

ISSN 1335-339X
eISSN 2730-1028

METEOROLOGICKÝ ČASOPIS

METEOROLOGICAL JOURNAL

2023

ROČNÍK 26 - ČÍSLO 2
VOLUME 26 - NUMBER 2



SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV

Meteorologický časopis publikuje pôvodné vedecké práce z teoretického a aplikovaného výskumu, prehľadové články a krátke informácie z vedných odborov meteorológie, klimatológie, hydrológie, chemizmu atmosféry, znečistenia ovzdušia a numerického modelovania. Meteorologický časopis akceptuje aj príspevky z príbuzných vedeckých disciplín, napr. kvalita vody, vodné hospodárstvo, ekohydrológia, technika merania a diaľkový prieskum Zeme. Meteorologický časopis ako periodikum vychádza dvakrát ročne. Všetky zaslané príspevky sú recenzované dvoma nezávislými a anonymnými recenzentmi. Časopis je dostupný na <http://www.shmu.sk/sk/?page=31>.

The Meteorological Journal publishes original research papers and comprehensive reviews in all the subfields of the applied and theoretical research on meteorology, climatology, hydrology, atmospheric chemistry, air pollution, and numerical modelling. Relevant topics incorporating the related disciplines such as water quality, water resources management, eco-hydrology, instrumentation, and remote sensing are within scope. The Meteorological Journal is published twice a year. All submitted manuscripts are reviewed by two independent and anonymous reviewers (single-blind peer review). Journal is available at <http://www.shmu.sk/en/?page=31>.

REDAKČNÁ RADA – EDITORIAL BOARD

Šéfredaktor – Editor-in-Chief

Milan Onderka, PhD., Earth Science Institute, Slovak Academy of Sciences, Slovakia
milan.underka@savba.sk

Zástupca šéfredaktora – Associate Editor

Jozef Pecho, Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
jozef.pecho@shmu.sk

Členovia redakčnej rady – Handling editors

Martin Benko, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Michal Danko, PhD., Institute of Hydrology, Slovak Academy of Sciences, Liptovský Mikuláš, Slovakia
Mária Derková, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Pavol Faško, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Marcel Garaj, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Prof. Martin Hanel, PhD., Faculty of Environmental Sciences, Czech University of Life Sciences, Prague, Czechia
Hana Hlaváčiková, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Prof. Kamila Hlavčová, PhD., Faculty of Civil Engineering STU, Bratislava, Slovakia
Prof. Silvia Kohnová, PhD., Faculty of Civil Engineering STU, Bratislava, Slovakia
Prof. Milan Lapin, PhD., Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Slovakia
Ondřej Ledvinka, PhD., Czech hydrometeorological institute, Prague, Czechia
Danica Lešková, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Martin Kremler, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Katarína Mikulová, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Prof. Juraj Parajka, PhD., TU Wien, Vienna, Austria
Assoc. Prof. Petr Pišoft, PhD., Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, Czechia
Norbert Polčák, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Anna Pribullová, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Gánovce, Slovakia
Zora Snopková, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Banská Bystrica, Slovakia
Janka Szemesová, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Miroslav Šinger, PhD., Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
Prof. Bernard Šiška, PhD., Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia
Prof. Jaroslav Škvarenina, PhD., Technical University in Zvolen, Slovakia
Radim Tolasz, PhD., Czech hydrometeorological institute, Ostrava, Czechia
Jozef Vivoda, European Centre for Medium range Weather Forecast (ECMWF)
Roman Výleta, PhD., Faculty of Civil Engineering STU, Bratislava, Slovakia

Technická redaktorka – Assistant Editor

Katarína Pukančíková, Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava, Slovakia
katarina.pukancikova@shmu.sk

VYDAVATEĽ – PUBLISHER

© Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, december 2023
Jeséniova 17, P. O. Box 15, 833 15 Bratislava 37
IČO 00 156 884
R. č. MK SR: 3268/09
ISSN 1335-339X, eISSN 2730-1028

