities of using the equation of the hydrological balance of a catchment over a long period to detect changes in total areal evapotranspiration under the conditions of a changing climate. The method is based on the application of general principles of estimating the hydrological balances of river basins, which analyse the relationship between water intakes and outflows and change of storage. We compare the estimate of the total areal evapotranspiration between two 25-year periods in four selected river basins. The applicability of gridded rainfall and air temperature data from the CarpatClim database for the hydrological balance over a longer period in a changing climate was also tested. The results document the impact of rising air temperatures and, in part, also of the areal precipitation on the increase of the total areal evapotranspiration, which, however may not be reflected in a decrease in runoff in all cases.

Potenciálne zmeny hydrologického režimu spôsobené meniacou sa klímou predstavujú jeden zo zdrojov neistoty v oblasti hospodárenia s vodnými zdrojmi. Na Slovensku sa môžu prejaviť poklesom výdatnosti vodných zdrojov, zmenou sezonality odtoku, zvýšením extrémnosti povodní a sucha, ako aj zmenou zásob vody v snehovej pokrývke. Cieľom príspevku bolo preskúmať možnosti využitia rovnice hydrologickej bilancie povodia za dlhé obdobie na detekciu zmien územného výparu v podmienkach meniacej sa klímy. Metóda je založená na aplikácii všeobecných princípov odhadu hydrologickej bilancie povodí, ktorá ukazuje vzťah medzi príjmami a výdajmi vody v povodiach a porovnáva odhad aktuálneho územného výparu medzi dvoma 25 ročnými obdobiami na štyroch vybraných povodiach. Cieľom tejto práce bolo aj testovať využiteľnosť gridových zrážkových údajov z databázy CarpatClim pre hodnotenie hydrologickej bilancie za dlhšie obdobie. Výsledky dokumentujú vplyv rastúcej teploty vzduchu a čiastočne aj úhrnov zrážok na zvyšujúci sa celkový výpar v povodí, čo sa ale nemusí všade prejaviť v poklese odtoku.

Key words: hydrological balance, actual evapotranspiration, CarpatClim

ÚVOD

Trvalo udržateľné využívanie vodných zdrojov v dnešnej dobe je čoraz výraznejším problémom ľudskej spoločnosti, ktorá je do veľkej miery závislá na dostupnosti vody. Vodné zdroje sú pritom ohrozované ako zmenou klímy, tak aj ľudskou činnosťou. Nedostatok vody sa preto považuje za vážny problém celého ľudstva (OSN, 2012). Globálne zmeny nepriamo ovplyvňujú, resp. menia aj tvorbu odtoku a hydrologický režim v mnohých častiach sveta (Bronstert et al., 2002). Stále je však pomerne málo kvantitatívne vyhodnocované, ako a v akej priestorovej mierke môžu tieto environmentálne zmeny ovplyvniť generovanie odtoku a hydrologický režim v povodiach SR (a následne tiež aj minimálne a povodňové prietoky v tokoch).

V hydrológií sme schopní hodnotiť možné dlhodobé zmeny odtoku, ako aj zmeny územného výparu pomocou rovnice hydrologickej bilancie. Podľa terminologickej normy (STN 75 0110) hydrologickú bilanciu definujeme ako vyhodnotenie prírastkov a úbytkov množstva vody a zmeny jej akumulácie vo vodnom útvare za zvolený časový interval. Podľa terminologického slovníka (Makeľ et al., 2002) výpar v rámci hydrologickej bilancie definujeme ako: „celkový výpar (*total evaporation)*, čo je prvok hydrologickej bilancie, opisujúci dlhodobý režim aktuálnej evapotranspirácie, ktorý sa stanovuje ako súbor štatistických charakteristík. Spravidla sa vzťahuje k územnej jednotke veľkosti povodia a k časovému úseku, napr. jeden rok. Synonymom pojmu sú klimatický výpar a územný výpar.“ Rovnicou sa v hydrológii vyjadruje zákon zachovania množstva vody v hydrologickom cykle vo vymedzenom priestore (najčastejšie povodie) za určitý zvolený časový interval (Szolgay et al., 1997). Ako najvhodnejšia priestorová jednotka sa volí najčastejšie povodie, v ktorom sa hodnotia objemy vody komponentov obehu vody v prírode za zvolený časový interval. Vyhodnotenie hydrologickej bilancie za dlhšie obdobie potenciálne umožňuje aj detegovať zmeny v odtokovom procese (Zhang et al., 2004).

Vzťah medzi prvkami vstupujúcimi do hydrologickej bilancie na vymedzenom území je možné vyjadriť jednoduchou rovnicou, ktorá môže byť stanovená podľa Szolgaya (2004) nasledovne:

$$Z+K+P_P+P_R+P_{PZ} = O_P+O_{PZ}+O_O+V+\Delta R, \qquad (1)$$

kde jednotlivé symboly reprezentujú tieto veličiny:

Z – sú vertikálne zrážky,

K – sú horizontálne (usadené) zrážky (kondenzácia vodnej pary, usadzovanie alebo namŕzanie malých kvapiek z hmly a z oblakov a pod.),
P_P – je povrchový prirodzený prítok vody do územia,
P_R – je prevod vody do územia,
P_{ZP} – je prirodzený podzemný prítok vody do územia,
O_P – je prirodzený povrchový odtok vody z územia,
O_{PZ}– je prirodzený podzemný odtok z územia,
O_O – sú odbery povrchovej a podzemnej vody prevedené mimo územia,
V – je celkový výpar vody z územia (aktuálny výpar ktorý zahrňuje všetky formy výparu vody a transpiráciu rastlín),
ΔR – zmena zásob vody v území za časový interval t.

Hodnoty členov bilančnej rovnice sú udávané v objemových jednotkách, alebo z nich odvodených výškových jednotkách (výška zrážok, odtoková výška). Ako územná jednotka sa najčastejšie volí povodie.

Členy P_R a O_O v rovnici vyjadrujú výsledok antropogénnej činnosti. Tieto môžeme pri rozbore prirodzenej hydrologickej bilancie považovať za známe. Podzemný prítok P_{PZ} a odtok O_{PZ} sa uplatňujú najmä vtedy, ak orografická rozvodnica povodia nie je totožná s hydrogeologickou, a ak záverečným profilom povodia neodteká celý objem podmieneného odtoku a ich príspevok do bilancie je vhodné individuálne posúdiť. Zvyčajne sa s nimi však neuvažuje (Parajka, 2001).

V hodnotení hydrologickej bilancie za dlhé obdobie (rádovo desaťročia) môžeme rovnicu zjednodušiť tak, že berieme do úvahy len zrážky a celkový výpar, teda tie hodnoty; ktoré v súčte za hodnotené obdobie výrazne prevyšujú zmeny zásob vody v povodí, ktoré preto zanedbávame.

Vyhodnotenie prírastkov a úbytkov množstva vody za dlhý (viacročný) časový interval je možné teda vyjadriť rovnicou, ktorá je stanovená nasledovne:

$$Z = O + V, \tag{2}$$

kde: Z sú atmosférické zrážky, O – odtok, V- výpar

Vydelením rovnice trvaním hodnoteného obdobia získavame rovnicu obsahujúcu dlhodobé priemerné hodnoty atmosférických zrážok na povodie, odtoku a celkového výparu z neho (Z, O, V). Členy bilančnej rovnice sú navzájom previazané, čo umožňuje nepriame určenie celkového výparu z povodia z úhrnu zrážok na povodie a z riečneho odtoku (Parajka, 2001).

Vzťah hydrologickej bilancie k charakteru povodia a ku klíme je výslednica komplexného systému procesov, ktoré pôsobia v rôznych priestorových a časových mierkach. Základom územného (celkového, klimatického) výparu sú zásoby vody v povodí, ktoré primárne závisia od zrážok, teploty vzduchu a fyzicko-geografických a hydrogeologických podmienok.

Hodnoty územného výparu nie sú merateľné, sú odhadnuteľné z jeho máp, ako napr.: rastrové mapy dlhodobých priemerných hodnôt potenciálneho výparu (napr. Parajka et al., 2004; Melo et al., 2013) alebo z výpočtov aktuálnej evapotranspirácie (Lapin et al., 2016) alebo práve z rovnice hydrologickej bilancie. Pritom faktom je, že pre vodný útvar povodie je len jediná spoľahlivo merateľná hodnota, a to je práve odtok (za predpokladu, že všetka voda z povodia preteká záverečným profilom toku), lebo úhrn zrážok spadnutých na povodie odvodzujeme z bodových (nie vždy najvhodnejšie rozmiestnených) lokálnych meraní (Parajka, 2001). Pre výpočet bilancie máme však u nás v priemere dostatočnú sieť zrážkomerných staníc.

Viaceré výsledky hodnotenia zmien prvkov hydrologického cyklu u nás naznačujú, že v poslednom období dochádza k zmene ich režimu (napr. Blaškovičová et al., 2019; Fendeková et al., 2018) a štatisticky sa dajú detegovať rôzne silné trendy v ich vývoji (napr. Lapin et al., 2016; Ďurigová et al., 2019). V práci sa v rámci prípadovej štúdie preto venujeme otázke, či je možné na detekciu potenciálnych zmien režimu odtoku využiť rovnicu hydrologickej bilancie. V práci navrhujeme analýzu hydrologickej bilancie s ročným časovým krokom v dvoch rovnako dlhých obdobiach s ich vzájomným porovnaním. Možný vplyv prebiehajúcej zmeny klímy paralelne hodnotíme aj pomocou lineárnych trendov v časových radoch jej troch komponentov a radoch priemernej teploty vzduchu v sledovaných povodiach, ktoré testujeme na tento účel zvyčajne používaným testom podľa Manna-Kendalla (napr. Ďurigová et al., 2019). Cieľom tejto práce bolo aj testovať využiteľnosť gridových zrážkových údajov pre odhad hydrologickej bilancie za dlhšie obdobie v podmienkach meniacej sa klímy.

Z dostupných gridových databáz pre naše územie sme zvolili voľne dostupnú databázu CarpatClim (Szalai et al., 2012) preto, lebo predpokladáme, že bude pre naše územie reprezentatívnejšia než iné, keďže vznikala v spolupráci krajín nášho regiónu a na jej príprave sa podieľala aj naša klimatologická obec (napr. Szalai et al., 2012). Ďalej sme sa zaoberali aj detekciou možných nedostatkov jej údajov pri sledovaní hydrologickej bilancie v dlhších časových radoch spôsobenou rozložením gridových bodov voči pilotným povodiam a potenciálne aj priestorovou interpoláciou zrážok v horskom teréne metódou MISH (Szentimrey a Bihary, 2007).

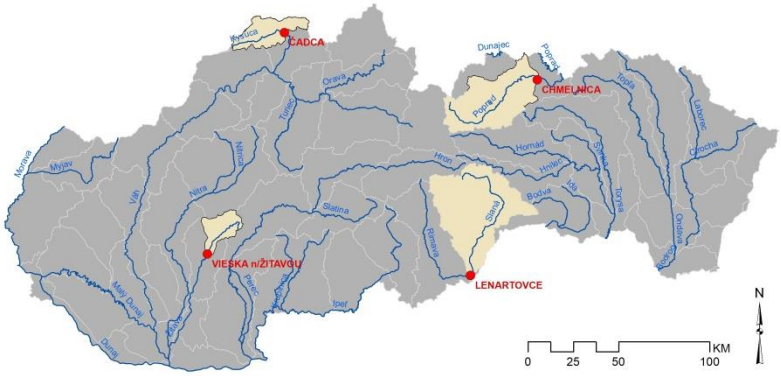
Ako podpornú informáciu v hodnotení zmien celkového výparu konfrontujeme jeho odhadnuté hodnoty s hodnotami ročných úhrnov aktuálnej evapotranspirácie vypočítaných metódou Budyko - Tomlain vo vybraných klimatických staniciach (Lapin a Melo, 2012).

CHARAKTERISTIKA PILOTNÝCH POVODÍ

V príspevku boli porovnané výsledky hydrologickej bilancie a trendov jej prvkov zo štyroch čiastkových povodí, ktoré sú rozmiestnené v dvoch transektoch zo severu na juh cez územie Slovenska a zároveň sú aj na západo-východnom transekte. Výber povodí sa riadil tak, aby reprezentovali svojou nadmorskou výškou a polohou v SR rozdielny charakter hydrologického režimu a hydrologickej bilancie.

Na severe SR vo vonkajších Západných Karpatoch boli vybrané povodia Kysuce a Popradu so záverečnými profilmi v Čadci (vodomerná stanica – VS 6180) a Chmeľnici (VS 8320). Na juhu Slovenska boli vybrané povodia Slanej so záverečným profilom Lenartovce (VS 7820) a povodie Žitavy po profil Vieska nad Žitavou (VS 6820).

Obrázok 1. Lokalizácia vybraných povodí v rámci Slovenska.
Figure 1. Location of selected river basins within Slovakia.



Povodie Kysuce je situované na severozápade Slovenska. Tok Kysuca pramení na severnom svahu Veľkého Javorníka a je pravostranným prítokom Váhu. Záverečným profilom je vodomerná stanica Čadca, prislúchajúca plocha povodia je 492,54 km^2. Na území povodia prevláda flyšové pásmo, pre ktoré sú charakteristické nízka priepustnosť, slabé zásoby vôd a zosuvy. Flyš (teda striedanie pieskovcov a ílovcov) vytvára horninové prostredie, v ktorom prevláda povrchový odtok nad infiltráciou. Napriek pomerne dobrej priepustnosti pieskovcov, ovplyvňujú priestupnosť flyšu ílovce, ktorých priestupnosť je veľmi nízka. Zdrojom podzemnej vody sú zvyčajne atmosférické zrážky. Na území sa nachádzajú charakteristické sekundárne pozmenené bukovo-jedľové smrečiny (Atlas krajiny, 2013).

Ďalšia skúmaná lokalita na severe bolo povodie toku Poprad so záverečným profilom Chmeľnica (VS 8320), ktorého plocha je 1267,24 km^2. Vodomerná stanica sa nachádza v 60,10 riečnom kilometri (rkm). Významným prostredím pre akumuláciu podzemných vôd v povodí Popradu sú najmä kvartérne sedimenty, ktoré sú zastúpené fluviálnymi sedimentmi poriečnej nivy Popradu. Na území prevládajú bukové a jedľovo-bukové lesy (Atlas krajiny, 2013).

Na juhu Slovenska bolo vybrané povodie Slanej so záverečným profilom Lenartovce (VS 7820) a povodie Žitavy profil Vieska nad Žitavou (VS 6820). Povodie Lenartovce (VS 7820), sa nachádza v bezprostrednej blízkosti hranice s Maďarskom, kde tok Slaná opúšťa územie Slovenska, prislúchajúca plocha povodia je 1829,65 km^2. Vodomerná stanica sa nachádza v 3,60 rkm. Územie čiastkového povodia Slanej je značne výškovo členité a zahŕňa takmer všetky typy erózno-denudačného reliéfu, od reliéfu rovín a nív po vysočinový podhôľny reliéf. Na území prevládajú karpatské dubovo-hrabové lesy (Atlas krajiny, 2013). V pramenných oblastiach majú svahy pohorí pomerne veľký sklon, v dôsledku čoho, sa počas výdatných zrážok, vytvára rýchly odtok vody do údolí a následne sa vytvárajú relatívne veľké povodňové vlny (MŽP SR, 2011). V čiastkovom povodí má orografické členenie veľký vplyv na odtokové pomery.

Ďalšia južná lokalita bola povodie Žitavy so záverečným profilom Vieska nad Žitavou (VS 6820). Povodie je situované na severe Podunajskej nížiny v 34,20 rkm; prislúchajúca plocha povodia je 295,46 km^2. Na území sú významné fluviálne sedimenty, ktoré sú viazané na dolinu rieky Žitavy a jej väčšie prítoky. Sú stratigraficky diferencované vo forme piatich terasových stupňov a najmladšej sedimentácie, súvisle zachovanej v dnových častiach doliny Žitavy a všetkých väčších prítokov. Táto je tvorená štrkmi a pieskami, v ich nadloží sú väčšinou zachované hliny, od piesčitých po ílovité (Šimek a Fendeková, 2012). Zastúpená je tu vegetácia vodná, močiarna a lužných lesov. Na nive Žitavy sú charakteristické jaseňovo-brestovo-dubové lesy, vo vyšších polohách územia karpatské dubovo-hrabové lesy, respektíve dubové a cerovo-dubové lesy (Atlas krajiny, 2013) a lužné lesy s výskytom viacerých biotopov európskeho významu. Jedná sa o pomerne zložitý komplex tokov zahrňujúci zregulovaný tok Žitavy (Hajdú, 2009).

V Tab. 1. sú uvedené základné charakteristiky skúmaných povodí, a to: priemerné hodnoty prietokov, úhrnov zrážok a teploty vzduchu, ktoré sú vypočítané z celého sledovaného obdobia (1961 – 2010).

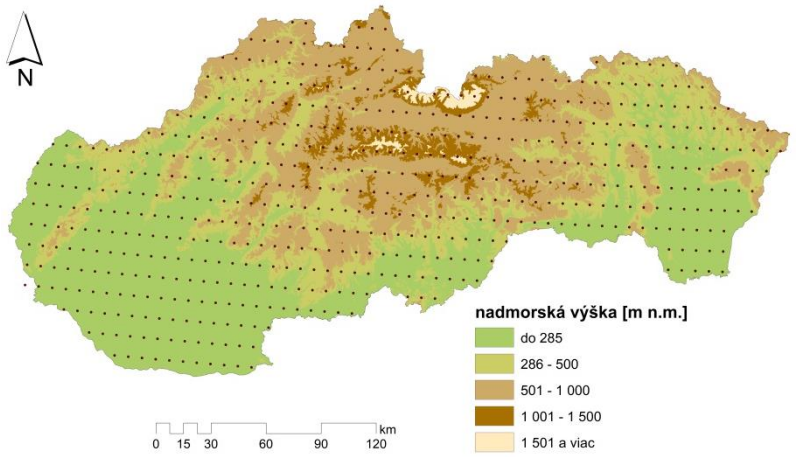
VSTUPNÉ ÚDAJE A ICH SPRACOVANIE

Spolupráca ôsmich európskych krajín (Maďarsko, Slovensko, Srbsko, Česko, Poľsko, Ukrajina, Rumunsko, Chorvátsko) umožňuje záujemcom sledovať variabilitu klímy v Karpatskom oblúku pomocou voľne dostupných výstupov medzinárodného projektu CarpatClim (Szalai et al., 2012). Databáza ponúka 74 parametrov denných, mesačných a ročných meteorologických prvkov. V online databáze projektu sú dostupné údaje v gridovej sieti za obdobie 1961 do 2010 (*http://www.carpatclim-eu.org/pages/home/*, dostupné 17. 10. 2020). Tieto údaje umožňujú podrobný výskum priestorových a časových radov značného počtu meraných a odvodených klimatologických údajov.

Tabuľka 1. Základné charakteristiky vybraných povodí.
Table 1. Basic physiographic characteristics of selected river basins.

Povodie Tok	Záverečný profil (vodomerná stanica)		Plocha povodia [km^2]	Priemerný ročný prietok [m^3/s]	Priemerný úhrn zrážok [mm]	Priem. ročná teplota vzduchu [°C]	Nadm. výška min [m n.m.]	Nadm. výška max [m n.m.]
Kysuca	Čadca	(6180)	492,54	8,49	998,81	6,31	408	1030
Poprad	Chmelnica	(8320)	1262,41	15,15	813,42	5,54	507	1926
Slaná	Lenartovce	(7820)	1829,65	13,65	680,75	7,94	150	1212
Žitava	Vieska nad Žitavou	(6820)	295,46	1,58	730,80	8,85	155	668

Obrázok 2. Priestorové rozdelenie gridových bodov databázy CarpatClim na území Slovenska.
Figure 2. Spatial distribution of grid points of the CarpatClim database in Slovakia.



Výstupom projektu CarpatClim sú homogénne a priestorovo reprezentatívne časové rady klimatologických údajov, ktoré sú spracované v gridovej mriežke 0,1 x 0,1 stupňov, t.j. cca 10 x 10 km (Slovensku prislúchajú body od 524 do 2240, Obr. 2). Na priestorovú interpoláciu homogenizovaných časových radov bola použitá metóda MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized data basis) (Szentimrey a Bihari, 2007).

V rámci tohto príspevku boli použité z databázy CarpatClim mesačné úhrny atmosférických zrážok a priemerné mesačné teploty vzduchu pre územie pilotných povodí. Pri skúmaní dát sme boli limitovaní dostupnými rokmi z databázy CarpatClim, preto sme sa rozhodli preskúmať celý rad a jednotlivo aj dve 25 ročné obdobia.

Pre potrebu výpočtu úhrnu zrážok a priemernej teploty vzduchu na povodie sa zvolila metóda Thiessenových polygónov, kde priemerný zrážkový úhrn v povodí a priemerná teplota vzduchu sa počítala ako vážený priemer údajov z jednotlivých gridových bodov databázy CarpatClim. Za váhu bola považovaná veľkosť územia priradená k príslušnému gridovému bodu v príslušnom polygóne v rámci povodia, prípadne z jeho bezprostredného okolia. Mesačné hodnoty boli prepočítané na priemerné ročné hodnoty za kalendárny rok ako ich vážený priemer.

Ďalším prvkom hydrologickej bilancie bol odtok z povodia (územia). Prietokové údaje boli poskytnuté z databázy SHMÚ, a to v mesačnom kroku za obdobie 1961 do 2010 pre vybrané záverečné profily v nami zvolených povodiach. Údaje priemerného mesačného prietoku boli prepočítané na priemerný ročný prietok za kalendárny rok, ako vážený priemer počtu dní v danom mesiaci. Následne boli priemerné ročné prietoky Q [m^3/s] prepočítané na odtokovú výšku v [mm] z povodia a bol určený ich dlhodobý priemer. Prvky hydrologickej bilancie sa porovnali v dvoch obdobiach, keď údaje z rokov 1961 – 2010 boli rozdelené na dve polovice (dve 25 ročné obdobia). Toto delenie je kompromisom medzi požiadavkou dostatočne dlhého obdobia pre určovanie hydrologickej bilancie za dlhé obdobie a potrebou porovnať dve disjunktné obdobia z hľadiska možnej zmeny jej režimu. Druhé obdobie spadá do obdobia ktoré sa považuje za teplejšie, ako prvé (Ďurigová et al., 2019).

V príspevku boli napokon porovnané aj výsledky výpočtov územného výparu z hydrologickej bilancie s ročnými úhrnmi aktuálnej evapotranspirácie v [mm] z klimatických staníc SHMÚ, ktoré sú v susedstve pilotných povodí: Nitra, Rimavská Sobota, Poprad letisko a Čadca. Výsledky boli vypracované komplexnou metódou Budyka a Tomlaina, ktorá bola adaptovaná na slovenské podmienky a považuje sa za štandardnú metódu (Lapin a Melo, 2012). Spomínaná metóda, ktorá je dostatočne známa, je podrobne popísaná v Lapin a Melo (2012) a vychádza z údajov o teplote a vlhkosti vzduchu, oblačnosti, resp. o dobe trvania slnečného svitu, o počte dní so snehovou pokrývkou a atmosférických zrážkach. Tieto prvky sú pravidelne merané na klimatických staniciach tzn., že metóda je založená na bodových meraniach (Tomlain, 1997).

Nám dostupné hodnoty sú výsledkom výpočtu aktuálneho výparu, ktoré boli spracované pracovníkmi Oddelenia meteorológie a klimatológie na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského na základe údajov SHMÚ (Lapin a Melo, 2012)

VÝSLEDKY

Na začiatku riešenia boli analyzované trendy pre rady priemerných ročných teplôt vzduchu a ročných úhrnov zrážok na povodie a ročná odtoková výška za celé sledované obdobie (1961 – 2010). Významnosť trendov bola hodnotená pomocou Mann-Kendallovho testu.

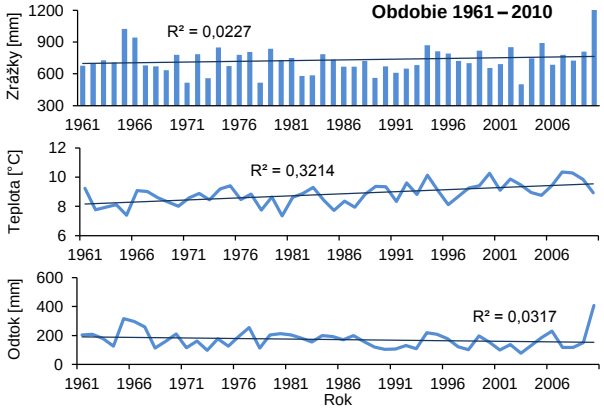
Z porovnania všetkých povodí, najvýraznejší vzostup úhrnu zrážok bol zaznamenaný v povodí toku Poprad. Výraznejšie zmeny boli pozorované aj v odtoku. V severných povodiach bol zaznamenaný stúpajúci trend. Naopak v južných povodiach, bol pozorovaný mierne klesajúci trend.

Pri sledovaní teploty v povodiach bola pozorovaná najväčšia premenlivosť v povodí Vieska nad Žitavou (6820). Rok 2010 bol významný pri všetkých povodiach tým, že ročný úhrn zrážok bol výrazne vyšší, než v ostatných rokoch a ovplyvňoval priebeh trendov. Výsledky časových radov ročných úhrnov zrážok, odtoku a priemerných ročných teplôt vzduchu pre celé skúmané obdobie rokov 1961 – 2010 sú zhrnuté na nasledujúcich obrázkoch, kde uvádzame aj stupeň závislosti vyjadrený koeficientom determinácie (Obr. 3 – 6).

Z porovnania ročných úhrnov zrážok v celom období (1961 – 2010) vyplynulo, že ich trend je stúpajúci vo všetkých povodiach, a najvýraznejší vzostup je zaznamenaný v povodí toku Poprad. Štatistická analýza pritom ukázala, že tieto trendy nie sú významné na základe Mann-Kendallovho testu pri 95 % hladine významnosti, okrem spomínaného povodia Poprad.

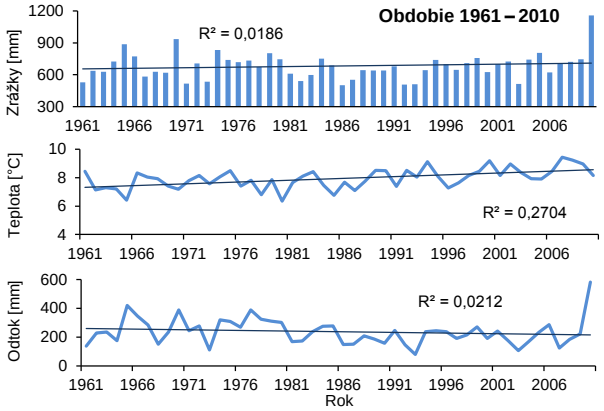
Obrázok 3. Časové rady ročného úhrnu zrážok, priemerných ročných teplôt vzduchu a odtokovej výšky v povodí toku Žitava; priamkou je znázornený lineárny trend.

Figure 3. Time series of the annual catchment average precipitation, average annual air temperatures and runoff height in the Žitava river basin with the linear trend.



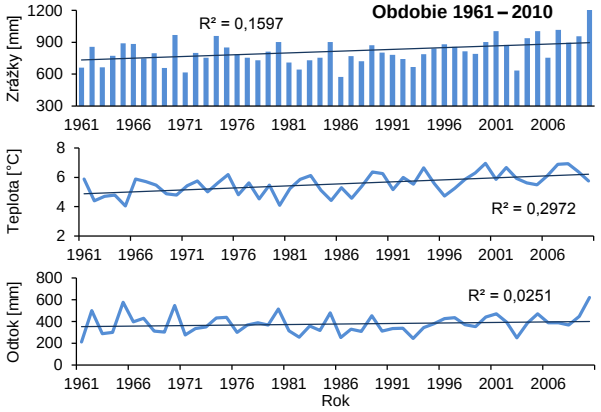
Obrázok 4. Časové rady ročného úhrnu zrážok, priemerných ročných teplôt vzduchu a odtokovej výšky v povodí toku Slaná; priamkou je znázornený lineárny trend.

Figure 4. Time series of the annual catchment average precipitation, average annual air temperatures and runoff height in the Slaná river basin with the linear trend.



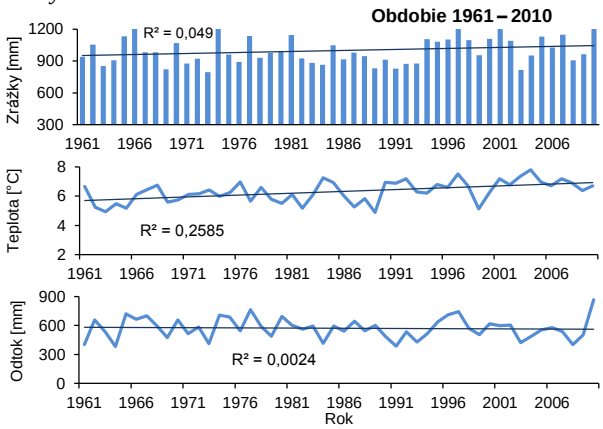
Obrázok 5. Časové rady ročného úhrnu zrážok, priemerných ročných teplôt vzduchu a odtokovej výšky v povodí toku Poprad; priamkou je znázornený lineárny trend.

Figure 5. Time series of the annual catchment average precipitation, average annual air temperatures and runoff height in the Poprad river basin with the linear trend.



Obrázok 6. Časové rady ročného úhrnu zrážok, priemerných ročných teplôt vzduchu a odtokovej výšky v povodí toku Kysuca; priamkou je znázornený lineárny trend.

Figure 6. Time series of the annual catchment average precipitation, average annual air temperatures and runoff height in the Kysuca river basin with the linear trend.



Vo vybraných povodiach na severe Slovenska je priemerná ročná teplota vzduchu nižšia približne o 2 °C za obdobie 1961 – 2010, ako v južnej časti. Priemerná ročná teplota má stúpajúci trend vo všetkých povodiach, tak ako sa očakávalo. Výsledky testovania ukázali, že ide o významné trendy na základe Mann-Kendallovho testu.

Odtok z povodí zo severnej časti Slovenska je stúpajúci, a naopak v prípade južných povodí je mierne klesajúci (profil Lenartovce, Vieska). Významnosť trendu odtoku bola však potvrdená iba v prípade povodia Žitavy.

Výsledky štatistickej analýzy radov všetkých analyzovaných prvkov hydrologickej bilancie sú zosumarizované v Tab. 2.

Následne, pre potreby detekcie možnej zmeny v úhrnnom výpare sa hodnotili trendy všetkých prvkov hydrologickej bilancie (zrážky, odtok, úhrnný výpar) v dvoch obdobiach, kde celkové dostupné údaje z rokov 1961 – 2010 boli rozdelené na dve 25 ročné obdobia. Pre potreby lepšej interpretácie výsledkov bol analyzovaný aj vývoj teploty vzduchu v týchto obdobiach. Najprv je popísaný charakter trendov (Obr. 7 – 10), v tabuľkách 3 a 4 sú zhrnuté trendy a výsledky štatistických testov.

Tabuľka 2. Trendy a výsledky významnosti trendu z Mann-Kendallovho testu pre všetky prvky za obdobie 1961 – 2010.

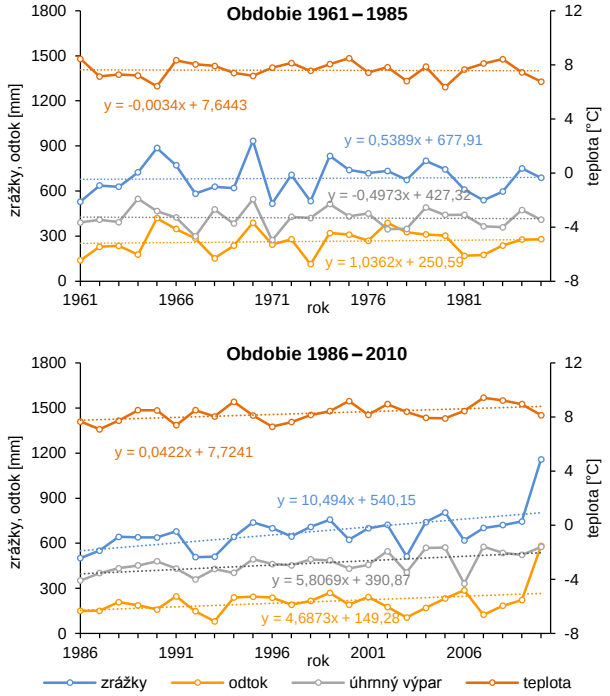
Table 2. Trends and significance of the trend from the Mann-Kendall test for all elements for the period 1961 – 2010; arrows indicate the direction of the trend (positive or negative), Ano or Nie the significance (Yes or No).

Povodie, tok	Záverečný profil (vodomerná stanica)		Úhrn zrážok [mm]	Teplota vduchu [°C]	Odtoková výška [mm]	Úhrnný výpar [mm]
Kysuca	Čadca	(6820)	Nie ↑	Áno ↑	Nie ↑	Áno ↑
Poprad	Chmeľnica	(8320)	Áno ↑	Áno ↑	Nie ↑	Áno ↑
Slaná	Lenartovce	(7820)	Nie ↑	Áno ↑	Nie ↓	Áno ↑
Žitava	Vieska n/Žitavou	(6820)	Nie ↑	Áno ↑	Áno ↓	Áno ↑

Poznámka: šípka označuje, či ide o klesajúci alebo stúpajúcu trend; „áno“ „nie“ znamená štatistickú významnosť, resp. nevýznamnosť trendu.

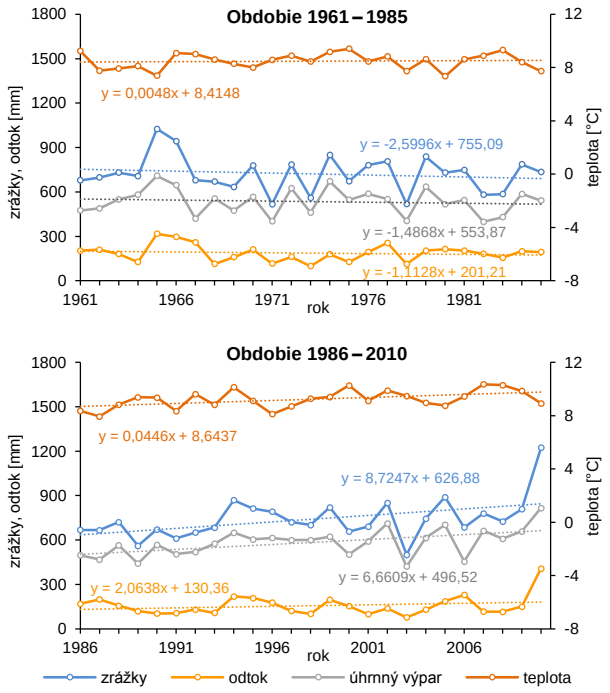
Obrázok 7. Časové rady priemerných ročných hodnôt úhrnu zrážok, teplôt vzduchu, odtokovej výšky a úhrnného výparu v povodí toku Slaná.

Figure 7. Time series of the annual catchment average precipitation, average annual air temperatures, runoff height, and total evapotranspiration in the Slaná river basin.



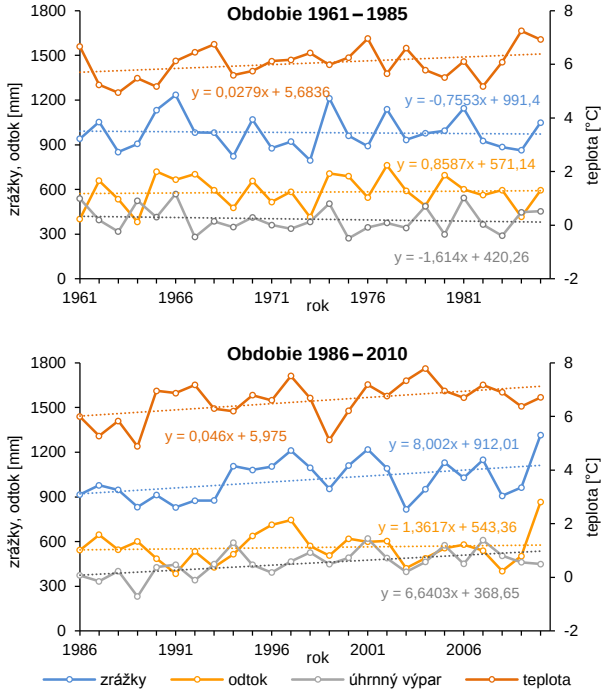
Obrázok 8. Časové rady priemerných ročných hodnôt úhrnu zrážok, teplôt vzduchu, odtokovej výšky a úhrnného výparu v povodí toku Žitava.

Figure 8. Time series of the annual catchment average precipitation, average annual air temperatures, runoff height, and total evapotranspiration in the Žitava river basin.



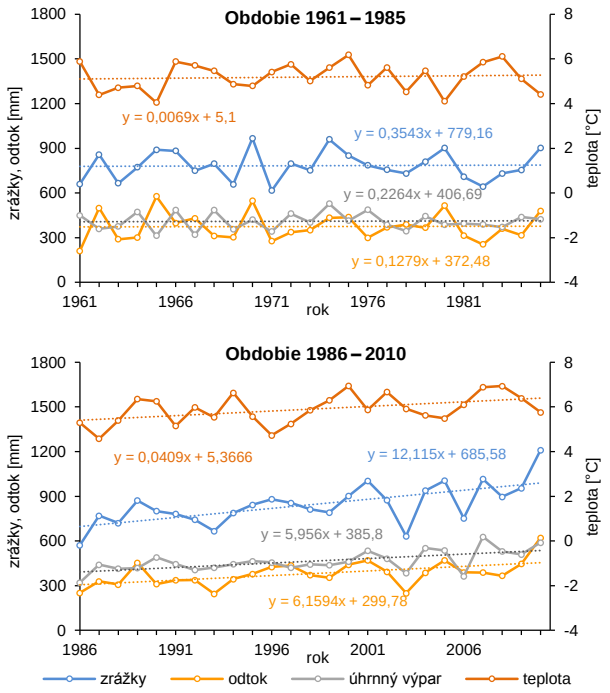
Obrázok 9. Časové rady priemerných ročných hodnôt úhrnu zrážok, teplôt vzduchu, odtokovej výšky a úhrnného výparu v povodí toku Kysuca.

Figure 9. Time series of the annual catchment average precipitation, average annual air temperatures, runoff height, and total evapotranspiration in the Kysuca river basin.



Obrázok 10. Časové rady priemerných ročných hodnôt úhrnu zrážok, teplôt vzduchu, odtokovej výšky a úhrnného výparu v povodí toku Poprad.

Figure 10. Time series of the annual catchment average precipitation, average annual air temperatures, runoff height, and total evapotranspiration in the Poprad river basin.



V povodí toku Slaná bol zaznamenaný stúpajúci trend v úhrne zrážok v celom analyzovanom období. V druhej polovici obdobia (1986 – 2010) je vidieť výraznejší nárast úhrnu zrážok v porovnaní s prvým obdobím, čo sa preukázalo aj v smernici trendu (Obr. 7). Taktiež teplota vzduchu je vyššia v druhej polovici. Najvýraznejšiu zmenu možno detegovať v odtoku, kde je opäť v druhej polovici výraznejšie stúpajúci trend, čo sa prejavilo aj v hodnotách a trende úhrnného výparu (vyšší).

V južnom povodí toku Žitavy možno detegovať zmenu trendu, kde v prvej polovici je klesajúci trend úhrnu zrážok a v druhej výraznejšie stúpajúci. Ďalej pri porovnaní dvoch 25 ročných období možno spozorovať väčšiu premenlivosť teploty vzduchu v druhej polovici obdobia, lineárny trend má však podobný rast v rovnici trendu. V prípade odtoku došlo taktiež k zmene trendu z klesajúceho na stúpajúci v porovnaní dvoch období, kde ale v prípade celého sledovaného obdobia bol zistený klesajúci trend. Čo sa týka úhrnného výparu, trend kopíruje priebeh úhrnu zrážok (Obr. 8). Rok 2010 je aj v tomto prípade výnimočný vysokými hodnotami zrážok a odtoku, čo významne ovplyvňuje trendové čiary týchto charakteristík.

Severozápadné povodie Čadce sa vyznačuje najvyšším priemerným ročným úhrnom zrážok v období 1961-2010. Pri porovnaní dvoch 25 ročných období možno detekovať zmeny trendu z klesajúceho na stúpajúci. V prípade teploty vzduchu je zaznamenaný stúpajúci trend v oboch obdobiach, a v druhej polovici je väčšia rozkolísanosť. Vzhľadom aj na nižšie hodnoty teplôt je vidieť nižšie hodnoty úhrnného výparu, ako bolo vidieť v povodiach z južnej časti Slovenska. Trend úhrnného výparu je výraznejšie stúpajúci v druhej polovici hodnotiaceho obdobia. Pri sledovaní dvoch období sa opäť prejavuje vplyv roku 2010, ktorý ovplyvnil priebeh trendu s výrazným stúpaním druhého obdobia.

Štvrté analyzované povodie bolo vybrané v severozápadnej časti Slovenska na toku Poprad. V povodí bol zaznamenaný stúpajúci trend v úhrne zrážok v celom analyzovanom období (Obr. 10). Výraznejší nárast úhrnu zrážok vidieť v druhej polovici obdobia (1986 – 2010). Taktiež teplota vzduchu je vyššia v druhej polovici. Najvýraznejšie zmeny možno pozorovať v odtoku, kde je opäť v druhej polovici výraznejšie stúpajúci trend. Úhrnný výpar v celom sledovanom období bol stúpajúci, výraznejšie tiež v druhej polovici obdobia. Pri sledovaní dvoch období sa opäť prejavuje vplyv roku 2010, ktorý ovplyvnil priebeh trendu s výrazným stúpaním druhého obdobia.

V Tab. 3 a 4 sú zosumarizované a porovnané trendy prvkov hydrologickej bilancie na základe Mann-Kendallovho testu z obdobia 1961 – 1985 a 1986 – 2010.

Z výsledkov testovania v Tab. 3 pre obdobie rokov 1961 – 1985 vyplynul stúpajúci trend priemernej ročnej teploty vzduchu vo všetkých povodiach. Stúpajúci trend bol zaznamenaný v povodí toku Poprad pri všetkých prvkoch hydrologickej bilancie. Ďalšie stúpajúce trendy boli zaznamenané v povodí toku Kysuca a Žitava v úhrnnom výpare. Treba tiež spomenúť, že identifikované trendy v uvedenom období nepreukázali štatistickú významnosť.

Trendy a výsledky významnosti Mann-Kendallovho testu z obdobia 1986 – 2010 sú zhrnuté v Tab. 4. Podľa výsledkov môžeme konštatovať, že v období 1986 – 2010 boli stúpajúce trendy úhrnov zrážok významné pri všetkých povodiach. Z porovnania ročných odtokových výšok vyplynulo, že ich trend je stúpajúci vo všetkých povodiach. Štatistická analýza pritom ukázala, že tieto trendy nie sú významné pri povodí toku Kysuca a Slaná. Trend pre priemernú ročnú teplotu je štatisticky významný a stúpajúci vo všetkých povodiach.

Tabuľka 3. Trendy a výsledky významnosti trendu z Mann-Kendallovho testu pre všetky prvky za obdobie 1961 – 1985.

Table 3. Trends and significance of the trend from the Mann-Kendall test for all elements for the period 1961 – 1985; arrows indicate the direction of the trend (positive or negative), Ano or Nie the significance (Yes or No).

Povodie, tok	Záverečný profil (vodomerná stanica)		Úhrn zrážok [mm]	Teplota vduchu [°C]	Odtoková výška [mm]	Úhrnný výpar [mm]
Kysuca	Čadca	(6820)	Nie ↓	Nie ↑	Nie ↓	Nie ↑
Poprad	Chmeľnica	(8320)	Nie ↑	Nie ↑	Nie ↑	Nie ↑
Slaná	Lenartovce	(7820)	Nie ↓	Nie ↑	Nie ↓	Nie ↓
Žitava	Vieska n/Žitavou	(6820)	Nie ↓	Nie ↑	Nie ↓	Nie ↑

Poznámka: šípka označuje, či ide o klesajúci alebo stúpajúci trend; „áno“ „nie“ znamená štatistickú významnosť resp. nevýznamnosť trendu.

Tabuľka 4. Trendy a výsledky významnosti trendu z Mann-Kendallovho testu pre všetky prvky za obdobie 1986 – 2010.