METEOROLOGICKÝ ČASOPIS

METEOROLOGICAL JOURNAL

2023

ROČNÍK 26 – ČÍSLO 2

VOLUME 26 – NUMBER 2

SLOVENSKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV
SLOVAK HYDROMETEOROLOGICAL INSTITUTE



CONTENTS

AIR TEMPERATURE CHANGES IN THE PERIOD 1991 – 2020 Oliver Bchníček, Peter Kajaba.....	73
NIGHTTIME MINIMUM AIR TEMPERATURE AS A CLIMATOLOGICAL INDICATOR: SOME TEMPERATURE-RELATED ASPECTS OF NIGHTS IN WESTERN SLOVAKIA Dalibor Výberči, Jozef Pecho, Pavol Faško, Milan Onderka	91
A BRIEF COMPARISON OF TWO STOMATAL CONDUCTANCE MODELS FOR SWISS PINE Anna Buchholcerová, Peter Fleischer Jr.....	99
CHANGES IN THE FREQUENCY OF METEOROLOGICAL PHENOMENA IN SLOVAKIA BETWEEN CLIMATOLOGICAL NORMAL 1961 – 1990 AND 1991 – 2020 Marcel Garaj, Juraj Holec, Pavel Šťastný, Viera Rattayová.....	105

INFORMATION

International calibration of Brewer ozone spectrophotometers in Gánovce Oliver Mišaga	113
FAIRNESS Summer School in Belgium - Analysing urban microclimate data: from sensor to science Kristína Szabóová	114
Current problems in hydrology - conference with international participation Martin Halaj	116
A brief commentary of how the recent 2022 Tonga–Hunga Ha’apai volcano eruption, the 1908 Tunguska meteorite event, and 1961 Tsar Bomb test affected air pressure in Slovakia Milan Onderka, Jozef Pecho, Dalibor Výberči	116

OBSAH

ZMENY TEPLOTY VZDUCHU V OBDOBÍ 1991 – 2020 Oliver Bchníček, Peter Kajaba.....	73
NOČNÁ MINIMÁLNA TEPLOTA VZDUCHU AKO KLIMATOLOGICKÝ INDIKÁTOR: NIEKTORÉ TEPLOTNÉ ASPEKTY NOCI NA ZÁPADNOM SLOVENSKU Dalibor Výberči, Jozef Pecho, Pavol Faško, Milan Onderka	91
STRUČNÉ POROVNANIE DVOCH MODELOV STOMATÁLNEJ VODIVOSTI OZÓNU PRE BOROVIČU LIMBOVÚ Anna Buchholcerová, Peter Fleischer Jr.	99
ZMENY VO FREKVENCII VÝSKYTU METEOROLOGICKÝCH JAVOV NA SLOVENSKU MEDZI KLIMATOLOGICKÝMI NORMÁLMI 1961 – 1990 A 1991 – 2020 Marcel Garaj, Juraj Holec, Pavel Šťastný, Viera Rattayová.....	105

INFORMÁCIE

Medzinárodná kalibrácia Brewerových ozónových spektrofotometrov v Gánovciach Oliver Mišaga	113
FAIRNESS letná škola v Belgicku - Analýza údajov mestskej mikroklimy Kristína Szabóová.....	114
Current problems in hydrology - konferencia s medzinárodnou účasťou Martin Halaj.....	116
Krátky komentár k tomu ako erupcia vulkánu Tonga-Hunga Ha’apai z roku 2022, Tunguský meteorit z roku 1908 a výbuch bomby Tsar z roku 1961 ovplyvnili tlakové pole na Slovensku Milan Onderka, Jozef Pecho, Dalibor Výberči	116

AIR TEMPERATURE CHANGES IN THE PERIOD 1991 – 2020

OLIVER BOCHNÍČEK, PETER KAJABA

Slovak Hydrometeorological Institute, Jeséniova, 17, 833 15, Bratislava, Slovak Republic,
oliver.bochnicek@shmu.sk, peter.kajaba@shmu.sk

In the article, we provide a detailed description of the preparation and execution, evaluation of air temperature norms for the period 1991 – 2020. WMO international procedures were taken into account during the selection and completion of individual meteorological elements and their characteristics. In the work there were used mathematical and statistical procedures that take into account breaks and inhomogeneity (MASH) in the time series so that it was possible to create the largest possible number of places (points on the map) representing the territorial units of Slovakia with the values of the relevant characteristics. In the end, 88 points were created for the average air temperature, for the average maximum and minimum air temperature, for the number of summer, tropical, frost and ice days, as well as for the number of days with a tropical night, 56 points for the absolute maximum and minimum air temperature. Base on obtaining homogeneous data, normal of the average start and end of days with 5, 10 and 15 °C were subsequently prepared. All the values calculated in this way will serve for at least 10 years (WMO) as a benchmark for comparison with current (self-corresponding) values (characteristics). However, the results (trend) expected, are worrying for the further development of humanity.

This paper further investigates the relationships between elevation and warming across Slovakia to understand the spatial and temporal behavior of annual and seasonal air temperatures and to test the hypothesis of increased warming with elevation. Over the 60 years of the data set (1961 – 1990 and 1991 – 2020), temperature trend and elevation warming analyzes were performed. Slovakia is under visible annual and seasonal warming (stronger in summer and winter), both during the day and at night. These results could serve as a reference for further investigation of the effects of climate warming not only in Slovakia, but also in the wider region (e. g. The Carpathians) especially in relation to increased summer heat stress (e.g. more frequent and intense heat waves and milder winters), which we also documented by analyzing changes in the number of summer, tropical days and frost and ice days.

V článku podávame podrobný popis prípravy a vyhotovenia, zhodnotenia normálov teploty vzduchu za obdobie 1991 – 2020. Pri výbere a kompletizácii jednotlivých meteorologických prvkov a ich charakteristík boli zohľadnené medzinárodné postupy WMO. V práci boli využité matematické a štatistické postupy riešiace prerušenia a nehomogenity (MASH) v časovom rade tak, aby bolo možné vytvoriť čo najväčší počet miest (bodov na mape), reprezentujúce územné celky Slovenska s hodnotami príslušných charakteristík. V konečnom dôsledku tak bolo vytvorených 88 bodov pre priemernú teplotu vzduchu, pre priemerné maximum a minimum teploty vzduchu, pre počty letných, tropických, mrazových a ľadových dní, ako aj pre počty dní s tropickou nocou, 56 bodov pre absolútne maximum a minimum teploty vzduchu. Na základe získania homogénnych údajov boli následne pripravené normály priemerného nástupu a ukončenia dní s 5, 10 a 15 °C. Všetky takto vypočítané hodnoty budú slúžiť minimálne 10 rokov (WMO) ako etalón pre porovnávanie s aktuálnymi (sebe odpovedajúcimi) hodnotami (charakteristikami). Výsledky, (trend) akokoľvek očakávané, sú pre ďalší vývoj ľudstva znepokojujúce.

Táto práca ďalej skúma vzťahy medzi nadmorskou výškou a otepľovaním na Slovensku, aby sme pochopili priestorové a časové správanie ročných a sezónnych teplôt vzduchu a otestovali hypotézu zvýšeného otepľovania s nadmorskou výškou. Počas 60 rokov súboru údajov (1961 – 1990 a 1991 – 2020) sa vykonali analýzy trendu teplôt a výškového otepľovania. Na Slovensku je viditeľné ročné a sezónne otepľovanie (silnejšie v lete aj v zime), cez deň aj v noci. Tieto výsledky by mohli slúžiť ako referencia pre ďalšie skúmanie dôsledkov otepľovania klímy nielen na Slovensku, ale aj v širšom regióne (napr. Karpaty), najmä v súvislosti so zvýšeným letným tepelným stresom (napr. častejšie a intenzívnejšie vlny horúčav a miernejšie zimy), čo sme zdokumentovali aj analýzou zmien v počte letných, tropických, mrazových a ľadových dní.