Table 4. Trends and significance of the trend from the Mann-Kendall test for all elements for the period 1986 – 2010; arrows indicate the direction of the trend (positive or negative), Ano or Nie the significance (Yes or No).

Povodie, tok	Záverečný profil (vodomerná stanica)		Úhrn zrážok [mm]	Teplota vduchu [°C]	Odtoková výška [mm]	Úhrnný výpar [mm]
Kysuca	Čadca	(6820)	Áno ↑	Áno ↑	Nie ↑	Áno ↑
Poprad	Chmeľnica	(8320)	Áno ↑	Áno ↑	Áno ↑	Áno ↑
Slaná	Lenartovce	(7820)	Áno ↑	Áno ↑	Nie ↑	Áno ↑
Žitava	Vieska n/Žitavou	(6820)	Áno ↑	Áno ↑	Áno ↑	Áno ↑

Poznámka: Šípka označuje, či ide o klesajúci alebo stúpajúcu trend; „áno“ „nie“ znamená štatistickú významnosť resp. nevýznamnosť trendu.

Percentuálny podiel úhrnného výparu a odtoku z povodia pre analyzované povodia je zobrazený na Obr. 11. za obdobie 1961 – 2010. Pomer veľkosti odtoku a celkového výparu z povodia je rôzny v každom povodí. Povodia ležiace na juhu krajiny majú odtok nižší, než povodia na severe (Slaná 35 %, resp. v prípade Žitavy len 24 %). Povodia v severnej časti Slovenska naopak vykazujú nižší úhrnný výpar, konkrétne Kysuca (profil Čadca) 43 % a na povodí toku Poprad (profil Chmeľnica) 54 %. Tieto výsledky sú v súlade s výškovou zonalitou prvkov hydrologickej bilancie na Slovensku a severo-južným gradientom.

V Tab. 5 sú výsledky priemerných hodnôt úhrnov zrážok, ročnej teploty vzduchu, odtoku a úhrnného výparu zo štyroch povodí v dvoch porovnávaných obdobiach (1961 – 1985) (1986 – 2010) a v celom skúmanom období.

V Tab. 6 sú uvedené rozdiely v hodnotách prvkov hydrologickej bilancie medzi obdobiami (1986-2010) –

(1961-1985). Pre porovnanie uvádzame aj rozdiel vo vypočítaných hodnotách aktuálneho výparu podľa metódy Budyko-Tomlain (AET) v staniciach Čadca, Poprad letisko, Rimavská Sobota, Nitra z oboch období. Poznamenávame, že sme si vedomí faktu, že ide len o indikatívne porovnanie trendov celkového výparu povodia a AET podľa jednej stanice (zvlášť ak ide o povodie nachádzajúce sa vo väčšom rozpätí nadmorských výšok).

Z výsledkov je vidieť, že vo všetkých povodiach vzrástli hodnoty celkového výparu. Tento nárast sa prejavil aj na hodnotách AET v staniciach Poprad letisko a Rimavská Sobota, kým v druhých dvoch staniciach prakticky nenastala zmena.

Vyjadrenie percentuálnej odchýlky posledného 25-ročného obdobia v porovnaní s predchádzajúcim obdobím je znázornené na nasledujúcom obrázku (Obr. 12).

Tabuľka 5. Prehľad priemerných hodnôt sledovaných prvkov vodnej bilancie a priemernej ročnej teploty vzduchu na skúmaných povodiach pre dve porovnávacie obdobia a pre celé pozorované obdobie.

Table 5. Overview of average values of the elements of the water balance and average annual air temperature in the studied river basins for two sub-periods and for the whole period.

Povodie - Tok	Záverečný profil (vodomerná stanica	Obdobie	Úhrn zrážok [mm]	Priemerná ročná teplota [°C]	Odtok [mm]	Úhrnný výpar [mm]
Kysuca	Čadca (6180)	1961–1985	981,58	6,05	582,30	399,28
		1986–2010	1016,04	6,57	561,06	454,97
		1961–2010	998,81	6,31	571,68	427,13
Poprad	Chmelnica (8320)	1961–1985	783,77	5,19	374,14	409,63
		1986–2010	843,08	5,90	379,85	463,23
		1961–2010	813,42	5,54	377,00	436,43
Slaná	Lenartovce (7820)	1961–1985	684,92	7,60	264,06	420,86
		1986–2010	676,58	8,27	210,22	466,36
		1961–2010	680,75	7,94	237,14	443,61
Žitava	Vieska nad Žitavou (6820)	1961–1985	721,29	8,48	186,74	534,55
		1986–2010	740,30	9,22	157,19	583,11
		1961–2010	730,80	8,85	171,97	558,83

Tabuľka 6. Rozdiel v hodnotách prvkov hydrologickej bilancie (úhrnu zrážok, odtoku, územného výparu), teploty vzduchu a úhrnov aktuálnej evapotranspirácie (AET) z klimatických staníc Slovenska v staniciach Čadca, Poprad letisko, Rimavská Sobota, Nitra medzi obdobiami (1986-2010) – (1961-1985).

Table 6. Difference in the values of the elements of the hydrological balance (annual catchment average precipitation, runoff, territorial evapotranspiration), air temperature and totals of estimated actual evapotranspiration (AET) from the climatic stations of Slovakia in stations Čadca, Poprad airport, Rimavská Sobota, Nitra between periods (1986-2010) – (1961- 1985).

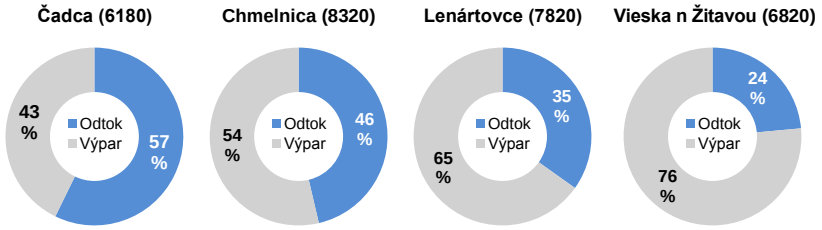
Záverečný profil		Zrážky [mm]	Teplota vzduchu [°C]	Odtok [mm]	Úhrnný výpar [mm]	AET [mm]	Klimatologická stanica
Čadca	(6180)	34,46	0,53	-0,32	55,69	-1,40	Čadca
Chmeľnica	(8320)	59,31	0,71	0,23	53,60	9,52	Poprad-letisko
Lenartovce	(7820)	-8,34	0,67	-3,10	45,50	34,40	Rimavská Sobota
Vieska nad Žitavou	(6820)	19,01	0,75	-0,27	48,57	0,16	Nitra

Poznámka: V poslednom 25 ročnom období došlo ku zníženiu alebo zvýšeniu hodnôt prvkov hydrologickej bilancie.

Note: In the last 25 years, there has been a decrease or increase in the values of the elements of the hydrological balance.

Obrázok 11. Percentuálny podiel odtoku a úhrnného výparu z úhrnu zrážok na povodie za obdobia 1961 – 2010.

Figure 11. Percentage of runoff and territorial evapotranspiration from catchment average precipitation in the river basin for the period 1961 – 2010.



Obrázok 12. Percentuálna odchýlka medzi dlhodobými priemernými ročnými hodnotami prvkov hydrologickej bilancie a hodnôt AET (aktuálna evapotranspirácia z klimatických staníc) v staniciach Čadca, Poprad letisko, Rimavská Sobota, Nitra z obdobia (1986-2010) – (1961-1985)

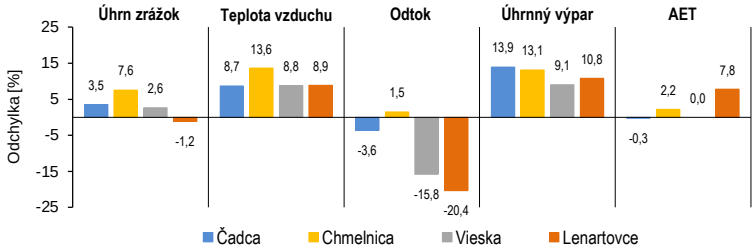


Figure 12. Percentage deviation between long-term average annual values of hydrological balance elements and AET (values – of actual evapotranspiration from climatic stations) of Slovakia in stations Čadca, Poprad airport, Rimavská Sobota, Nitra from the period (1986-2010) – (1961-1985).

Podľa grafu percentuálneho rozdielu môžeme konštatovať, že priemerná dlhodobá ročná hodnota odtoku na troch povodiach poklesla, na povodí Chmeľnica odtok mierne vzrástol. V prípade zrážok možno pozorovať mierne zvýšenie úhrnov na povodie, ale s relatívne silne stúpajúcou teplotou vzduchu sa zvýšil úhrnný výpar. Tento trend v územnom výpare nevyvracajú bodové údaje aktuálneho výparu určené podľa komplexnej metódy Budyko-Tomlain (Lapin a Melo, 2012) v dvoch staniciach Poprad letisko a Rimavská Sobota, kde bol zaznamenaný nárast aktuálnej evapotranspirácie.

DISKUSIA

Cieľom príspevku bolo identifikovanie vývoja úhrnného výparu určeného z rovnice hydrologickej bilancie za dlhé obdobie 1961 – 2010 v ročnom kroku, ako aj porovnanie jeho hodnôt v rámci dvoch 25-ročných období (1961 – 1985, 1986 – 2010). Dĺžka porovnávaných období bola ovplyvnená dostupnosťou údajov z databázy CarpatClimu, z ktorej boli použité údaje o úhrne zrážok a teplote vzduchu.

Cieľom nebolo identifikovať obdobie prípadného zlomu, ale zmeny vývoja prvkov a porovnať dve rovnako dlhé obdobia (s dostatočne dlhým časovým radom).

Hodnotenia trendu územného výparu z rovnice hydrologickej bilancie na Slovensku sme porovnali s trendami vývoja aktuálnej evapotranspirácie z komplexnej metódy podľa Budyka a Tomlaina z klimatických staníc.

Zistené trendy v územnom výpare nevyvracajú bodové údaje aktuálneho výparu určené podľa komplexnej metódy Budyko-Tomlain (Lapin a Melo, 2012) v dvoch staniciach Poprad letisko, a Rimavská Sobota, kde bol zaznamenaný nárast aktuálnej evapotranspirácie, ale ďalšie dve stanice naše výsledky nepotvrdili. Môže to súvisieť s polohou staníc v povodiach spolu s výškovým rozdelením prvkov hydrologickej bilancie a bude ho treba preskúmať na väčšom počte prípadov.

Vychádzajúc z údajov databázy CarpatClim, a na základe porovnania rozdielu dvoch 25 ročných období možno povedať, že územný výpar sa zvýšil na všetkých štyroch povodiach. Výraznejšie zvýšenie bolo pozorované vo vyšších horských povodiach, teda v severnej časti Slovenska. Taktiež úhrn zrážok bol vyšší v druhej polovici sledovaného obdobia, okrem povodia Slaná.

Pri sledovaní trendov sa objavil nadpriemerný rok (rok 2010), čo nepriamo naznačuje, že určovanie trendov z kratšieho obdobia nie sú dostatočne preukázané.

Ak považujeme odtok za najspoľahlivejší prvok bilancie, je potrebné preverovať konzistenciou údajov o zrážkach, ktorá môže byť spôsobená primárne vstupmi, teda gridovými údajmi databázy CarpatClim, rozmiestnením gridov voči našim povodiam, a teda čiastočne aj váhami v Thiessenových polygónoch. Takáto kontrola (a samozrejme ďalšie) sú potrebné pre vymedzenie kritických oblastí pre používanie údajov, napr. pre potrebu zrážkovo-odtokového modelovania.

Cieľom tohto príspevku bolo aj preveriť spoľahlivosť vstupných údajov a možné nezrovnalosti v úhrnnom výpare v horskom regióne. Dve vybrané povodia sú lokalizované na silne členenom území, miestami s veľkými výškovými rozdielmi. Rozdiel zrážok a odtoku sa v tomto príspevku považoval, v zmysle rovnice hydrologickej bilancie, za odhad územného výparu. V skúmaných povodiach priebeh časových radov ročného úhrnu zrážok, odtoku a odhadu ročného úhrnného výparu nevykazovali vizuálne nekonzistencie, čo by naznačovalo, že priestorová interpolácia údajov z klimatických staníc do databázy CarpatClim v danom území dostatočne zohľadnila výškovú zonalitu a priestorovú variabilitu zrážok v daných lokalitách a obavy, že mohla podhodnotiť úhrny zrážok vo vyšších polohách sa nepotvrdili. Možné je aj to, že poloha gridových bodov vzhľadom k našim povodiam bola v danom prípade optimálna.

Tieto hypotézy bude potrebné potvrdiť ďalšími kontrolami údajov z tejto databázy. Jedna z možností je aj hodnotenie trendov v prvkoch bilancie na základe odhadu úhrnu zrážok na povodie z meteorologických údajov rôznymi metódami. Takáto kontrola (a samozrejme ďalšie) by bola potrebná pre vymedzenie kritických oblastí pre používanie jej údajov, napr. pre potrebu zrážkovo-odtokového modelovania.

ZÁVER

Potenciálne zmeny hydrologického režimu spôsobené zmenou klímy predstavujú v súčasnosti jeden z hlavných zdrojov neistoty v oblasti hospodárenia s vodnými zdrojmi v krajine. Na Slovensku sa môžu prejaviť poklesom výdatnosti vodných zdrojov, zmenou sezonality odtoku, zvýšením extrémnosti povodní a sucha, ako aj zmenou zásob snehu (Hlavčová et al., 2005).

Slovensko má bohaté fyzicko-geografické pomery a z nich vyplývajúce regionálne odlišné hydrologické režimy. Aj z tohto dôvodu boli v príspevku vybrané dve povodia zo severnej časti Slovenska a dve povodia z južnej. Konkrétne povodie na toku Kysuca so záverečným profilom Čadca, povodie toku Poprad po vodomernú stanicu Chmeľnica, na juhu povodie Žitavy v záverečnom profile Vieska nad Žitavou a povodie toku Slaná po vodomernú stanicu Lenartovce.

Výsledky analýz založených na údajoch o zrážkach a teplotách z databázy CarpatClim ukázali, že v období rokov 1961 – 2010 bol zaznamenaný stúpajúci lineárny trend v časovom rade ročných úhrnov zrážok, teplôt vzduchu a úhrnného výparu vo všetkých vybraných povodiach. Odtok z povodia v prípade južných povodí (Slaná, Žitava) má klesajúci trend a zo severnej časti mierne stúpajúci, avšak nie významný na základe Mann-Kendallovho testu pri 95 % hladine významnosti.

V ďalšej práci je plánované využiť a analyzovať hydrologické a meteorologické údaje v disponibilných gridových bodoch v SR v 49 povodiach podľa prezentovanej metódy. Taktiež sa bude hodnotiť vývoj a zmena monitorovaných klimatických a hydrologických prvkov. Porovná sa aj hodnovernosť údajov databázy CarpatClim so susediacimi zrážkomernými stanicami SHMÚ. Pre dosiahnutie cieľa detekcie zmien hydrologického režimu bude potrebné porovnať aj vývoj monitorovaných klimatických a hydrologických prvkov so staršími scenármi klimatickej zmeny.

Štúdiu považujeme za pilotnú pre podobnú analýzu v desiatkach povodí v SR, s cieľom získať obraz o hydrologickom režime a jeho zmenách.

Poďakovanie

Článok vznikol vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ SR a Slovenskej akadémie vied (VEGA 1/0632/19). Za poskytnutie údajov z klimatických staníc Slovenska ďakujeme Lapin a Melo (2012). Databáze CARPATCLIM Database © European Commission - JRC, 2013 ďakujeme za poskytnutie údajov o zrážkach a teplotách pre oblasť skúmaných povodí Slovenska. Ďakujeme anonymným recenzentom za konštruktívne pripomienky, ktoré výrazne prispeli ku skvalitneniu článku.

LITERATÚRA

Blaškovičová, L., et al., 2019, Stanovenie hydrologických charakteristík, čiastková úloha: Hodnotenie hydrologického sucha, Vedecko-výskumná úloha, Časť 2: Hodnotenie zmien a trendov mesačných a ročných prietokov, Slovenský hydrometeorologický ústav, 2019.

Bronstert, A.–Niehoff, D.–Bürger, L., 2002, Effects of climate and land – use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities. In: Hydrological Processes, 16 (2), 509 – 529, DOI: 10.1002/hyp.326. online: https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/34/174617/174617_doc.pdf.

Ďurigová, M.–Hlavčová, K.–Komorníková, M.–Kalická J.–Ballová, D.–Bacigál, T., 2019, Analýza zmien priemerných mesačných prietokov na Slovensku v posledných desaťročiach, Acta Hydrologica Slovaca, Ročník 20, č. 1, 2019, 10 – 21, DOI: 10.31577/ahs-2019-0020.01.0002. online: http://147.213.100.3/ah_articles/2019_20_1_Durigova_10.pdf.

Fendeková, M.–Poórová, J.–Slivová, V. et al., 2018, Hydrologické sucho na Slovensku a prognóza jeho vývoja, Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodoved. Fakulta. online: http://hydrogeology.sk/download/Hydrologicke_sucho_SR_a_prognoza_jeho_vyvoja_2018.pdf.

Hajdú J.–Pekárik L., 2009, Ichtyofauna dolného úseku povodia Žitavy, Folia faunistica Slovaca, 2009,14(11):81 – 87, Faunima, Bratislava, online: http://www.ffs.sk/ pdf/FFS-14-11-Hajdu-Pekarik-2009.pdf.

Hlavčová K., et al., 2005, On the possibility of assessment of land use change impact on runoff with a hydrological model with distributed parameters; Meteorological Journal; Volume 8., Number 2., 75 – 83.

Lapin, M.–Damborská, I.–Gera, M.–Melo, M.–Hrvol, J., 2016, Potenciálna a aktuálna evapotranspirácia na Slovensku v období 1951 – 2015 a scenáre možného vývoja do roku 2100; In: Proceedings of the Internat. Conf. in Kutná Hora, 28.-29.4.2016. Půdní a zemědělské sucho, Praha, VÚMOP, 210 – 225 [USB], ISBN 978-80-87361-55-9 (in Slovak), online: http://www.cbks.cz/SbornikKHora2016/sbornikKH2016.pdf.

Lapin M.–Melo M., 2012, Modifikácia klimatických klasifikácií pre podmienky teplejšej klímy na Slovensku; Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK, Mlynská dolina, F-1, 842 48 Bratislava, Meteorologický časopis, 15, 2012, 67 – 74.

Makeľ M.–Turbek J., et al., 2002: TNK 64 Hydrológia, MŽP, Terminologický výkladový slovník, Hydrológia, 60 str., 95. str., 166. str.

Melo, M.–Lapin, M.–Kapolková, H.–Pecho, J.–Kružicová, A., 2013, Climate Trends in the Slovak Part of the Carpathians. In: Kozak, J., Ostapowicz, K., Bytnerowicz, A., Wyžga, B. (eds.) (2013): The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 131 – 150. online: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/UNDESA%20Grenada_web%20version.

MŽP SR, Predbežné hodnotenie povodňového rizika v čiastkovom povodí Slanej, 2011; Implementácia smernice Európskeho parlamentu a Rady 2007/60/ES z 23. októbra 2007 o hodnotení a manažmente povodňových rizík, Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, online: https://www.minzp.sk/files/sekcia-vod/slana-suhrnny-dokument.pdf.

OSN, 2012, Climate change adaptation in Grenada: Water Resources, Coastal Ecosystems and Renewable Energy, Division for Sustainable Development, Department of Economic and Social Affairs, United Nations in cooperation with Ministry of Environment, Foreign Trade and Export Development of Grenada, 12-00065-September 2012 – 100; online: https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?page=view&nr=635&type=400&menu=35.

Parajka, J., 2001, Mapovanie dlhodobého priemerného ročného odtoku na území Slovenska, Dizertačná práca, Katedra Vodného hospodárstva krajiny, Stavebná fakulta v Bratislave.

Parajka, J.–Szolgay, J.–Mészároš, I.–Kostka, Z., 2004, Grid-based mapping of the long-term mean annual potential and actual evapotranspiration in upper Hron river basin, J. Hydrol. Hydromech., 52, 2004, 4, 7 – 8.

STN 75 0110, Vodné hospodárstvo, Hydrológia, Terminológia. ICS: 01.040.07;07.060.

Szalai, S.–Nejedlik, P.–Štastný, P.–Mikulová, K.–Szentimrey, T.–Bihari, Z.–Lakatos, M., 2012, Climate of the Carpathian Region, a project for a high resolution harmonized gridded database. Forum Carpaticum 2012, Stara Lesna, April, online: http://www.carpatclim-eu.org/pages/publications/.

Szentimrey, T.–Bihari, Z., 2007, Mathematical background of the spatial interpolation methods and the software MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis). Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology, Budapest, Hungary, 2004, COST Action 719, COST Office, 17 – 27.

Szolgay, J., 2004, Hydrológia, odtokový proces a hydrológia povrchových vôd. STU Bratislava.

Szolgay, J.–Hlavčová, K.–Mostny, V.–Parajka, J., 1997, Časové a priestorové zmeny hydrologickej bilancie na území východného Slovenska. (Monografia), STU. Bratislava.

Šimek, R.–Fendeková, M., 2012, Vývoj odtokových pomerov v povodí Žitavy, Podzemná voda XVIII 2/2012,online: http://sahpodzemnavoda.sk/cms/download.php?view.535

Tomlain, J., 1997, Rozloženie evapotranspirácie na území Slovenska za obdobie 1961 – 1990, Podzemná voda, III/1997 č. 1, online: http://sahpodzemnavoda.sk/cms/news.php.

Zhang, L.–Hickel, K.–Dawes, W.R.–Chiew, F.H.S.–Western, A.W.–Briggs, P.R., 2004, A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration, Water resources research, vol. 40(2), 1 – 14, doi:10.1029/2003WR002710.

Atlas krajiny Slovenskej republiky [online]. Banská Bystrica: Slovenská agentúra životného prostredia, Centrum environmentálnej informatiky, 2013. [cit. 16. 10. 2020]. online: http://geo.enviroportal.sk/atlassr/.

INFORMÁCIE
INFORMATION

INTENZÍVNY LEJAK NA PREDNEJ HORE DŇA 28. JÚNA 2020

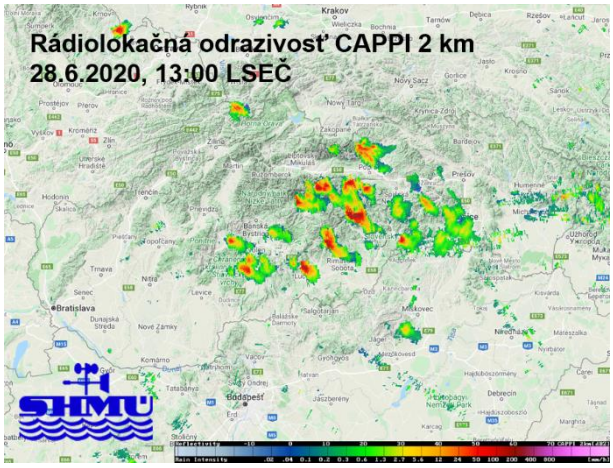
V súvislosti s intenzívnymi zrážkami u nás v lete v roku 2020 zarezonovala predovšetkým blesková povodeň, ktorá 19.6.2020 postihla obec Pichne, ležiacu severne od mesta Snina. O pár dní neskôr zasiahla dňa 28.6.2020 intenzívna búrka našu stanicu na Prednej Hore. Do tretice sme mimoriadne úhrny zrážok nad 100 mm zaznamenali 17. augusta v okrese Komárno.

Nasledujúci príspevok sa venuje práve prípadu z Prednej Hory. Búrka priamo zasiahla našu automatickú zrážkomernú stanicu a tak máme veľmi dobré údaje o trvaní zrážok a o ich intenzite. Ďalšou motiváciou prečo sme si vybrali práve túto udalosť, boli aj mimoriadne škody, ktoré boli spôsobené hneď na dvoch cestných komunikáciách. Poškodené cesty výrazne skomplikovali život tamojšiemu obyvateľstvu a dôležitá regionálna tepna medzi Muráňom a Červenou skalou, ktorá znamená prakticky najrýchlejšie prepojenie medzi Rimavskou Sobotou a Popradom, je ešte aj v závere septembra, t. j. tri mesiace po danej udalosti, neprejazdná.

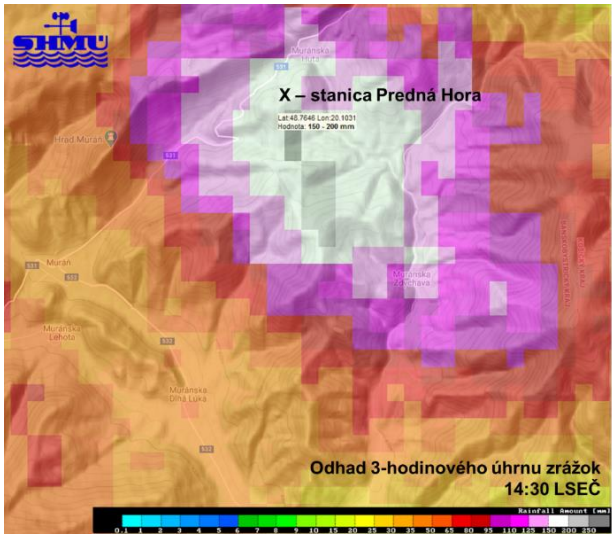
Záver júna 2020 bol v našej oblasti charakteristický prítomnosťou vlhkej a instabilnej vzduchovej hmoty aj s vplyvom tlakovej níže vo vyšších hladinách ovzdušia, a to najmä v období od 24. do 26.6. ***V nedeľu 28. 6.*** sa od západu do našej oblasti presunul hrebeň vysokého tlaku vzduchu a z makrosynoptického hľadiska boli podmienky na tvorbu zrážok mierne potlačené, avšak ***veľmi vlhká a instabilná vzduchová hmota*** sa nad našou oblasťou udržiavala aj naďalej. Vysoká vlhkosť vzduchu bola kľúčovým parametrom, ktorý viedol k tvorbe búrok s vysokým potenciálom prinášať intenzívne zrážky.

Dňa 28.6.2020 bolo možné v Banskobystrickom kraji a nad Nízkymi Tatrami pozorovať intenzívne búrky už asi hodinu po poludní (Obr. 1). Najintenzívnejšie búrky sa v tomto čase vytvorili na severe Gemera. Podľa radarového odhadu zrážok mohlo viac ako 100 mm za 3 hodiny spadnúť na pomerne veľkej ploche medzi obcami Muránska Zdychava a Muránska Huta (Obr. 2). Keďže ide o prepočet z poľa rádiolokačnej odrazivosti, tak výsledná hodnota je ovplyvnená napr. aj prítomnosťou väčších častíc v oblaku akými sú krúpy. Tie sa počas danej udalosti v oblasti tiež vyskytli a mali priemer cca 2 cm.

Obrázok 1. Pole rádiolokačnej odrazivosti – CAPPI 2 km, dňa 28.6.2020, 13:00 LSEČ.

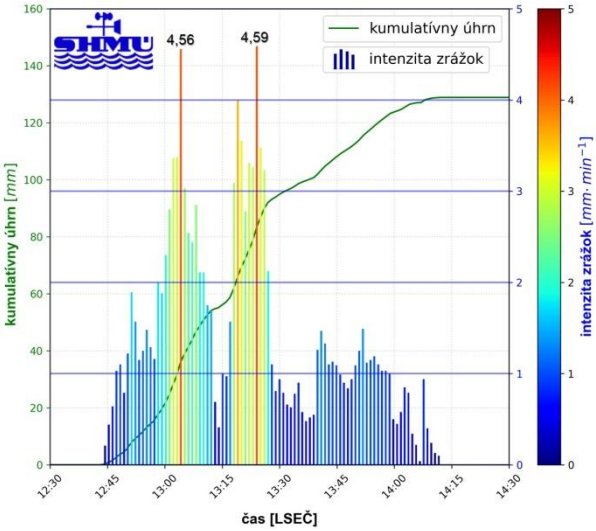


Obrázok 2. Odhad 3-hodinového úhrnu zrážok v oblasti Prednej Hory a okolí ku 14:30 LSEČ.

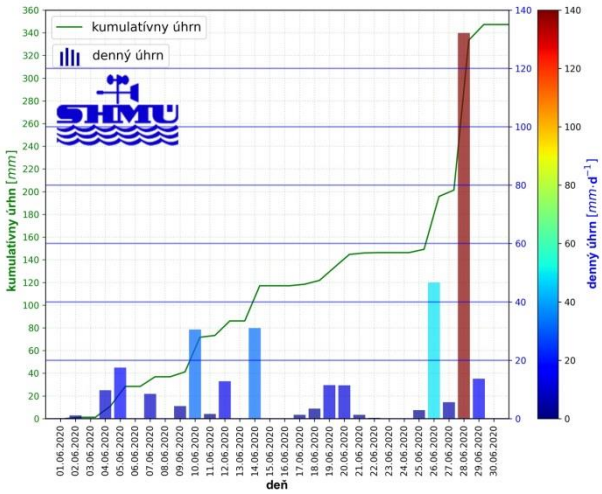


Obrázok 3. Klasická a automatická zrážkomerná stanica na Prednej Hore.

Obrázok 4. Celkový úhrn a intenzita zrážok na stanici Predná Hora dňa 28.6.2020 v čase od 12:30 do 14:30 LSEČ.



Obrázok 5. Denné úhrny zrážok na stanici Predná Hora v júni roku 2020.



Priamo v dotknutej oblasti máme v súčasnosti (rok 2020) stanicu len na Prednej Hore, v nadmorskej výške 842 m n. m. (Obr. 3). Stanice v Revúcej, v Muráni a v Telgárte sú už vzhľadom na charakter analyzovanej situácie príliš ďaleko. Automatická zrážkomerná stanica na Prednej Hore namerala zrážky, ktorých minútová intenzita bola hneď v troch termínoch 4 mm a viac. ***Celkovo spadlo*** na tejto stanici až ***132 mm***, z toho ***30 mm za 10 minút a 108 mm za 60 minút*** (Obr. 4). Následná povodňová vlna spôsobila značné škody hneď na dvoch cestných komunikáciách, vzdialených od seba vzdušnou čiarou približne 5 km, a na toku Zdychava bol vyhlásený tretí stupeň povodňovej aktivity (Halaj a kol., 2020).

Treba povedať, že 28.6 to nebolo prvý a ani poslednýkrát čo sme v tomto roku na našich staniciach namerali takto intenzívne zrážky. Len v období od 1.6.2020 do 31.7.2020 sa zrážky s podobnou intenzitou (aspoň 4 mm za minútu) vyskytli aj na staniciach Dudince (17.6.2020), Kurimka (18.6.2020), Čadca (27.6.2020), Mlynky (21.7.2020) a Skalité (24.7.2020). V oblasti Prednej Hory spadlo za mesiac jún nakoniec až 346,7 mm zrážok a denný úhrn zrážok takmer 46 mm tam bol nameraný aj 26.6.2020 (Obr. 5).

Údaje o denných úhrnoch zrážok sú na Slovensku k dispozícii väčšinou od roku 1901. Výsledky ich spracovania boli postupne publikované vo viacerých súborných štúdiách, či zborníkoch – napr. v práci Podnebí Československé socialistické republiky – tabulky a souborná studie (Kolektív autorov Hydrometeorologického ústavu, 1961 resp. 1969), v Zborníku prác zv. 14 (Šamaj a Valovič, 1978) a zv. 24 (Šamaj a kol., 1985). V práci Šamaj a kol. (1985) je uvedené, že ***na území Slovenska je možné denný úhrn zrážok 100 mm a viac označiť pojmom extrémny***. V období 1901 – 1980 sa pre Revúcu, mesto ležiace neďaleko na juh od Prednej Hory, uvádza najvyšší denný úhrn zrážok 110,3 mm. Bol nameraný dňa 27.6.1927 (Šamaj a kol., 1985). Celkovo tu v júni 1927 spadlo 178 mm zrážok, pričom v roku 2020 to bolo až 210,4 mm. Len pre zaujímavosť uvádzame, že počas najdaždivejšieho mesiaca, v novembri 1910, tu napršalo až 264 l vody na 1 m^2 (Šamaj a Valovič, 1978). Na Prednej Hore, v rovnakom období, bol maximálny denný úhrn zrážok 82,3 mm (29.6.1958) a v Muráni (obec vo vzdialenosti do 7 km juhozápadne od Prednej Hory) 103,7 mm, dňa 10.6.1937. V práci Šamaj a kol. (1985) sú uvedené aj hodnoty zabezpečenosti prekročenia maximálnych denných úhrnov zrážok vypočítané pomocou Pearsonovho rozdelenia III. typu z údajov nameraných za obdobie 1901 – 1980 a tiež hodnoty maximálnych denných úhrnov zrážok, s pravdepodobnosťou opakovania za N rokov podľa Gumbelovej štatistiky extrémov. Podľa tejto štatistickej analýzy má na Prednej Hore denný úhrn zrážok s pravdepodobnosťou opakovania raz za 100 rokov hodnotu 87,0 mm, v Revúcej 94,2 mm a v Muráni je to 102,5 mm.

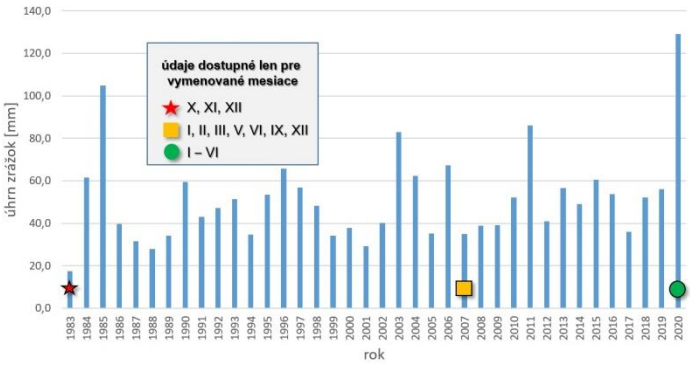
V dotknutej oblasti a neďalekom okolí máme k dispozícii aj novšie údaje o denných úhrnoch zrážok. Na Prednej Hore sa v období od októbra 1983 až do mája 2020 denný úhrn zrážok 100 mm a viac vyskytol len raz, a to v auguste v roku 1985 (Obr. 6). V júni 2020 to bol tak len druhý prípad takto vysokého denného úhrnu zrážok na tejto

stanici za posledných takmer 37 rokov. Bežným javom na tejto stanici je v rámci roka výskyt denného úhrnu zrážok od 20 do 40 mm. V publikácii Šamaj a kol. (1985) má denný úhrn zrážok s pravdepodobnosťou opakovania raz za 2 roky hodnotu 42,6 mm. Výnimočný nie je ani 24-hodinový úhrn zrážok od 60 do približne 80 mm, a to predovšetkým v júli a v auguste. V neďalekej Revúcej sa denný úhrn zrážok 20 až 40 mm vyskytuje pravidelne každý rok. Avšak 24-hodinový úhrn zrážok viac ako 60 mm je ojedinelým javom (Obr. 7). Podľa analýzy zrážkovej udalosti, ktorá sa v tejto lokalite vyskytla v roku 2016 (Siman a Pecho, 2016), tu denný úhrn zrážok 58 mm predstavuje 100-ročný dážď (úhrn zrážok s pravdepodobnosťou opakovania raz za 100 rokov). V práci Šamaj a kol. (1985) bola pre Revúcu uvedená vyššia hodnota denného úhrnu s pravdepodobnosťou opakovania raz za 100 rokov. Vypočítaná pravdepodobnosť opakovania sa môže líšiť v závislosti od zvolenej metódy a analyzovaného časového radu. V spomínanom roku 2016 spadlo dňa 29.7. na stanici v severnej časti mesta Revúca 112 mm zrážok (išlo o trojhodinový zrážkový úhrn). Bol to jediný prípad v období od júla 1984 do júna 2020 kedy sme na tejto stanici zaznamenali 24-hodinový úhrn zrážok viac ako 100 mm. Na stanici v Muráni sme v období od júna 1967 do júna 2020 nezaznamenali ani jeden rok s denným úhrnom zrážok presahujúcim 100 mm (Obr. 8). Treba však zároveň dodať, že zo stanice chýbajú údaje za pomerne dlhé obdobie medzi rokmi 1983 a 1991. Najvyšší 24-hodinový úhrn zrážok v období od roku 1967 do roku 2020 tu bol zaznamenaný v júli 1981 a mal hodnotu 81,6 mm. Avšak v predošlom období tu bol nameraný aj úhrn zrážok cez 100 mm (viď text vyššie).

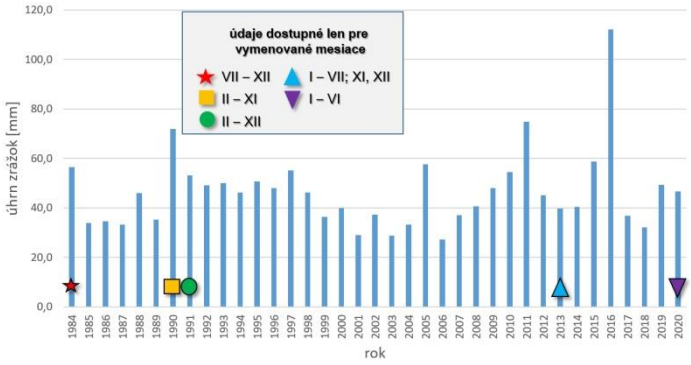
Na základe analýzy minútových zrážkových intenzít z automatickej stanice na Prednej Hore a porovnaním denného úhrnu zrážok zo dňa 28.6.2020 s dostupnými údajmi z dotknutej oblasti zo začiatku 20. st., môžeme povedať, že išlo v tejto oblasti o mimoriadnu zrážkovú udalosť, ktorej dôsledkom boli tiež veľké škody na dvoch cestných komunikáciách. Na Prednej Hore spadlo podľa automatickej stanice za 24 hodín 132 mm zrážok. V danej lokalite je ešte jeden zrážkomer, odčítavaný pozorovateľom, ktorý uviedol do výkazu hodnotu 129,1 mm. Tak či onak, ide o najvyšší denný úhrn zrážok nameraný na tejto stanici od začiatku 20. st. Navyše, ***júnový úhrn 347,6 mm bol zrejme najvyšším mesačným úhrnom zrážok na tejto stanici***. V budúcnosti by bolo prospešné zanalyzovať krátkodobé (minútové, desaťminútové) intenzity zrážok za dlhšie obdobie, a v praxi by pomohlo aj porovnanie úhrnov zrážok nameraných na našich pozemných staniciach s radarovými odhadmi úhrnov zrážok.

Viac informácii je možné nájsť v aktualitách na web stránke SHMÚ (link: *https://lnk.sk/ctjm*).

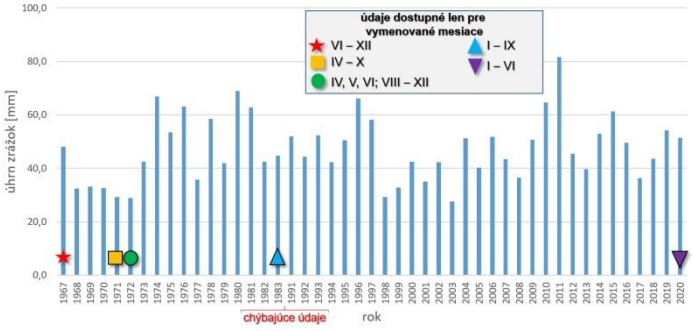
Obrázok 6. Maximálne denné úhrny zrážok na stanici Predná Hora v období 1983 – 2020.



Obrázok 7. Maximálne denné úhrny zrážok na stanici Revúca v období 1984 – 2020.



Obrázok 8. Maximálne denné úhrny zrážok na stanici Muráň v období 1967 – 2020.



Zdroje a literatúra

Halaj, M.–Hrušková, K.–Trstenský, T., 2020, Extrémna búrka a prívalová povodeň na Muránskej planine. Aktuality SHMÚ. http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=1068.

Kolektív autorov Hydrometeorologického ústavu, 1961, Podnebí Československé socialistické republiky – tabulky. Praha: Polygrafia, 379 s.

Kolektív autorov Hydrometeorologického ústavu, 1969, Podnebí Československé socialistické republiky – souborná studie. Praha: Severografia, 355 s.

Siman, C.–Pecho, J., 2016, Extrémne úhrny zrážok v závere júla 2016. Aktuality SHMÚ. http://www.shmu.sk/sk/?page=2049&id=736.

Šamaj, F.–Valovič, Š., 1978, Dlhodobé priemery úhrnu zrážok na Slovensku za obdobie 1901–1970. Zborník prác SHMÚ, zv. 14., Bratislava: Alfa, 413 s.

Šamaj, F.–Valovič, Š.–Brázdil, R., 1985, Denné úhrny zrážok s mimoriadnou výdatnosťou v ČSSR v období 1901 – 1980. Zborník prác SHMÚ, zv. 24., Bratislava: Alfa, 225 s.

Cyril Siman
SHMÚ, Bratislava

ČO PRINIESLO 80 ROKOV UNIKÁTNYCH METEOROLOGICKÝCH POZOROVANÍ NA LOMNICKOM ŠTÍTE

Meteorologická stanica na Lomnickom štíte, nachádzajúca sa na najvyššom trvalo osídlenom mieste na Slovensku (2635 m n. m.), oslávila na začiatku októbra tohto roku 80. výročie svojho založenia (1. októbra 1940). Relatívne vysoká nadmorská výška, v kombinácii s výraznou štítovou polohou (podmienky voľnej atmosféry), zásadne podmieňujú veľmi osobitý charakter poveternostných a klimatických podmienok, ktoré sú skôr typické pre oblasti v blízkosti polárneho kruhu. V predkladanom článku prinášame, okrem krátkeho historického exkurzu, aj zhodnotenie meteorologických meraní a pozorovaní, ktoré s výnimkou krátkeho prerušenia, medzi januárom 1945 a decembrom 1946, trvajú úspešne až do dnešných dní a ponúkajú zaujímavý pohľad na unikátne meteorologické podmienky vysokohorského prostredia. V závere článku prinášame obsiahlejšie tabelárne zhodnotenie historických denných, mesačných, sezónnych a ročných extrémov vybraných charakteristík meteorologických prvkov (teplota vzduchu, atmosférické zrážky, snehová pokrývka, slnečný svit, rýchlosť vetra), dostupných prevažne od roku 1940.

História

Na konci 19. storočia sa v strednej a západnej Európe začali na štítoch veľhôr zriaďovať meteorologické observatóriá. Konkrétnejšia túžba meteorológov o zriadení vysokohorského meteorologického observatória aj v našich Tatrách siaha do dôb Rakúsko-Uhorska okolo roku 1910. Základnou myšlienkou bolo vybudovať takéto pracovisko v oblasti Karpát a niektorý zo štítov Vysokých Tatier tak pripadal do úvahy celkom prirodzene. Maďarskí (uhorskí) meteorológovia sa najskôr zamýšľali nad umiestnením observatória priamo na najvyššom Gerlachovskom štíte, či na Slavkovskom štíte. Skôr, než sa však plán mohol dostať aspoň do počiatočného štádia, vypukla prvá svetová vojna.

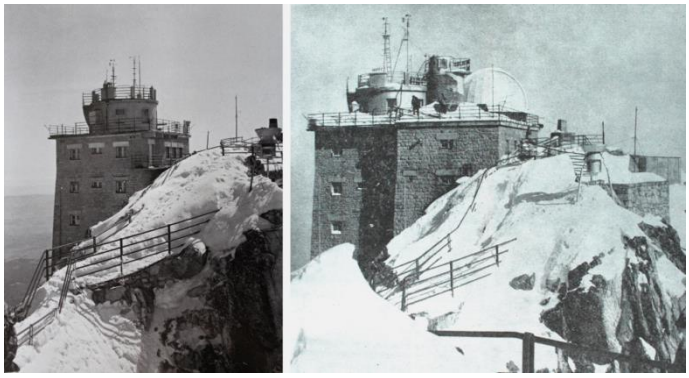
V roku 1933 sa technické kruhy začali reálne zaoberať plánom na postavenie lanovej dráhy na Lomnický štít, primárne na turistické účely (projekt bol definitívne zadaný 13. novembra 1934) a meteorológovia v tom uvideli vhodnú príležitosť na presadenie svojich vojnou utlmených vízií. Voľba vrcholu, na ktorý mala viesť visutá lanová dráha, padla napokon na Lomnický štít z jednoduchej príčiny - „vládol“ pod ním iniciátor lanovky. Štvorročné propagačné a organizačno-plánovacie úsilie, opierajúce sa o meteorologické memorandum z 11. januára 1935, o nutnosti pojať do budovy vrcholovej stanice lanovej dráhy aj priestory pre meteorologické observatórium, bolo napokon korunované úspechom. S prácami na stavbe lanovky sa začalo ešte v roku 1935 a meteorologická pozorovateľňa bola do budovania stavby na štíte postupne doprojektovaná. V radoch osobností, ktoré najaktívnejšie prispeli k vzniku pracoviska meteorológov na Lomnickom štíte boli mnohé kľúčové postavy meteorológie a klimatológie vo vtedajšom Československu, ako napr. prof. Alois Gregor, prof. Rudolf Schneider, dr. Gustav Swoboda, prof. Ferdinand Vitásek, prof. Mikuláš Konček, alebo dr. Štefan Petrovič. Azda najviac je však vznik a počiatočná správa a chod observatória previazaný s osobou meteorológa a astronóma dr. Antonína Bečvářa, ktorý v tom čase taktiež inicioval stavbu štátnej hvezdárne na Skalnatom Plese.