Key words: normal air temperature, climate change, MASH, summer, tropical, frost and ice days, 1991 – 2020

INTRODUCTION

Leaving aside the very early records that mankind has observed for millennia, but not always with accurate or continuous records, often mixed with other subsequent events (this does not detract from their importance in the historical context, even for historical climatology), often kept in national libraries and archives, here we focused on regular measurements. Early records in manuscript form were kept in daily, weekly or monthly journals. Since the 1940s, and especially following the establishment of WMO, standardized forms and procedures have gradually become prevalent, and national meteorological archives have been designated as the storage site for these records.

Chronological record, constantly updated, in sequential order, methodical and careful tracking and record keeping enabled easier collection, archiving and subsequent use of records. Since the late twentieth century, most weather information has been transmitted digitally to centralized national collection centers. As the messages have been intended primarily for operational weather forecasting, it has been common practice to rely on the original observing documents for the creation of the climate record in climate centers around the world. The collection, transmission, processing and storage of operational meteorological data however, being dramatically improved by rapid advances in computer technology, and meteorological archives are

increasingly being populated with data that have never been recorded on paper. The power and ease of use of computers, the ability to record and transfer information electronically, and the development of international exchange mechanisms such as the Internet have given climatologists new tools to rapidly improve the understanding of climate. Absorbing all the knowledge mentioned above and using archival digitized records, we performed analyzes of meteorological data and calculations based on the recommendations of the WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals (2017) and WMO Guide to Climatological Practices (2018).

DATA

The observed daily maximum (t_{\max}), minimum (t_{\min}) and average (t_{avg}) air temperatures were analyzed at 88 meteorological stations of the Slovak Republic for the period 1991–2020 (Fig. 1–Fig. 3). The selection of stations was prepared according to the following WMO criteria (2017):

“Complete” - All climatological stations have a **completed daily and monthly series measurements**.

“WMO Guide” – Climatological stations that **meet requirements of the WMO Guide**.

Figure 1. Location of analyzed stations for period 1991 – 2020.