Stavba budovy na Lomnickom štíte, ktorej projektantom bol významný slovenský architekt Dušan Jurkovič a spolu s lanovkou je technickou pamiatkou, začala v roku 1938 a bola dokončená v lete 1940. Hoci oficiálna prevádzka lanovky ešte nebola povolená, hneď sa začalo s inštaláciou prístrojového vybavenia a 1. októbra 1940, zhruba tridsať rokov od prvej požiadavky, zahájilo meteorologické observatórium svoju pozorovateľskú činnosť. Observatórium je v rámci budovy, postavenej z opracovanej žuly z okolia štítu a betónu, trvalo umiestnené v jej hornej časti, v tzv. rotunde so strešnou vyhliadkou. Hlavným pozorovateľom na začiatku prevádzky bol Jozef Uhlár, o tri roky neskôr ako druhý hlavný pozorovateľ pribudol Štefan Olejník. Medzičasom z dôvodu už prebiehajúcej druhej svetovej vojny, boli na výpomoc pridelení aj vojaci slovenskej armády a neskôr Wehrmachtu, a to kvôli priradeniu klasifikácie pracoviska za vojenskú leteckú poveternostnú stanicu. Postupne sa na pracovisku vystriedalo veľké množstvo pozorovateľov, mnohí len na krátku dobu počas nástupnej alebo prevádzkovej praxe resp. len ako zástup za kmeňových zamestnancov. Medzi dlhodobých pozorovateľov observatória (podaktorí sa neskôr stali vedúci pracoviska) patrili Dr. A. Mrkos, J. Žársky, M. Janek, M. Rajčan, M. Tekeľ, M. Honig, J. Čupeľ, J. Pikler a súčasný vedúci Ľ. Stančík.

V noci z 20. na 21. januára 1945 nemecká vojenská jednotka obsadila budovu observatória s nariadením jeho evakuácie a prinútila personál opustiť priestory, pozorovatelia demontovali všetky meracie prístroje a väčšinu z nich odoslali do Bratislavy. Zároveň Nemci pred odchodom zničili stanicu lanovky v Tatranskej Lomnici, čím prerušili dopravu na štít na dlhší čas. V lete a na jeseň 1946 sa podarilo nanovo zhromaždiť všetky potrebné prístroje, no opätovne zaručiť dopravu na štít pre potrebu observatória bolo možné až od konca roku 1946. V závere decembra 1946 boli práce na opätovnej inštalácii vybavenia dokončené a činnosť observatória bola obnovená od 1. januára 1947 v plnom rozsahu ako pred vojnovým prerušením. V obnovenej prevádzke už pozorovania plnohodnotne zabezpečovali zamestnanci meteorologického ústavu, pričom bez ďalších prerušení prebiehajú pozorovania až do dnešného dňa. Prevádzka meteorologického observatória nebola prerušená ani pri výpadkoch kúrenia, keď pozorovatelia často trpeli zimou, ani v obdobiach nepremávania lanovej dráhy, keď boli zamestnanci nútení prísť na pracovisko pešo, neraz aj v ťažkých podmienkach. Observatórium spočiatku nebolo elektrifikované, osvetlenie zabezpečovala len akumulátorová batéria. Stály elektrický prúd s väčším napätím bol zavedený v 50. rokoch 20. storočia.

Okrem hornej stanice lanovky sa na Lomnickom štíte v rámci budovy nachádzalo najprv len meteorologické observatórium. V krátkosti ale tiež doplňme, že dr. Bečvář už od počiatku plánoval budúce rozšírenie stavby aj o observatórium astronomické (Obr. 1). Práce na jeho prístavbe napokon prebehli v rokoch 1954 – 1962 (skolaudované bolo už vo februári 1961), astronomické pozorovania tu začali ešte v roku 1962 a trvalé pracovisko astronómov z Astronomického ústavu Slovenskej akadémie vied pribudlo v roku 1964.

Obrázok 1. Historické fotografie meteorologického a neskôr aj astronomického observatória na Lomnickom štíte, vľavo z 50. rokov (ešte bez pristaveného astronomického observatória), a vpravo z prelomu 60. a 70. rokov 20. storočia.



Unikátnosť polohy (a meraní) meteorologickej stanice na Lomnickom štíte

Meteorologické observatórium Lomnický štít je absolútne nezameniteľným a podstatným prvkom siete slovenských meteorologických staníc. Pracovisko zohráva dôležitú úlohu nielen pri monitorovaní počasia a klímy Slovenska, jeho význam je ale vďaka unikátnej polohe nadnárodný. Na najvyššie trvalo osídlenom mieste Slovenska ide logicky o najvyššie položenú meteorologickú stanicu u nás (2 635 m n. m.) a prirodzene aj v rámci bývalého Československa. Prvenstvo v tomto ohľade prevzala od niekdajšej stanice pri Zbojníckej chate v neďalekej Veľkej Studenej doline, ktorá ležala vo výške 1 958 m n. m. Observatórium SHMÚ na Lomnickom štíte je plnohodnotným profesionálnym pracoviskom s vykonávaním niektorých špeciálnych činností ako je meranie námrazy či niektoré prvky radiácie (priame slnečné žiarenie a globálne žiarenie). V súčasnosti sa pozorovatelia štandardne striedajú v desaťdňových turnusoch, pričom denná pracovná doba trvá zhruba 14,5 hodiny. Stála prítomnosť pozorovateľa, vykonávajúceho pozorovania, je nutná.

Za osemdesiat rokov prešlo meteorologické observatórium viacerými generačnými obmenami v prístrojovom vybavení, spôsobe odovzdávania hlásení a samozrejme aj personálnym obsadením. Pracovisko pozorovateľa sa nachádza v rotunde na streche budovy hornej stanice visutej lanovej dráhy na Lomnickom štíte vo výške 2635 m n. m. Meracie prístroje sú umiestnené na rovnej streche budovy, ktorá tvorí terasu popri rotunde a na streche rotundy. Samotná meteorologická búdka nemá klasický podstavec a je pripevnená k severovýchodnej strane rotundy, teplomery sú v nej umiestnené vo výške 120 cm nad strechou. Na južnej strane terasy boli inštalované dva zrážkomery, pričom jeden s protiveternou ochranou Nipher, záchytná plocha bola vo výške 150 cm nad strechou, neskôr boli zrážkomery premiestnené. Ešte vyššie, na streche rotundy, sa nachádzajú meradlá pre záznam slnečného svitu a žiarenia a na približne 6 metrov vysokom stožiari meradlá pre záznam smeru a rýchlosti vetra. Okrem obvyklého prístrojového vybavenia malo observatórium v čase uvedenia do činnosti nasledujúce špeciálne prístroje: univerzálny anemograf typu Fuess v prevedení pre vysokohorské stanice, anemograf typu Dines, mikrobarograf Tycos (od firmy Short and Mason), aktinometer Michelson - Marten, aktinograf podľa Robitzscha, váhový ombrograf Fuess, slnkomer Campbell - Stokes, slnkomer Stade - Becker a katateplomer. Tlak vzduchu sa začal merať s približne dvojtýždňovým oneskorením. Zaujímavosťou bolo aj meranie výparu.

Od roku 1947, po obnovení prevádzky observatória, sa posunul klimatologický termín merania z pôvodnej 38. na 39. minútu. V septembri 1996 bola na observatóriu nainštalovaná automatická meteorologická stanica Vaisala MILOS500. Svojej generačnej obmeny sa dočkala až v roku 2015, kedy bola nainštalovaná nová automatická stanica AMS111 od slovenského výrobcu Microstep-MIS. Do roku 2000 pracovalo observatórium ako synoptická stanica v nepretržitej prevádzke. Po jej zrušení sa na pracovisku pozoruje len v čase od 6. do 20. hodiny UTC, pričom v nočných hodinách sú údaje k dispozícii z automatickej stanice. V súčasnosti na observatóriu zaznamenávame viac ako 10 meteorologických parametrov v minútovom kroku a ďalšie 3-krát alebo 1-krát denne. Okrem toho kolegovia pozorujú meteorologické javy, dohľadnosť a oblačnosť, a to ako nad, tak aj pod úrovňou stanice.

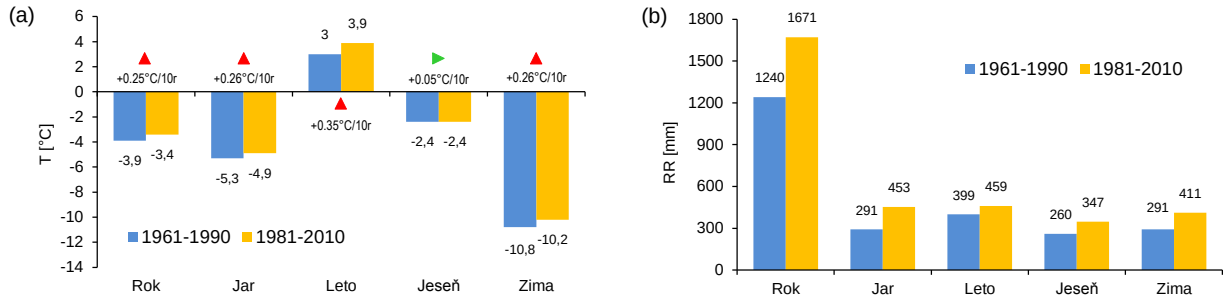
K existencii, fungovaniu a práci na tomto vysokohorskom pracovisku sa azda najkrajšie hodí poetický opis najvýraznejšej postavy jeho histórie - samotného dr. Bečváře: „*Dva a pol kilometra vysoko stojí žulová tvrdz, do boku poraneného, pokoreného končiara vsadená sklenenými oblokmi do všetkých strán pozerá, vznášajú sa betónové terasy nad priepasťami, krútia sa rotory anemografov rýchlosť vetrov dňom i nocou zaznačujúce, zapisujú složité prístroje svit a silu Slnka, vlastnosti riedkeho vzduchu, neviditeľné čísla prírody, diania.*“

Na rozdiel od ostatných slovenských lokalít s meteorologickými stanicami, vrcholová poloha meteorologického observatória. na Lomnickom štíte umožňuje, vzhľadom k svojej nadmorskej výške, zaznamenávať podmienky tzv. voľnej atmosféry. Okrem zjavných osobitostí miestneho počasia a klímy, akými sú nižšie teploty, intenzívnejšie zrážky, či často krát extrémne veterné pomery, patria medzi charakteristické miestne poveternostné prejavy napríklad tieto: pravidelne sa vyskytujúce sneženie v priebehu celého roka, oblačnosť často ležiaca pod úrovňou stanice (prítomnosť inverzného rozhrania), vyššia intenzita búrkovej činnosti, poloha v hmle pri prechode atmosférických frontov, výrazný výskyt mrznúcej hmly a silnej námrazy, vyššie ročné sumy slnečného svitu než na našich nížinách, alebo cezhraničný prehľad o oblačnosti nad štyrmi susednými štátmi (Česko, Maďarsko, Poľsko, Ukrajina) v dňoch s dobrou dohľadnosťou.

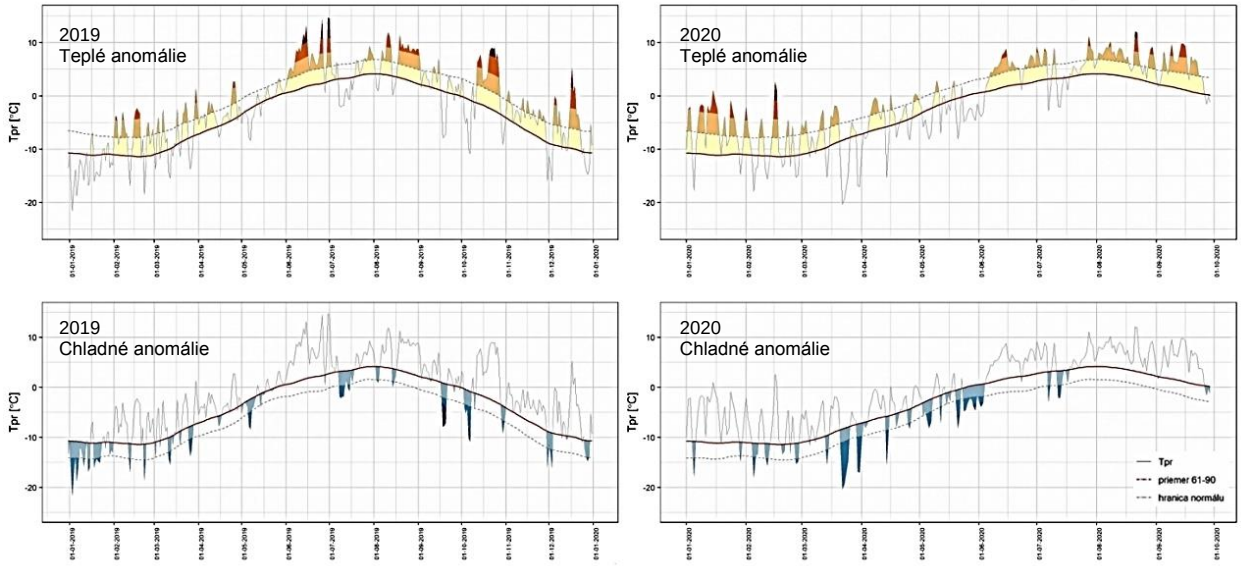
Klimatologická charakteristika vrcholovej polohy Lomnického štítu

Hrebeňové a vrcholové polohy Vysokých Tatier, ktoré veľmi dobre reprezentuje meteorologická stanica na Lomnickom štíte, patria medzi najchladnejšie regióny na Slovensku a podľa klimatickej klasifikácie podľa Končeka (1961 – 1990; Klimatický atlas Slovenska) patrí aj vrcholová poloha meteorologickej stanice do chladnej klimatickej oblasti (C), v rámci ktorej potom do studeného horského okrsku (s priemernou teplotou v júli nižšou ako 10 °C).

Obrázok 2. (a) Ročný a sezónne priemery teploty vzduchu [°C] a ich dlhodobé zmeny vyjadrené rastom/poklesom v °C za desaťročie (dekádu) na meteorologickej stanici Lomnický štít v rámci normálových období 1961 – 1990 a 1981 – 2020; (b) to isté, ale pre ročný a sezónne úhrny atmosférických zrážok [Zdroj: SHMÚ].



Obrázok 3. Vývoj priemernej dennej teploty vzduchu (Tpr), resp. teplých a chladných periód (v porovnaní s normálom 1961 – 1990) na meteorologickej stanici Lomnický štít v rokoch 2019 – 2020; pre prehľadnosť sú farebnou škálou vyznačené stupne nadnormálnosti/podnormálosti Tpr; napr. pre teplé anomálie ide o: 1) nadnormálne (oranžová); 2) silne nadnormálne (tmavooranžová), 3) mimoriadne nadnormálne (tmavočervená) a 4) extrémne nadnormálne (tmavo hnedá) [Zdroj: SHMÚ].

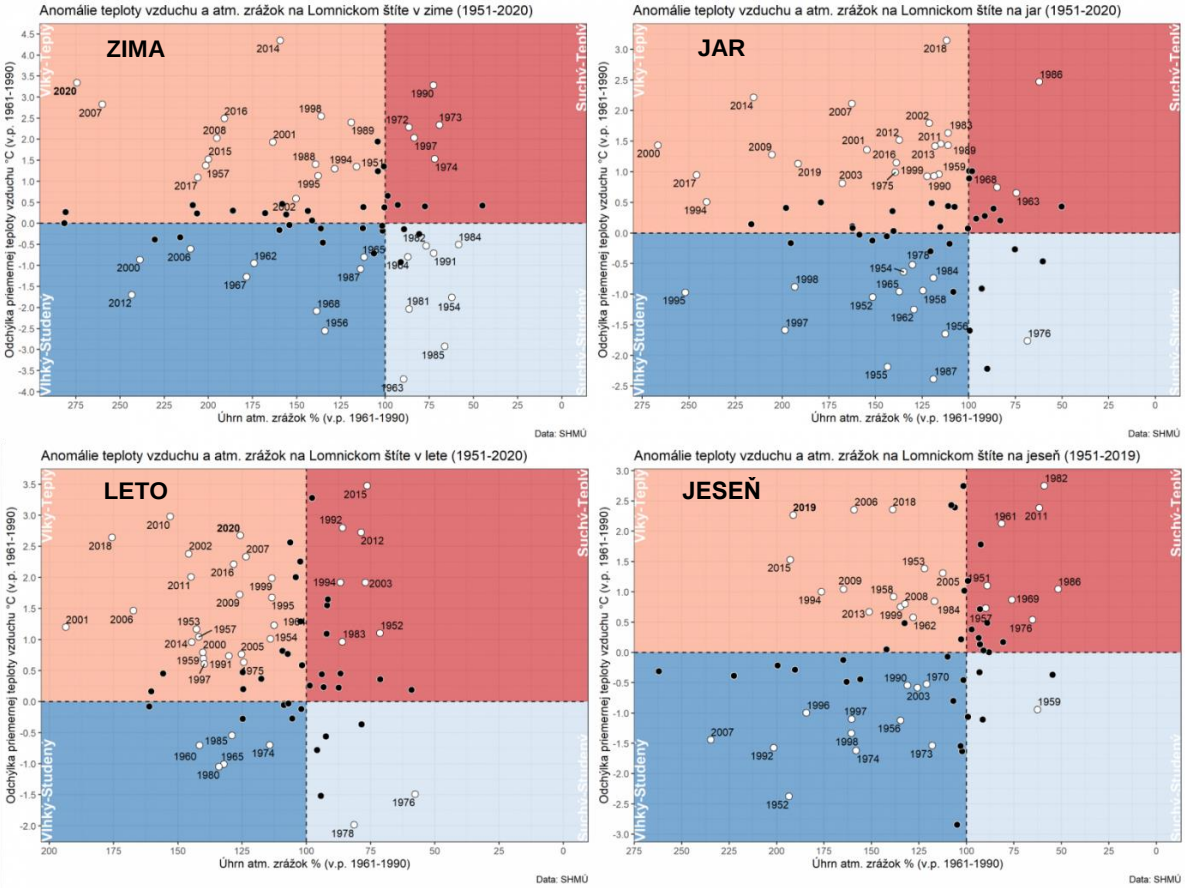


Priemerná ročná teplota vzduchu na Lomnickom štíte bola v rámci štandardného normálového obdobia 1961 – 1990 na úrovni takmer –4,0 °C (–3,9 °C), v rámci teplejšieho normálu 1981 – 2010 je to potom –3,4 °C (Obr. 2a). Dlhodobé sezónne (resp. ročné) priemery teploty vzduchu, ako aj ich vývoj od roku 1951 prinášajú Obr. 2, 5, 6. Rýchly nárast ročnej priemernej teploty vzduchu, a to hlavne po roku 1990 (s priemerným tempom +0,25 °C/10r), je dominantne ovplyvnený najmä rastom teploty vzduchu v priebehu leta (jún – august; +0,35 °C/10r). Najvyššia mesačná priemerná teplota vzduchu bola zaznamenaná v auguste 2015 (8,3 °C), naopak najnižšia vo februári 1965 (–18,1 °C). V ročnom priemere bol najteplejší rok 2014 (–1,6 °C), naopak najchladnejší rok 1956 (–5,2 °C). Priemerný ročný počet mrazových dní (Tmin < 0 °C) bol v období 1981 – 2010, 278, počet ľadových dní (Tmax < 0 °C) 187 a počet arktických dní (Tmax ≤ –10 °C) 39. Ich dlhodobý vývoj je zobrazený na Obr. 7.

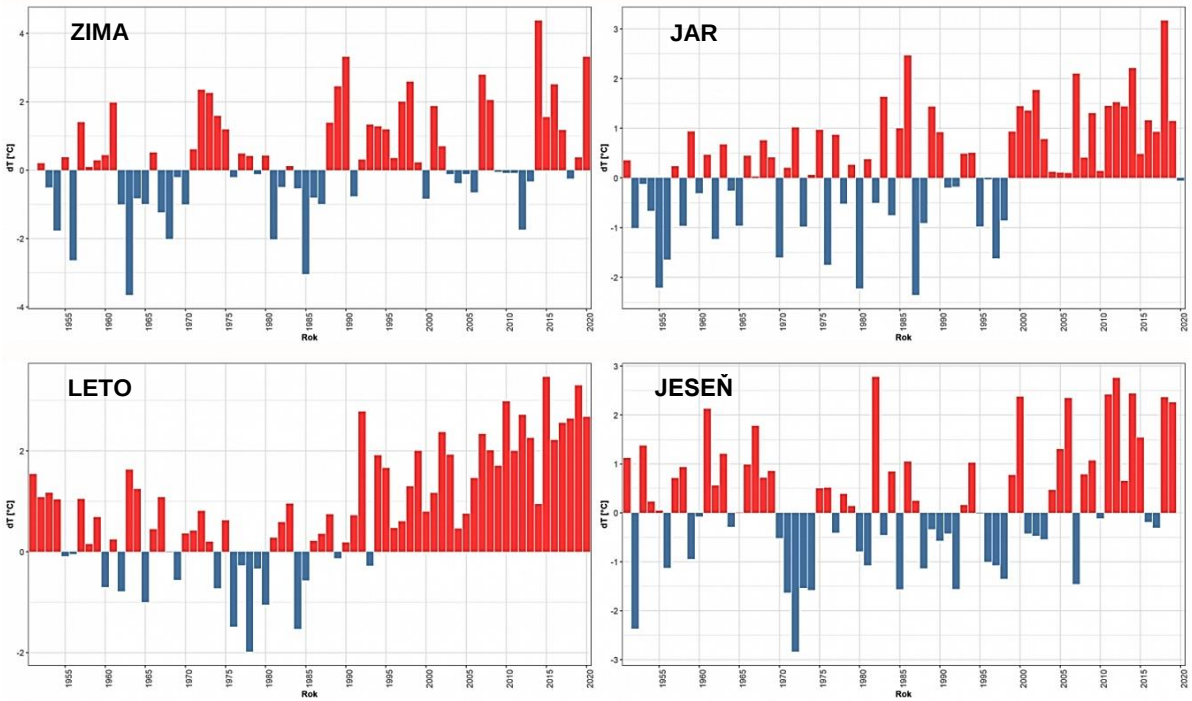
Významne sa zvýšili aj celkové úhrny zrážok, v ročnom priemere až o +35 % (z 1 240 mm v období 1961 – 1990 na 1 671 mm v období 1981 – 2010), pričom najvýraznejšie sa úhrn zrážok zvýšil v sezónach jar (+56 %) a zima (+41 %) (Obr. 2b). Najvyšší mesačný úhrn zrážok bol na stanici zaznamenaný v marci 2009, a to 454,6 mm, naopak najmenej to bolo v novembri 2011, a to len 0,4 mm. Z hľadiska úhrnov atmosférických zrážok sú veľmi zaujímavé aj niektoré historické rekordy, ktoré boli na Lomnickom štíte zaznamenané ešte pred rokom 1951, napríklad najvyšší júnový úhrn (322,2 mm) v roku 1948, alebo najvyššie sezónne úhrny atm. zrážok za jar (840 mm v roku 1945) a leto (860,8 mm v roku 1949). Veľmi pozoruhodný je aj „letitý“ rekord najvyššieho 24-hodinového úhrn zrážok, 141,2 mm, z 29. júna 1958.

Podobne ako zrážkové, zaujímavé sú aj podmienky vytvárania snehovej pokrývky, ktorá sa na Lomnickom štíte môže vyskytovať v podstate celoročne. Aj napriek tomu, že snehové pomery sú v takýchto vrcholových polohách neštandardné a len ťažko porovnateľné s nižšie položenými oblasťami (časté sfúkavanie snehovej pokrývky z vrcholu, ale naopak aj vytváranie vysokých závejov v závetrí budovy observatória), aj tu je možné v historických údajoch nájsť niektoré veľmi zaujímavé rekordy, a to najmä od roku 2000. Najviac nového snehu za 24 hodín napadlo na Lomnickom štíte 18. januára 2000 (88 cm).

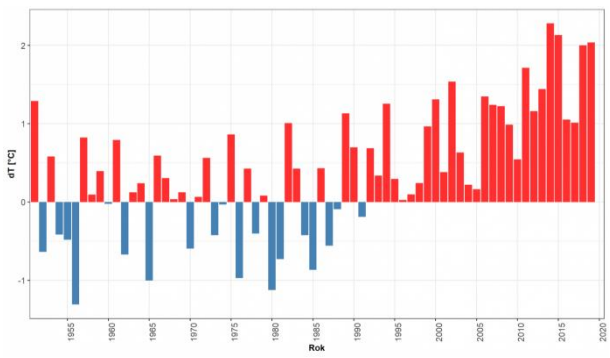
Obrázok 4. Pozícia jednotlivých ročných sezón (zima, jar, leto a jeseň) v období rokov 1951 – 2020, pre jeseň do roku 2019, na meteorologickej stanici Lomnický štít v závislosti od dosiahnutej odchýlky priemernej sezónnej teploty vzduchu od normálu 1961 – 1990 (na osi x) a sezónneho úhrnu atmosférických zrážok (v % normálu 1961 – 1990) v rámci kvadrantov „vlhký-teplý“ (hore vľavo), „suchý-teplý“ (hore vpravo), „vlhký-studený“ (dole vľavo) a „suchý-studený“ (dole vpravo) [Zdroj: SHMÚ].



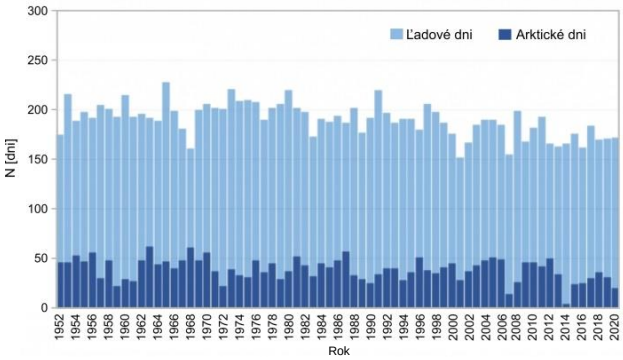
Obrázok 5. Vývoj odchýlky priemernej sezónnej teploty vzduchu za zimu, jar, leto a jeseň od normálu1961 – 1990 na meteorologickej stanici Lomnický štít v období rokov 1951 – 2020 [Zdroj: SHMÚ].



Obrázok 6. Vývoj odchýlky priemernej ročnej teploty vzduchu od normálu 1961 – 1990 na meteorologickej stanici Lomnický štít v období rokov 1951 – 2020 [Zdroj: SHMÚ].



Obrázok 7. Vývoj počtu ľadových (Tmax < 0 °C) a arktických (Tmax ≤ –10 °C) dní na meteorologickej stanici Lomnický štít v období rokov 1951 – 2020 [Zdroj: SHMÚ].



Tabuľka 1. Extrémy vybraných meteorologických charakteristík pre meteorologickú stanicu Lomnický štít za obdobie od 1.X.1940 (v niektorých prípadoch od 1.I.1951) do 25.X.2020 (nedostupné údaje o teplote vzduchu - prerušenie pozorovania z dôvodu vojnových udalostí: 1.I.1945 – 31.XII.1946).

charakteristika	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	jar	leto	jeseň	zima	teplý polrok	chladný polrok	rok
	TEPLOTA VZDUCHU																		
najvyšší M/S/R priemer	-5,9 2020	-6,2 2014	-4,9 1959, 1991	-0,2 2018	3,5 2003	7,5 2019	7,5 1995	8,3 2015	5,7 1982	2,2 1943	-2,4 1978, 2011 2014	-4,3 2015	-2,1 2018	6,4 2015	0,4 1982 2012	-6,3 2013/ 2014	3,7 2018	-4,8 2013/ 2014	-1,6 2014
najnižší M/S/R priemer	-17,5 1963	-18,1 1965	-14,7 1987	-9,9 1997	-4,4 1980 1991	-0,7 1974	0,6 1979	0,2 1976	-2,6 1996	-7,1 1974	-10,8 1973	-14,2 1940	-7,7 1987	1,0 1978	-5,2 1972	-14,3 1962/1963	-1,3 1978	-10,1 1955/1956	-5,2 1956
najvyššie maximum	5,4 17.I.1947	5,1 17.II.2020	6,3 18.III.1990	9,3 23.IV.1962 30.IV.2012	16,0 7.V.2003	17,5 26.VI.2019	19,5 1.VII.2019	19,4 20.VIII.1943	14,8 15.IX.1947	12,7 22.X.1943 3.X.2001	10,8 3.XI.2015	6,8 14.XII.1942	16,0 7.V.2003	19,5 1.VII.2019	14,8 15.IX.1947	6,8 14.XII.1942	19,5 1.VII.2019	12,7 22.X.1943 3.X.2001	19,5 1.VII.2019
najnižšie maximum	-27,9 31.I.1956	-26,7 18.II.1985	-23,1 9.III.1956	-17,9 8.IV.2003	-13,3 20.V.1952	-8,0 1.VI.1977	-4,0 4.VII.1984	-5,2 20.VIII.1949	-8,7 29.IX.1972	-16,4 27.X.1997	-20,4 30.XI.1973	-22,8 15.XII.1961	-23,1 9.III.1956	-8,0 1.VI.1977	-20,4 30.XI.1973	-27,9 31.I.1956	-17,9 8.IV.2003	-27,9 31.I.1956	-27,9 31.I.1956
najvyššie minimum	0,2 12.I.1998	0,8 21.II.1990	1,0 19.III.1990	4,2 30.IV.2012	7,4 15.V.1969	10,4 29.VI.1994	10,9 29.VII.2013	11,8 3.VIII.1998	9,0 18.IX.1975	8,4 24.X.2019	6,3 4.XI.2004	2,4 1.XII.2000	7,4 15.V.1969	11,8 3.VIII.1998	9,0 18.IX.1975	2,4 1.XII.2000	11,8 3.VIII.1998	8,4 24.X.2019	11,8 3.VIII.1998
najnižšie minimum	-31,6 13.I.1968	-30,1 2.II.1949 8.II.1956	-31,4 3.III.1987	-22,8 18.IV.1955 8.IV.1956	-18,3 20.V.1952	-12,4 2.VI.1977	-8,0 16.VII.1977	-8,4 25.VIII.1980	-13,1 22.IX.1948	-19,9 26.X.1997	-28,7 30.XI.1957	-30,4 27.XII.1976	-31,4 3.III.1987	-12,4 2.VI.1977	-28,7 30.XI.1957	-31,6 13.I.1968	-22,8 18.IV.1955 8.IV.1956	-31,6 13.I.1968	-31,6 13.I.1968
najvyšší denný priemer (od 1.I.1951)	2,2 15.I.1975	3,2 3.II.2002	3,9 31.III.1981	6,4 30.IV.2012	10,6 30.V.2005	14,7 30.VI.2019	14,5 1.VII.2019	14,0 8.VIII.2013	11,0 3.IX.1956	10,1 19.X.2012	8,7 3.XI.2015	5,2 17.XII.2019	10,6 30.V.2005	14,7 30.VI.2019	11,0 3.IX.1956	5,2 17.XII.2019	14,7 30.VI.2019	10,1 19.X.2012	14,7 30.VI.2019
najnižší denný priemer (od 1.I.1951)	-29,8 16.I.1963	-28,4 18.II.1985	-30,9 3.III.1987	-20,6 18.IV.1955	-15,0 20.V.1952	-11,0 1.VI.1977	-5,2 21.VII.1983	-6,2 28.VIII.1981	-11,2 28.IX.1972	-17,9 26.X.1997	-26,4 30.XI.1957	-26,1 26.XII.1996	-30,9 3.III.1987	-11,0 1.VI.1977	-26,4 30.XI.1957	-29,8 16.I.1963	-20,6 18.IV.1955	-30,9 3.III.1987	-30,9 3.III.1987
	ATMOSFÉRICKÉ ZRÁŽKY																		
najvyšší M/S/R úhrn [mm]	429,2 2007	383,6 2020	454,6 2009	425,7 2017	342,6 2010	322,2 1948	388,7 2001	293,4 2006	288,7 1996	277,5 2017	339,4 2006	404,1 2008	840 1945	860,8 1949	680,3 2017	819,3 2008/2009	1357,0 2010	1529,6 2008/2009	2399,7 2007
najnižší M/S/R úhrn [mm]	28,4 1943	7,6 1976	20,6 1974	24,0 2009	43,8 1950	55,1 1976	58,5 1979	40,1 1973	15 1946	1,8 1951	0,4 2011	16,0 1972	146,0 1969	230,0 1976	134,3 1986	98,2 1942/1943	440,6 1976	193,7 1942/1943	770,4 1942
najvyšší denný úhrn [mm]	67,6 18.I.2000	64,7 3.II.2007	119,1 9.III.1953	67,0 11.IV.1994	79,5 15.V.2014	141,2 29.VI.1958	116,6 22.VII.1949	71,4 5.VIII.1955	85,6 1.IX.2010	91,8 17.X.1992	68,7 21.XI.2019	71,2 1.XII.2016	119,1 9.III.1953	141,2 29.VI.1958	91,8 17.X.1992	71,2 1.XII.2016	141,2 29.VI.1958	119,1 9.III.1953	141,2 29.VI.1958
maximálna výška novej sneh. pokrývky za deň [cm]	88 18.I.2000	80 3.II.2007	68 9.III.2000	75 5.IV.2003	48 15.V.2014	36 4.VI.1962	48 4.VII.1984	49 29.VIII.1947	51 1.IX.2010	65 18.X.1950	60 15.XI.1943	56 14.XII.1958	75 5.IV.2003	49 29.VIII.1947	65 18.X.1950	88 18.I.2000	75 5.IV.2003	88 18.I.2000	88 18.I.2000
najvyššia M/S/R suma novej sneh. pokrývky [cm] (od 1.I.1951)	301 2007	259 2004	336 2000	274 1995. 2003	182 1952	106 2006	78 1984	53 2005	144 1996	205 1974	287 2001	250 1955	582 1995	147 2006	411 1952	634 1951/ 1952	416 1996	1163 1999/ 2000	1390 1952
najnižšia M/S/R suma novej sneh. pokrývky ∗[cm] (od 1.I.1951)	24 1964	6 1976	23 1974	14 2009	7 2002	0 7 prípadov	x 1967 2006	x 2013, 2015 2018, 2020	0 1967 2006	1 1951	0p 2011	14 1972	91 1969	0 2015	64 1967	155 1977/1978	79 2009	338 1977/1978	441 2011
maximálna výška celkovej sneh. pokrývky [cm]	331 22.I.1948	400 11.II.2007 14.II.2007	408 25.III.2009 30.III.2009	403 1.IV.2009	319 29.V.2004	299 1.VI.2004	61 8.VII.1984	74 31.VIII.1947	80 7.IX.2010	136 30.X.1974	213 15.XI.2006	247 31.XII.2017	408 25.III.2009 30.III.2009	299 1.VI.2004	213 15.XI.2006	400 11.II.2007 14.II.2007	403 1.IV.2009	408 25.III.2009 30.III.2009	408 25.III.2009 30.III.2009
	SLNEČNÝ SVIT																		
najvyššia M/S/R suma slnečného svitu [h]	190,2 1989	210,8 1976	250,2 1953	307,0 2009	245,9 2011	227,0 1994	273,1 1995	243,5 2003	261,9 1982	252,3 1957	243,6 2011	186,4 1972	646,2 2007	618,9 1952	647,8 2011	487,3 1996/1997	1241,8 2007	995,2 2010/2011	2097,7 1953
najnižšia M/S/R suma slnečného svitu [h]	57,7 1983	49,4 1952	94,6 2009	102,0 1972	67,9 1978	68,6 1969	89,0 1980	96,5 2006	76,4 1996	64,5 1974	52,5 1981	57,4 1997	351,6 1978	332,9 1980	326,3 2002	244,3 1982/1983	630,9 1972	660,9 1966/1967	1512,3 1972

***M** – mesačný/á; **S** – sezónny/a; **R** – ročný/á*

*∗: **0** – vyskytlo sa sneženie, prípadne aj s prechodnou snehovou pokrývkou, avšak v termíne merania nebola prítomná súvislá snehová pokrývka; **0p** – snehový poprašok; **x** – bez sneženia.*

Tiež zaujímavou je informácia o najväčšej kumulovanej sume novej snehovej pokrývky, od roku 1951, za mesiac (336 cm v marci v roku 2000), za sezónu (634 cm v zime 1951/1952) a rok (1390 cm v roku 1952). Naopak, najmenej snehu za obdobie klimatologickej zimy spadlo v zime 1977/1978, a to len 155 cm. Najvyššiu celkovú snehovú pokrývku na Lomnickom štíte (od 1. októbra 1940) namerali v dvoch termínoch v marci 2009 (25. a 30. marca 2009). Ďalšie zaujímavé historické rekordy pre teplotu vzduchu, atmosférické zrážky, snehovú pokrývky a slnečný svit sú uvedené v Tab. 1. Extrémy ďalších vybraných charakteristík (k 25. októbru 2020):

- Najvyššia denná amplitúda teploty vzduchu: 23,4 °C, 28.XII.1941 (minimum –21,2 °C, maximum +2,2 °C).
- Najnižšia denná amplitúda teploty vzduchu: 0,7 °C, 16.VIII.1987 (minimum –2,3 °C, maximum –1,6 °C).
- Najväčší interdiurný pokles priemernej dennej teploty vzduchu (od 1. I. 1951): –15,6 °C, 17. XII. 1975 → 18.XII.1975 (–3,8 °C → –19,4 °C) a 6.I.1982 → 7.I.1982 (–10,9 °C → –26,5 °C).
- Najväčší interdiurný nárast priemernej dennej teploty vzduchu (od 1.I.1951): +15,3 °C, 21.XII.1995 → 22.XII.1995 (–20,3 °C → –5,0 °C).
- Najsilnejší náraz vetra (od 1.I.1951): 221,8 km/h (61,6 m/s; zo smeru 270°), 24.II.2017.

Literatúra

Klimatologicko-meteorologický informačný systém (KMIS) – režimová databáza údajov SHMÚ.

Kolektív autorov, 1974, Klíma Tatier. Bratislava: Veda. 856 s.

Kolektív autorov, 2015, Klimatický atlas Slovenska. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav. 132 s.

Krška, K.–Šamaj, F., 2001, Dějiny meteorologie v českých zemích a na Slovensku. Praha: Karolinum. 568 s.

Mačura, R., 2017, Meteorologická stanica SHMÚ Lomnický štít: Stručný prehľad histórie, súčasnosti a budúcnosti vysokohorskej stanice. Seminár Lysá hora – 120 let meteorologických měření a pozorování. Český hydrometeorologický ústav a Česká meteorologická společnost. Lysá hora (Česko): 14.– 15.júna 2017. <online>

Mikulová, K.–Šťastný, P.–Pecho, J.–Borsányi, P.–Čepčeková, E.–Hlavatá, H.–Jančovičová, Ľ.–Kajaba, P.–Labudová, L.–Pribullová, A.–Tomková, M.–Faško, P.–Krčová, I.–Ivaňáková, G.–Chmelík, M., 2019, Klimatologické normály za obdobie 1981 – 2010 na Slovensku. ISBN 978-80-99929-02-0, 2019.

Mikulová, K.–Šťastný, P.–Bochníček, O.–Borsányi, P.–Čepčeková, E.–Ondruška, P., 2015, Klimatologické normály teploty vzduchu na Slovensku za obdobie 1961 – 1990. NKP, 13-I/15, SHMÚ, Bratislava, 2015. 135 s. ISBN 978-80-88907-92-3.

Mikulová, K.–Šťastný, P.–Faško, P., 2015, Klimatologické normály atmosférických zrážok na Slovensku za obdobie 1961 – 1990. NKP, 13-II/15, MŽP SR, SHMÚ, Bratislava, 2015. 640 s. ISBN 978-80-88907-93-0.

Pajdušáková-Mrkosová, Ľ., 1962, Observatórium na Lomnickom štíte. Říše hvězd 43(12): 225 – 228. <online>

Petrovič, Š., 1962, Twenty years of existence of the observatory on the Lomnický štít. HMÚ Praha, 1962.

Pribiš, J., 1981, 40 rokov meteorologických pozorovaní na Lomnickom štíte. Meteorologické zprávy 34(1): 31. <online>

Ročenky poveternostných pozorovaní observatória SHMÚ na Lomnickom štíte.

Ročenky poveternostných (meteorologických) pozorovaní staníc SHMÚ.

Rybák, J.–Mačura, R.–Gömöry, P.–Kučera, A.–Bochníček, O.–Horecká, V., 2010, Observatórium Lomnický Štít: meteorológia a slnečná astrofyzika. 20. celoštátny slnečný seminár. Slovenská ústredná hvezdáreň v Hurbanove. Papradno: 31. mája – 4. júna 2010. <online><online2>

Scheirich, L., 1977, Lomnický Štít - vysunutá bašta vedy. Lidé a Země 26(5): 193 – 198.

Šamaj, F., 1966, Seminář o problémoch horskej meteorologie. Meteorologické zprávy 19(6): 180. <online>

Odkazy na vybrané ďalšie materiály k téme

https://index.sme.sk/c/20372935/
https://spis.korzar.sme.sk/c/6025033/
https://hnonline.sk/carovne-slovensko/2079911-/
https://www.ciernediery.sk/observatorium-lomnicky-stit/

Jozef Pecho, Dalibor Výberči, Pavol Faško, Branislav Chvíla, SHMÚ, Bratislava

MERANIE ATMOSFÉRICKÝCH ZRÁŽOK V TOTALIZÁTOROCH A ICH ÚDRŽBA

Sieť zrážkomerných staníc je na ťažšie prístupných miestach doplnená sieťou zrážkomerov, tzv. totalizátorov. Totalizátor je zariadenie na meranie množstva atmosférických zrážok, zberná nádoba je umiestnená na trojnožke vo výške 2,5 – 3 m nad povrchom terénu. Tieto zrážkomery sú schopné zachytiť a udržať väčšie množstvo zrážok v priebehu dlhšieho časového obdobia. Meranie atmosférických zrážok a údržba totalizátorov sa vykonáva dva krát ročne. Na jar, zvyčajne koncom mája za tzv. zimný polrok a na jeseň, zvyčajne koncom septembra za tzv. letný polrok. Úkony vykonávajú zamestnanci odboru klimatologické a zrážkomerné siete.

Zodpovednosť za dané úkony je rozdelená medzi pracoviská v Bratislave, Banskej Bystrici a Košiciach. V mesiaci september vykonali zamestnanci spomenutých pracovísk každoročné jesenné meranie a údržbu na všetkých 45-tich totalizátoroch. Tie sú rozmiestnené v rôznych nadmorských výškach v geomorfologických celkoch Malá a Veľká Fatra, Vtáčnik, Kremnické a Chočské vrchy, Oravská Magura, Oravské Beskydy, Tatry, Nízke Tatry, Spišská Magura, Poľana, Veporské a Volovské vrchy, Spišsko-gemerský kras, Branisko, Levočské a Vihorlatské vrchy.

Pri meraní objemu zachytených atmosférických zrážok sa odmeria vzdialenosť od hladiny v zrážkomere po horný okraj zrážkomeru. Meranie sa opakuje viackrát a následne sa vypočíta priemerná hodnota. Týmto spôsobom sa zistí rozdiel medzi jednotlivými polrokmi. Po takto zistenom rozdiele jednoduchým prepočtom zistíme úhrn zrážok na 1 m^2 za letný, resp. zimný polrok.

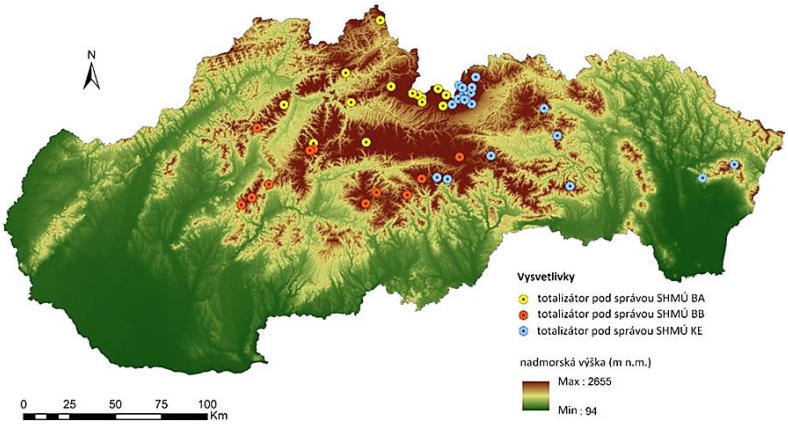
Po odmeraní objemu zrážok sa pristúpi k vyčerpaniu časti vody z nádoby totalizátora. Na zabránenie zamrznutia zrážok počas zimného polroka bola do nádoby pridaná chemická zlúčenina monopropylénglykol. V minulosti sa používal chlorid vápenatý, ten sme však tento rok zamenili

za zlúčeninu s ktorou je jednoduchšia manipulácia. Nakoniec sa v prípade potreby obnoví označenie meracieho prístroja nálepkou štátnej monitorovacej siete, prípadne doplní olej zabraňujúci výparu zrážok.

V jarnom termíne sa pravidelne obnovuje náter meracieho zariadenia. Pre pracoviská v Bratislave a Banskej Bystrici trvá táto pracovná cesta jeden týždeň. Regionálne pracovisko SHMÚ Košice má na dané úkony viac času, keďže má v správe najviac, až 20 totalizátorov, z ktorých sa väčšina nachádza vo vysokých nadmorských výškach. Pri ich obsluhe dlhodobo spolupracuje s Technickou univerzitou vo Zvolene.

Merania aj údržba boli úspešné, sprevádzané príjemným počasím. Objavila sa len jedna nepríjemnosť a to poškodenie totalizátora vandalmi na mieste Starý salaš, momentálne sa pracuje na jeho výmene

Obrázok 1. Lokalizácia totalizátorov.



Obrázok 2. Práca na totalizátore v Račkovej doline.

Obrázok 3. Poškodený totalizátor v lokalite Starý salaš.

Postupná automatizácia staničnej siete sa časom prejaví aj nahradením totalizátorov za automatické zrážkomery s väčším objemom. Takáto automatizácia prinesie viaceré pozitíva, ako napríklad väčšiu presnosť meraní a okamžité hodnoty množstva zrážok pri zrážkovej udalosti. Momentálne je v prevádzke prvý takýto zrážkomer, a to v lokalite Martinské hole.

Lucia Hlaváčová
SHMÚ, Bratislava

NOVÝ ATLAS BRATISLAVY HODNOTÍ ZRANITEĽNOSŤ MESTA NA DÔSLEDKY ZMENY KLÍMY

Útvar hlavnej architektky hlavného mesta SR Bratislavy, v spolupráci s Prírodovedeckou fakultou Univerzity Komenského v Bratislave, a ďalšími partnerskými mestami Paríž, Bilbao a Manchester, ako aj s prestížnym Fraunhofer Institut z Nemecka, publikoval začiatkom novembra tohto roku rozsiahlu analytickú monografiu – Atlas hodnotenia zraniteľnosti a rizík nepriaznivých dôsledkov zmeny klímy na území hlavného mesta SR Bratislavy. Nový klimatický Atlas Bratislavy, ktorý je výsledkom rozsiahlej spolupráce v rámci európskeho projektu Klimaticky prispôsobivé mestá a infraštruktúry (Climate Resilient Cities and Infrastructures – RESIN), prináša detailné hodnotenie citlivosti a zraniteľnosti (aj rizík) jednotlivých mestských častí Bratislavy na vybrané prejavy zmeny klímy na Slovensku, vrátane nepriaznivých vplyvov extrémnych vĺn horúčav a intenzívnych prívalových zrážok na obyvateľstvo, cestnú infraštruktúru a budovy. Na príprave Atlasu sa autorsky spolupodieľal aj Slovenský hydrometeorologický ústav (Odbor Klimatologická služba). Publikácia je verejnosti dostupná v digitálnej verzii na stránke Magistrátu hlavného mesta Bratislavy.

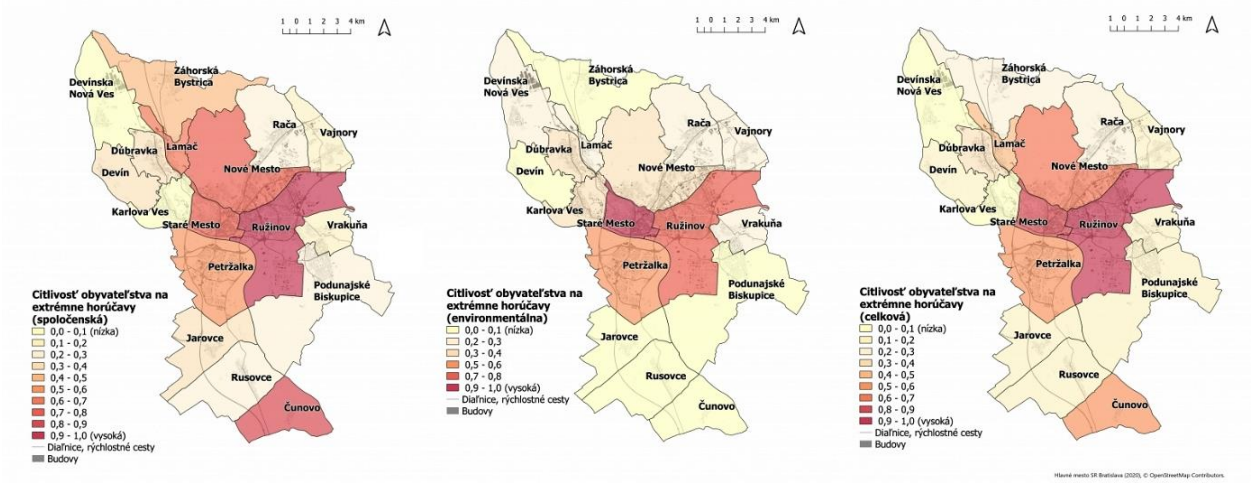
Nevyhnutné je zdôrazniť, že Atlas predstavuje prvé kvantitatívne hodnotenie zraniteľnosti Bratislavy na vybrané prejavy zmeny klímy a ich dopady na obyvateľstvo a kritickú infraštruktúru. Atlas sa prostredníctvom vhodne zvolených indikátorov (14 indikátorov pre vlny horúčav a 21 indikátorov pre intenzívne zrážky) zameriava na hodnotenie dopadov: (1) vĺn horúčav a extrémnych horúčav na obyvateľstvo (kapitola 4), (2) intenzívnych zrážok na obyvateľstvo (kapitola 5), na (3) cestnú infraštruktúru (kapitola 6) a (4) na budovy (kapitola 7) v rámci zastavaného územia hlavného mesta. Metodika analytickej časti Atlasu, vrátane kvalitatívneho a kvantitatívneho hodnotenia dôsledkov zmeny klímy, je bližšie popísaná v kapitolách 2 až 4.

Svetová meteorologická organizácia (WMO) vo svojich správach pravidelne upozorňuje na skutočnosť, že prejavy a dôsledky extrémneho počasia sa pozoruhodne rýchlo zhoršujú prakticky všade na Zemi. Tento trend je

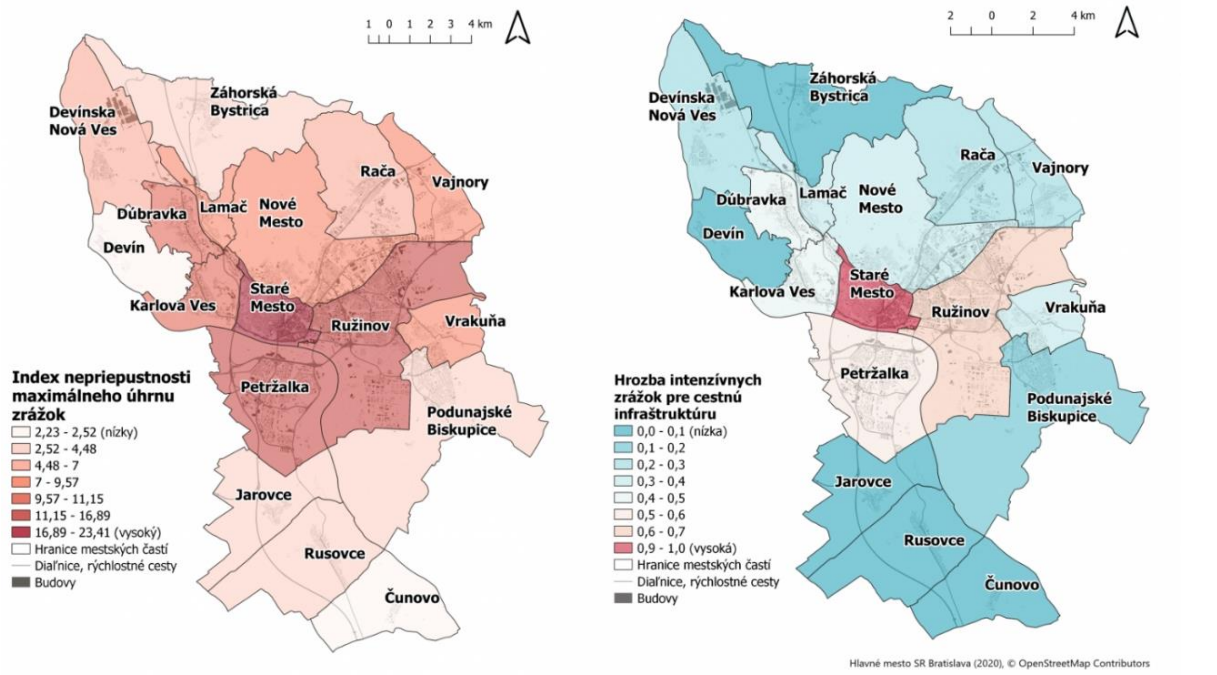
evidentný aj na Slovensku, vrátane hlavného mesta Bratislavy. Zatiaľ čo globálny priemer teploty prízemnej atmosféry sa od začiatku 20. storočia zvýšil o takmer 1 °C (AR5 IPCC, 2013), oblasť strednej Európy, vrátane Slovenska, vykazuje za to isté obdobie približne dvojnásobne rýchlejšie otepľovanie (~1,7 až 2,0 °C, najvýraznejšie v letných mesiacoch; Obr. 1). Až do 70. rokov minulého storočia sme mali na Slovensku klímu, ktorá sa v základných črtách veľmi neodlišovala od tej, ktorú sme tu mali povedzme v 18. alebo 19. storočí. Do konca 80. rokov 20. storočia sa prirodzene striedali studené, normálne a teplé roky. Výrazné zmeny v režime klímy pozorujeme na Slovensku najmä od druhej polovice 80. rokov, resp. začiatku 90. rokov 20. storočia. A v priebehu nasledujúcich desaťročí sa bude otepľovať ešte rýchlejšie. Do roku 2040 o ďalší jeden stupeň Celzia a do konca storočia o ďalšie 2 až 3 stupne, v lepšom prípade. Treba sa pripraviť na to, že v priebehu leta budú obyvatelia miest vystavení extrémnejšiemu suchu a dlhším periódam s teplotami nad 35 °C.

Závery vedeckých štúdií poukazujú na to, že niektoré typy extrémneho počasia, napríklad vlny horúčav, povodne, extrémne prívalové zrážky či sucho, sa vyskytujú nielen častejšie, ale sú aj výraznejšie vo svojich dôsledkoch na ekonomiku, zdravie či úmrtnosť ľudskej populácie, alebo stabilitu prírodných spoločenstiev. Dalo by sa dokonca povedať, že nebyť globálneho otepľovania, k mnohým týmto extrémom by nikdy nedošlo, prípadne by sa neprejavili v tak výraznej forme. Extrémne prejavy počasia,

Obrázok 1. Príklad priestorového spracovania indikátora spoločenskej (vľavo), environmentálnej (v strede) a celkovej (vpravo) citlivosti obyvateľstva na extrémne horúčavy na území Bratislavy (Atlas, str. 34 – 35).



Obrázok 2. Príklad priestorového spracovania indikátora indexu nepriepustnosti maximálneho úhrnu zrážok (vľavo) a hrozby intenzívnych zrážok pre cestnú infraštruktúru na území Bratislavy (Atlas, str. 72).



zosilnené pôsobením klimatickej zmeny, bránia udržateľnému rozvoju miest, keďže často zhatia celé roky pokroku. Nestabilnejšia a teplejšia klíma bude pravdepodobne spôsobovať nielen vážnejšie škody na infraštruktúre v meste, ale zásadne môže ovplyvniť či dokonca ohroziť dostupnosť energie a vody, najmä počas dlhých období sucha a vysokých teplôt.

Účelom publikácie je pomôcť odborným predstaviteľom miestnych samospráv a verejnej a štátnej správy, zástupcom z radov rezortných organizácií, akademických i vedecko-výskumných inštitúcií, ale aj súkromnému sektoru, pôsobiacemu na území mesta pri navrhovaní stratégií, opatrení, formulácií stanovísk, usmernení, ako aj odborníkom z radov environmentálnych a technických profesií pri projektovaní investičnej činnosti navrhovanej na území hlavného mesta SR Bratislavy.

Plná citácia: *Streberová E., Lückerath D., Šteflovičová M., Šteflovičová M., Pecho J., Bogen M., Kozová M., Pauditšová E., Konrad I., Kasala V. (2020): Atlas of risk-based vulnerability assessment of the impacts of climate change in Bratislava (in Slovak: Atlas hodnotenia zraniteľnosti a rizík nepriaznivých dôsledkov zmeny klímy na území hlavného mesta SR Bratislavy), Bratislava: Hlavné mesto SR Bratislava, 2020, ISBN 978-80-570-2203-9.*

Jozef Pecho, SHMÚ, Bratislava
Eva Streberová, Útvar hlavnej architektky
hl. mesta SR Bratislavy, Bratislava

KONFERENCIA MLADÝCH ODBORNÍKOV NA PÔDE SHMÚ V NOVEMBRI 2020

V tomto roku sa 12.11. uskutočnila Konferencia mladých vedeckých odborníkov z oblasti hydrológie, meteorológie, klimatológie a kvality ovzdušia a z oblasti vodného hospodárstva. Jej organizovanie sa už na pôde SHMÚ stalo tradíciou. Tento rok sme zaznamenali 32. ročník tejto konferencie spojenej so súťažou v jednotlivých sekciách. Súťaže majú medzinárodný charakter a zúčastňujú sa ich aj mladí odborníci z Českej republiky.

Hlavným organizátorom súťaže mladých odborníkov (KMO) je už tradične Slovenský hydrometeorologický ústav. Organizáciu KMO podporili: International Hydrological Programme of UNESCO - Slovenský výbor pre hydrológiu, Slovenská meteorologická spoločnosť, Združenie zamestnávateľov vo vodnom hospodárstve na Slovensku, Interreg Danube Transnational Programme – DAREFFORT Project PP5, Global Water Partnership Central and Eastern Europe, Zväz slovenských vedeckotechnických spoločností a Slovenská vodohospodárska spoločnosť.

Tohtoročná Konferencia mladých odborníkov sa konala v tieni celosvetovej koronavírusovej pandémie COVID-19. Aby sa KMO vôbec uskutočnila, musel sa nájsť spôsob, akým sa bude môcť súťaž konať aj v tomto, pre mnohých, takom ťažkom období.

Organizátori KMO sa nakoniec rozhodli, že sa súťaž bude konať on-line, formou videokonferencie. Sekcie KMO sa spájali so súťažiacimi a porotcami rôznymi formami online prepojenia. Vodohospodári využili spôsob komunikácie pomocou služby Webex, hydrológovia využili dobre známy Skype a meteorológovia a klimatológovia spolu komunikovali pomocou služby Google Meet. Napriek počiatočným obavám a novej skúsenosti, prebehla Konferencia bez problémov, k spokojnosti všetkých účastníkov.

Konferencie sa, vzhľadom na spôsob komunikácie, zúčastnilo 44 účastníkov, t. j. súťažiaci, porotcovia a organizátori, čo bola asi tretina priemernej účasti na týchto súťažiach. Z toho bolo 20 súťažiacich, 21 porotcov a 3 organizátori. Z Českej republiky sa KMO zúčastnili 3 súťažiaci a 1 porotca.

32. konferencia mladých hydrológov sa konala pod gesciou RNDr. Pavla Miklánka, CSc., ako zástupcom International Hydrological Programme of UNESCO – Slovenský výbor pre hydrológiu, ktorý sa chopil súčasne aj úlohy predsedu poroty. Do súťaže sa zapojilo 7 súťažiacich so 6 súťažiacimi príspevkami, z toho 2 príspevky boli z Českej republiky a 2 príspevky zo SHMÚ. Porota po posúdení písomnej časti a prezentácie vybrala tri najlepšie práce bez udania poradia, teda v abecednom poradí:

- ***Mézsáros Jakub, Halaj Martin****: Priemerné ročné úhrny atmosférických zrážok v povodiach na Slovensku pri cyklonálnych situáciách s rôznym smerom prúdenia, Ústav hydrológie SAV BA; SHMÚ BB,*
- ***Siman Cyril****: Use of the MONERIS model for identification of sources of surface streams pollution by total nitrogen, Ústav hydrológie SAV BA, SHMÚ BA,*
- ***Suchá Kateřina****: Retenční schopnosti půd a krajiny a možnosti jejího zvyšování v podmínkách klimatické změny, ÚVHK Fakulta stavební VUT Brno.*

19. Konferencia mladých vodohospodárov sa uskutočnila pod gestorstvom Ing. Ľubice Kopčovej, predsedníčky Združenia zamestnávateľov vo vodnom hospodárstve. Predsedníčkou poroty bola Ing. Alena Bujnová (SVP, OZ BS, š. p.). Do súťaže sa zapojilo 8 súťažiacich s 8 súťažnými príspevkami. Všetci boli zo Slovenskej republiky, zo Slovenskej technickej univerzity Bratislava a Zvolen. Tri najlepšie práce bez udania poradia, v abecednom poradí:

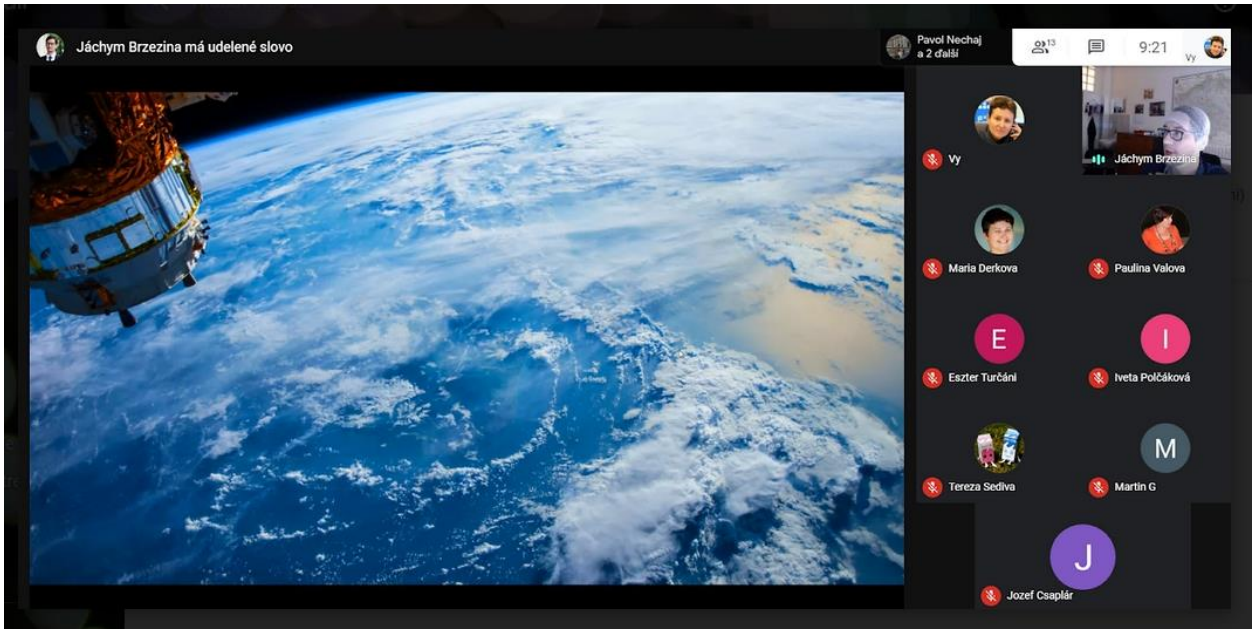
- ***Lobotková Martina****: Prítomnosť tenzidov v odpadových vodách a možnosť ich biodegradácie, Katedra enviromentálneho inžinierstva, Fakulta ekológie a enviromentalistiky, TU Zvolen*
- ***Németová Zuzana****: Hodnotenie vplyvu zmien využitia územia na intenzitu eróznych procesov pomocou fyzikálne založeného modelu, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Svf STU BA*
- ***Pavúček Martin****: Výskum tlmiaceho účinku opevnenia pod haťou VD Hričov pomocou fyzikálneho modelovania, Katedra vodného hospodárstva krajiny, Svf STU BA.*

21. konferencia mladých meteorológov, klimatológov a kvality ovzdušia mala gestorku RNDr. Paulínu Valovú (SHMÚ BA), predsedníčku Slovenskej meteorologickej spoločnosti. Predsedníčkou poroty bola Mgr. Mária Derková, PhD. (SHMÚ BA). Do súťaže sa zapojilo 5 súťažiacich s 5 súťažnými príspevkami. Jeden súťažiaci bol z ČR, ostatní boli zo slovenských pracovísk, z toho 1 príspevok zo SHMÚ BA. Tri najlepšie práce bez udania poradia, v abecednom poradí:

- ***Brzezina Jáchym**: Vliv epidemie koronaviru na kvalitu ovzduší, ČHMÚ Brno,*
- ***Nechaj Pavol**: Detekcia gust frontov pomocou lidaru, Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie na FMFI, UK BA; MicroStep-MIS,*
- ***Šedivá Tereza**: Sezonalita kvality ovzdušia, SHMÚ BA.*

Súťažné práce sa ponúknu odborným časopisom na publikovanie. Všetky súťažné príspevky, Štatúty, Záznam o KMO + víťazi, História KMO a ďalšie informácie o Konferencii mladých odborníkov 2020 sú uverejnené na stránke: *http://www.shmu.sk/sk/?page=2444.*

Alena Blahová, SHMÚ, Bratislava



KONFERENCIA OCHRANA OVZDUŠIA 2020

Pôvodne plánovaná Konferencia Ochrana ovzdušia 2020, ktorá sa mala konať v dňoch 25. – 27. novembra 2020 na Štrbskom Plese sa kvôli zlej pandemickej situácii uskutočnila v obmedzenom režime. Dňa 26. novembra sa uskutočnila redukovaná konferencia online formou. Vybrané prezentácie obsahovali všetky schválené tematické okruhy, ako sa pôvodne rozhodol prípravný výbor, avšak sa zredukovali na maximálne 3 prezentácie v každom okruhu.

Mediálnym partnerom konferencie bol opätovne aj náš Meteorologický časopis. Slovenský hydrometeorologický ústav reprezentovali viaceré prezentácie z oblasti kvality ovzdušia, emisií a klimatickej služby.

V prvej téme „Nové stratégie v ochrane ovzdušia, zmena klímy a zelený reštart ekonomiky“ sa predstavili so svojou prezentáciou „Vývoj globálnej klímy a atypický priebeh počasia na severnej pologuli v roku 2020 v kontexte s COVID-19“ J. Pecho a L. Markovič. Autori neprezentovali abstrakt v zborníku, Prezentácia mala globálny charakter a nadväzovala na prezentáciu generálnej riaditeľky Sekcie zmeny klímy a ochrany ovzdušia Ing. Gabriely Fischerovej, ktorá informovala o medzinárodnom (OSN), Európskom a národnom dianí v tejto téme v roku 2020.

V druhej téme „Riadenie kvality ovzdušia, aj v súvislosti s pandémiou“, sa predstavil so svojou prezentáciou „Využitie družicových Sentinel 5P dát pri posudzovaní kvality ovzdušia v SR v roku 2019 a počas pandémie COVID – 19“ D. Štefánik z Odboru monitorovanie kvality ovzdušia. Článok je uvedený v zborníku z konferencie.

V tretej téme „Meranie a monitorovanie emisií a kvality ovzdušia“ sa predstavili zástupcovia Odboru emisie a biopalivá (J. Szemesová, M. Zemko a Z. Jonáček) v spolupráci s M. Petrašom z Odboru numerické predpovedné modely a metódy a odprezentovali príspevok s názvom „Porovnanie údajov o domácnostiach a zo štatistických prieskumov 2017 a 2019“. Článok je uvedený v zborníku z konferencie.

Záverečná téma „Spaľovacie a výrobné technológie“ obsahovala ďalšie zaujímavé prezentácie. Väčšina z nich je uverejnená v zborníku, ktorý je neoddeliteľnou súčasťou konferencie a obsahuje viac informácií o daných témach, ktoré sú spracované formou abstraktov. V zborníku sú uverejnené aj príspevky, ktoré sa do programu skrátenej konferencie nevošli.

Napriek miernym technickým problém bola skrátená forma konferencie relatívne úspešná a bude prezentovaná aj na sociálnych sieťach. Formát konferencie obmedzoval diskusiu napriek snahe organizátora sa diskusia k zaujímavým prednáškam nekonala.

Janka Szemesová
SHMÚ, Bratislava

PERSONÁLIE
PERSONALS

Ing. ĽUDOVÍT POBEHA 90 ROČNÝ

V dobrom zdraví, s typickým úsmevom na tvári a v kruhu svojich najbližších, sa Ing. Ľudovít Pobeha dožil významného životného jubilea - 90 rokov.

Narodil sa 5. 2. 1930 v Ondrašovej. Pochádza zo 6 detí, bol najmladší, pri narodení siedmeho dieťaťa zomrela matka. Otec sa druhýkrát po roku oženil. Keď vypuklo povstanie, rodina bola nútene evakuovaná z Liptovského Mikuláša do Žiliny, kde napokon natrvalo zostali.

V 7. a 8. ročníku gymnázia bol pozorovateľom meteorologickej stanice. Po maturite nastúpil v Bratislave ako 20 ročný do ÚĽUV – u ako plánovač a štatistik. Zaoberal sa štatistikou do takej miery, že sa stal školiteľom štatistikov ÚĽUV –u na Slovensku. Po roku zamestnania, v roku 1951, sa prihlásil na SVŠT, fakultu staviteľského inžinierstva – špecializácia hydromeliorácie. Po ukončení školy v roku 1956 dostal miestenku do Ružomberka, chcel však zostať v Bratislave, čo sa mu aj podarilo.

Od mája 1956 bol prijatý na HMÚ - zadelený na PzV. Šéfom bol vtedy Ing. Otokar Malý. Vypracovával smernice pre založenie siete PzV, koordinoval s IGHP Žilina budovanie pozorovacích objektov. Spracovával posudky na Žitnom ostrove.

V roku 1958 (17. decembra) bol za podvratnú činnosť proti republike odsúdený na 3,5 roka. Doteraz nevie, ako podvrátil republiku. Dostal posudok, na základe ktorého mohol byť aj ministrom (povedal vyšetrovateľ). Aj počas dni strávených vo väzení nestrácal kontakt s hydrológiou. Vypracovával pre vtedajší Technický ústav Ministerstva vnútra závlahové a odvodňovacie projekty. 9. mája 1960 bol prepustený na amnestiu.

Vrátil sa do Žiliny, nedovolili mu robiť odbornú činnosť – stal sa robotníkom v OSP Žilina. Neskoršie sa dostal do projekcie PPÚ (Agroprojekt), kde naplno využíval hydrologické znalosti pri projektovaní. Tu realizoval aj iné odborné práce – návrh ČSN pre hnojovicové hospodárstvo a spolu s VÚVH (Ing. Náther) pripravil štúdiu úpravy Polhoranky.

Po náhlej smrti Ing. Grúňa, vtedajšieho vedúceho Hydrologického strediska v Žiline, bol vypísaný konkurz, ktorý vyhral. Vedúcim bol od roku 1976 do roku 1990. Významnou mierou sa podieľal na rozvoji strediska. Okrem hydroprognózy, postupne pribudol aj monitoring podzemných a povrchových vôd v povodí Váhu.

Venoval sa taktiež výpočtom zásob vody v snehu pre nádrže Vážskej vodohospodárskej sústavy, v spolupráci s Dr. Šimom zo SAV a Ing. Murínom a RNDr. Kunschom zo SHMÚ.

Do zaslúženého dôchodku odišiel v roku 1991. Na čiastočný pracovný úväzok pracoval na regionálnom pracovisku s prestávkami do roku 1999.

Jubilantovi k dosiahnutiu významného životného jubilea prajeme naďalej pevné zdravie a životný optimizmus. Občasné návštevy nášho pracoviska, posedenia pri vianočnej kapustnici a rozhovory, či už na odborné témy alebo zo života, zostávajú pre nás stále obohatením. Budete medzi nami vždy srdečne vítaný!

Ivan Machara
SHMÚ, Žilina

JUBILANTI GUSTÁV OTRUBA A EUGEN LEXMANN

Životné jubileá oslávili dvaja naši bývalí kolegovia Gustáv Otruba a Eugen Lexmann.

Gustáv Otruba pochádza z Oravy, kde sa 1. augusta 1935 narodil v osade Končitá, obce Zázrivá vo viacdetnej rodine. Po skončení gymnázia v Dolnom Kubíne nasledovalo vysokoškolské štúdium. Napriek tomu, že vyštudoval geografiu, dal sa podobne ako jeho bratia Ján a Albín, na dráhu meteorológa a od 1. 2. 1959 začal pracovať na vtedajšom Hydrometeorologickom ústave. Hlavnou náplňou jeho profesionálneho života bola predpoveď počasia, ktorej zostal verný dlhých 44 rokov. Počas tejto doby nazhromaždil mnoho poznatkov o pravidelných charakteristikách i zvláštnostiach vývoja počasia na území Slovenska, ktoré potom využíval v praxi a dokázal sa s nimi podeliť aj so svojimi spolupracovníkmi. Svoje povolanie vykonával kvalitne a so zanietením. Nezanedbateľnou stránkou jeho povolania boli pravidelné vystúpenia

v slovenskom rozhlase či iných médiách, odkiaľ ho podľa charakteristického hlasu poznali mnohí poslucháči ako skúseného a zodpovedného prognostika.

Eugen Lexmann sa narodil 28. októbra 1945 v Bratislave. Strednú školu absolvoval v Nitre a v štúdiu pokračoval na Prírodovedeckej fakulte Univerzity Komenského v špecializácii meteorológia a klimatológia. Po skončení školy nastúpil 1. 7. 1968 na Slovenský hydrometeorologický ústav na pozíciu leteckého meteorológa, kde pracoval v rôznych funkciách 25 rokov a tak bol účastný na rozvoji slovenskej leteckej meteorologickej služby. Popri tejto práci sa venoval ďalším odborným aktivitám. Viedol školenia meteorológie pre pilotov poľnohospodárskeho letectva a športových pilotov a bol skúšobným komisárom pre predmet leteckej meteorológie na Štátnej leteckej inšpekcii. V letných mesiacoch sa zúčastňoval na meteorologickom zabezpečovaní súťaží v bezmotorovom lietaní. Skúsenosti z tejto oblasti zúročil aj publikačne. Je autorom učebnice meteorológie pre športových pilotov a napísal kapitoly o meteorológii do viacerých publikácií o letectve, či horolezectve.

Po reorganizácii SHMÚ na začiatku 90. rokov prešiel v roku 1993 na vtedajší Odbor všeobecných predpovedí na Kolibe. Počas svojho pôsobenia na oboch pracoviskách spolupracoval s médiami, pripravoval a realizoval vstupy do rozhlasu a písal články do novín, vystupoval v televízii, v pravidelných reláciách aj príležitostných rozhovoroch o počasí a meteorológii.

Ako člen Meteorologickej spoločnosti sa podieľal na organizácii jej akcií a niekoľko rokov ako jej hospodár udržoval v rovnováhe finančné prostriedky spoločnosti.

Jubilant má široký okruh záujmov, ktorý sa prirodzene v priebehu rokov postupne modifikoval. Okrem meteorológie zohráva v jeho živote významnú úlohu šport, kultúra, či dianie okolo nás. Záujem o veci verejné prerástol až do aktívnej účasti na komunálnej politike.

Prajeme obom jubilantom do ďalších rokov dobré zdravie a životnú pohodu.

Vladimír Pastirčák s použitím materiálov RNDr. Dagmar Kriškovej

K SEDEMDESIATINÁM RNDr. ELENY NIEPLOVEJ, CSc.

Tak ako sa pri rýchlej jazde v automobile na tachometri ozlomkrky pretáčajú kilometre, tak isto rýchlo sa vo vyššom veku pretáčajú listy kalendára a rok beží za rokom čím ďalej rýchlejšie. A tak sme sa ani nenazdali, že prichádzajú ďalšie okrúhle jubileá našich súputníkov o čosi skôr ako sme v duchu čakali. Tak je to aj s jubileom našej kolegyne a priateľky Eleny Nieplovej. Je málo osobností v klimatológii, ktoré pri časovo ohraničenom aktívnom profesionálnom pôsobení boli tak mimoriadne aktívni ako naša jubilantka. Zvykne sa tomu hovoriť, že zanechali hlbokú brázdu v poli klimatológie. Elena Nieplová sa narodila dňa 7.11.1950 v Dlhej (okr. Trnava), ale svoje detstvo, študentské roky ako aj profesionálny život prežila v Bratislave. Po absolvovaní Prírodovedeckej fakulty Univerzity Komenského, odbor fyzika, špecializácia meteorológia - klimatológia nastúpila v roku 1974 na Slovenský hydrometeorologický ústav. Prvých 10 rokov pracovala na Výskumnom oddelení klimatológie, neskôr na Odbore technickej klimatológie, kde sa v roku 1990 stala vedúcou tohto odboru. V roku 1993 bola na určitý čas poverená vedením Úseku klimatológie, neskôr po štrukturálnych zmenách SHMÚ, zastávala funkciu vedúcej Odboru klimatológie. V roku 1999 ukončila pracovný pomer na SHMÚ a nasledovala svojho manžela do Kuvajtu, kde už niekoľko rokov pôsobil ako vysokoškolský pedagóg. Odborne sa však neodmlčala, výsledky jej širokých aktivít a veľkej pracovitosti si vyžadovali kontakt s ňou i v ďalšom období, kde pomohli jej cenné rady a skúsenosti.

Jubilantka sa intenzívne venovala vedeckej činnosti, v ktorej sa postupne zaoberala vzťahom reliéfu na režim meteorologických prvkov, neskôr štrukturálnou analýzou polí meteorologických prvkov. Táto problematika bola aj predmetom jej dizertačnej práce. Uvedené výskumné aktivity tvorivo rozvíjala pre klimatologickú prax a to najmä v oblasti objektivizácie kontroly klimatologických údajov a pri budovaní elektronických databáz. Ďalšie výskumné aktivity jubilantky boli venované najmä výskumu kolísania a variability klímy Slovenska, problematike homogenity a homogenizácie údajov ako aj analýze variability klimatologických prvkov. Tieto úlohy sa riešili v rámci Národného klimatického programu a Country study SR, resp. v rámci bilaterálnej spolupráce so Švajčiarskom či Poľskom. Výsledky svojej výskumnej práce Dr. Nieplová publikovala v mnohých článkoch v domácich a zahraničných odborných časopisoch a predniesla na konferenciách

Dr. Nieplová bola činná i v rámci Svetovej meteorologickej organizácie. Tu v deväťdesiatych rokoch minulého storočia zastupovala Slovensko v Komisii pre prístroje a metódy (CIMO WMO) a v komisii pre klimatológiu (CCl WMO). Bola aktívnou členkou Slovenskej meteorologickej spoločnosti pri SAV ako aj Slovenskej bioklimatologickej spoločnosti pri SAV.

Nemali by sme zabúdať ani na jej mimopracovnú činnosť. Okrem toho, že vychovala spolu s manželom dve profesionálne úspešné deti, venovala sa dosť intenzívne aj športu a turistike. Viackrát reprezentovala SHMÚ na športových súťažiach, kde získala aj zaujímavé umiestnenia. Určite by sme ju mohli pochváliť aj za pozoruhodnú rekonštrukciu tradičnej drevenice na Orave.

S jubilantkou sa pravidelne každý rok stretávame pri pohári dobrého vína a v živej debate putujeme časom za spoločnými známymi a priateľmi, za miestami, záujmami a činnosťami a vraciame sa opäť do prítomnosti, kde Elene Nieplovej praje dobré zdravie i veselá myseľ. Želáme jej do ďalších rokov veľa zdravia a pohody v kruhu najbližších.

Pavel Šťastný, Milan Lapin

JUBILANT RNDr. FRANTIŠEK MATEJKA, CSc.

Čas letí a RNDr. František Matejka, CSc. oslávil 75. narodeniny. Narodil sa 21. novembra 1945 v Prahe, detstvo a štúdium však strávil už na Slovensku. V roku 1968 ukončil štúdium na Prírodovedeckej fakulte Univerzity

Komenského v Bratislave v odbore matematika-fyzika so špecializáciou na meteorológiu. Diplomovú prácu mal na tému „Absolútne ciachovanie pyrgeometra“. Po štúdiu nastúpil na Slovenskú akadémiu vied, kde zotrval až do odchodu do dôchodku. Pôvodne nastúpil v roku 1968 na vtedy existulúci Ústav meteorológie a klimatológie SAV. Tu spolupracoval na Medzinárodnom biologickom programe. V roku 1975 prišlo k začleneniu spomenutého ústavu do Geofyzikálneho ústavu SAV a František prešiel na novo vzniknutý odbor Fyziky atmosféry. Geofyzikálnemu ústavu, na ktorom prešiel viacerými postami zostal verný až do skončenia zamestnaneckého pomeru v roku 2009, hoci odborné aktivity vyvíjal aj naďalej.

V začiatkoch svojej odbornej činnosti sa venoval hlavne metodike detekcie parametrov atmosféry a prístrojovému vybaveniu. Pri spracovaniach experimentálnych meraní aplikoval štatistické metódy spracovania prvotných údajov za účelom optimalizácie daného experimentu. Bol pri začiatkoch automatizácie meteorologických meraní v prízemnej vrstve atmosféry u nás, predovšetkým v porastoch. Táto činnosť vyústila do jeho prvej monografie „Analýza mikroklímy porastu“ v roku 1987, ktorú vydal so spoluautorom J. Huzulákom. Aj naďalej sa venoval otázkam prenosu energie a hmoty v prízemnej vrstve atmosféry, energetickej bilancie aktívneho povrchu a matematickým modelovaním mikroklímy rastlinných porastov.

Od založenia Národného klimatického programu aktívne spolupracoval na jeho riešení. Problematiku dynamiky mikroklímy porastu dlhodobo úspešne riešil v spolupráci s ďalšími odborníkmi zo Slovenska a aj z Českej republiky, hlavne zo Slovenského a z Českého hydrometeorologického ústavu, za čo mu bolo udelené Čestné uznanie a ďakovný list od riaditeľov týchto organizácií. V širšej medzinárodnej spolupráci bol zapojený do riešenia projektu CAROEUROFLUX a bol vedúcim subprojektu medzinárodného výskumného programu NOPEX (Northern hemisphere climate processes land-surface experiment).

Od začiatku svojej profesnej kariéry publikoval. S Meteorologickým časopisom je spojený už od samého začiatku, keď jeden z jeho článkov venovaný vzťahu porastov a teplotného zvrstvenia v prízemnej vrstve atmosféry vyšiel už v prvom čísle prvého ročníka a aj v ďalších ročníkoch sa podieľal na viacerých článkoch. Jeho publikačné aktivity ako autora, alebo spoluautora boli však oveľa širšie a zahŕňajú temer 70 odborných článkov vo vedeckých časopisoch, 2 odborné monografie a viac ako 100 ďalších odborných publikácií rôzneho charakteru.

Jubilant sa popri svojej profesii, zaoberal aj pedagogickou činnosťou. V rokoch 1993 – 2009 sa venoval ako externý učiteľ študentom odboru meteorológie a klimatológie na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského. Počas svojho pedagogického pôsobenia viedol aj niekoľko doktorandských prác.

Počas svojej aktívnej činnosti prispieval aj do organizačnej činnosti, a to vo funkcii vedúceho Oddelenia fyziky atmosféry a tiež ako zástupca riaditeľa Geofyzikálneho ústavu. F. Matejka bol členom Slovenskej meteorologickej spoločnosti a členom Slovenskej bioklimatickej spoločnosti, kde aktívne organizačne prispieva doteraz.

V ľudskom vyjadrení bol jubilant v práci pedantný a dôsledný, s pochopením pre problémy iných, vždy pozoruhodne skromný a hoci skôr v úzadí, vždy z neho vyžaroval optimizmus a elán. Životné jubileum zastihlo Dr. Matejku, nášho priateľa v plnom zdraví na dôchodku. Popri restoch z odbornej aktivity ešte mu zostáva čas, aby sa zúčastňoval obľúbených turistických výletov za prírodnými krásami Slovenska.

Ladislav Brimich, Pavol Nejedlík
Ústav vied o Zemi SAV, Bratislava

JUBILANTI JANA AMBRUZOVÁ A JÁN KLIMEK

Tento rok bol pretkaný na odbore Skúšobné laboratórium viacerými jubileami. Zaujímavosťou je, že sa to týka jedného ročníka narodenia a to roku 1960.

Na začiatku tohto roka oslávila okrúhle 60. narodeniny kolegyňa ***Jana Ambruzová***. Narodila sa 14. februára 1960 v Žiline. V roku 1979 ukončila štúdium na Strednom odbornom učilišti chemickom v Bratislave. Po skončení štúdia nastúpila ako prevádzkový chemik do Slovnaftu. V roku 1987 ju však srdce potiahlo na nové miesto a to na SHMÚ, kde pracuje dodnes. Nastúpila do výskumno-vývojového strediska čistoty ovzdušia (VVSČO), kde medzi inými vykonávala stanovenie rádioaktivity v ovzduší, klasické analýzy ovzdušia – stanovenie síranov a dusičnanov spektrofotometricky Thorinovou metódou. V roku 2001 bola pri vybudovaní dnešných priestorov laboratórií. Ako aj pri prvých krokoch akreditácie Skúšobného laboratória. V súčasnosti sa podieľa na výkone rôznych analýz (stanovenie aniónov a katiónov v ovzduší metódou iónovej chromatografie, stanovenie dusičnanov, síranov v ovzduší izotachoforézou). Pridala sa aj do radou Interných audítorov podľa normy ISO 17025 na ústave.

Ďalším jubilantom je ***RNDr. Ján Klimek***. Narodil sa 29. októbra 1960 v Liptovskej Revúcej. Stredoškolské vzdelanie získal na Strednom odbornom učilišti chemickom v Novákoch a v roku 1988 absolvoval Univerzitu Komenského v Bratislave v odbore analytická chémia. Nastúpil na Výskumný ústav chemickej technológie, kde sa ako vedecko-výskumný pracovník venoval stanoveniu ťažkých kovov v životnom prostredí metódami AAS, rozkladom vzoriek v mikrovlnnej peci. Podieľal sa na vývoji metód na analýzu ftálocyanínov v gumárenských chemikáliách metódou UV-VIS. V roku 2007 nastúpil na SHMÚ, kde rozšíril kruh zamestnancov v Skúšobnom laboratóriu. Pracoval na stanovení stopových obsahov ťažkých kovov v zrážkach metódami AAS (GTA,FAAS). Podieľa sa na stanovení obsahu ľahko prchavých zlúčenín metódou plynovej chromatografie s termodesorbérom a plameňovo-ionizačným detektorom. Podieľa sa na vývoji metódy pre stanovenie polyaromatických uhľovodíkov v ovzduší pomocou statickej extrakcie filtrov v mikrovlnnej peci a na optimalizácii a racionalizácii stanovení PAU metódou plynovej chromatografie spojenej s hmotnostným detektorom.

Terézia Udvarosová
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-mailovu 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

© Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava 2020
ISSN 1335-339X