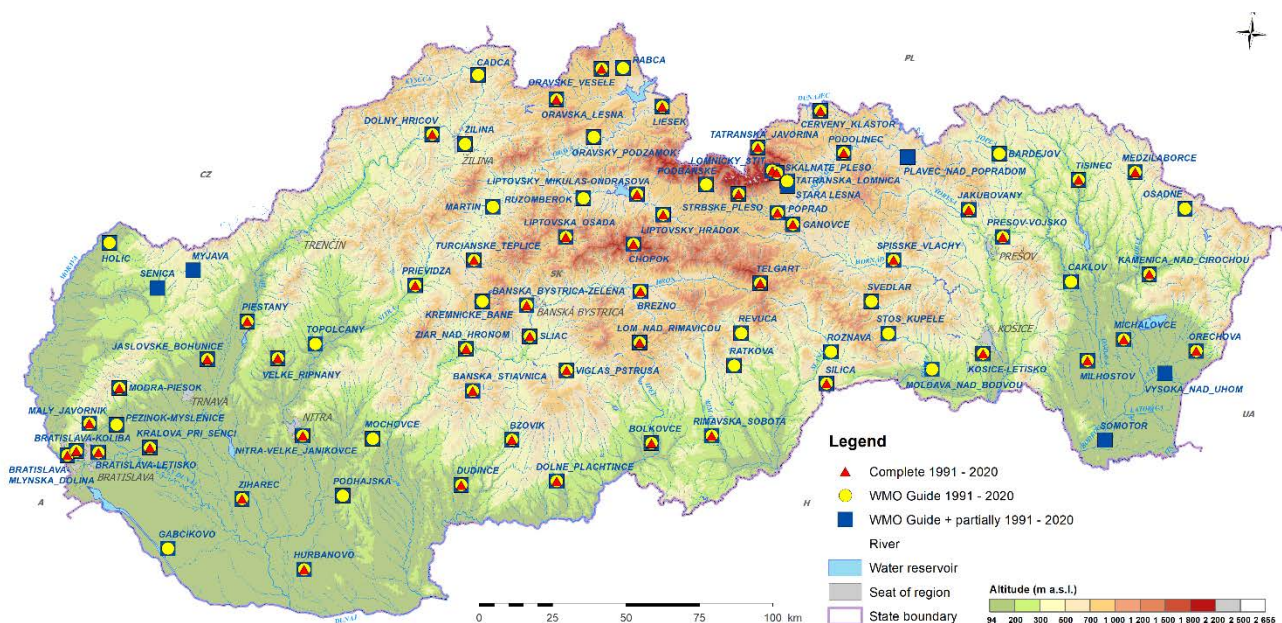


Figure 2. Complete analyzed station network for preparing climate normal for period 1991 – 2020.

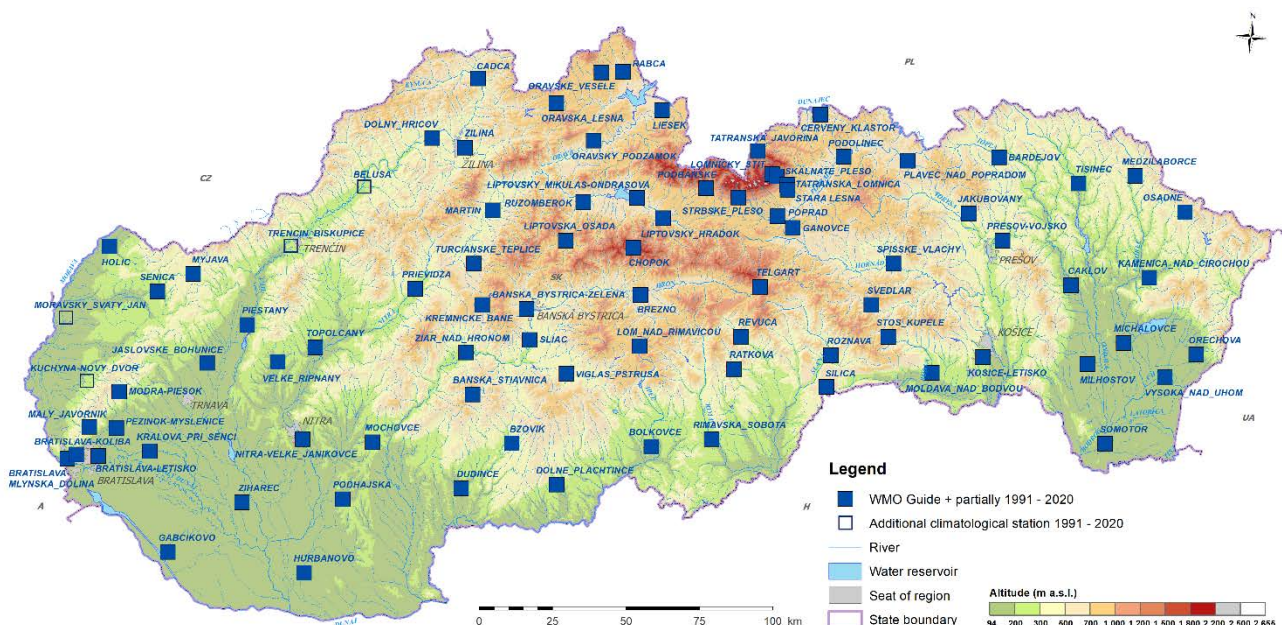
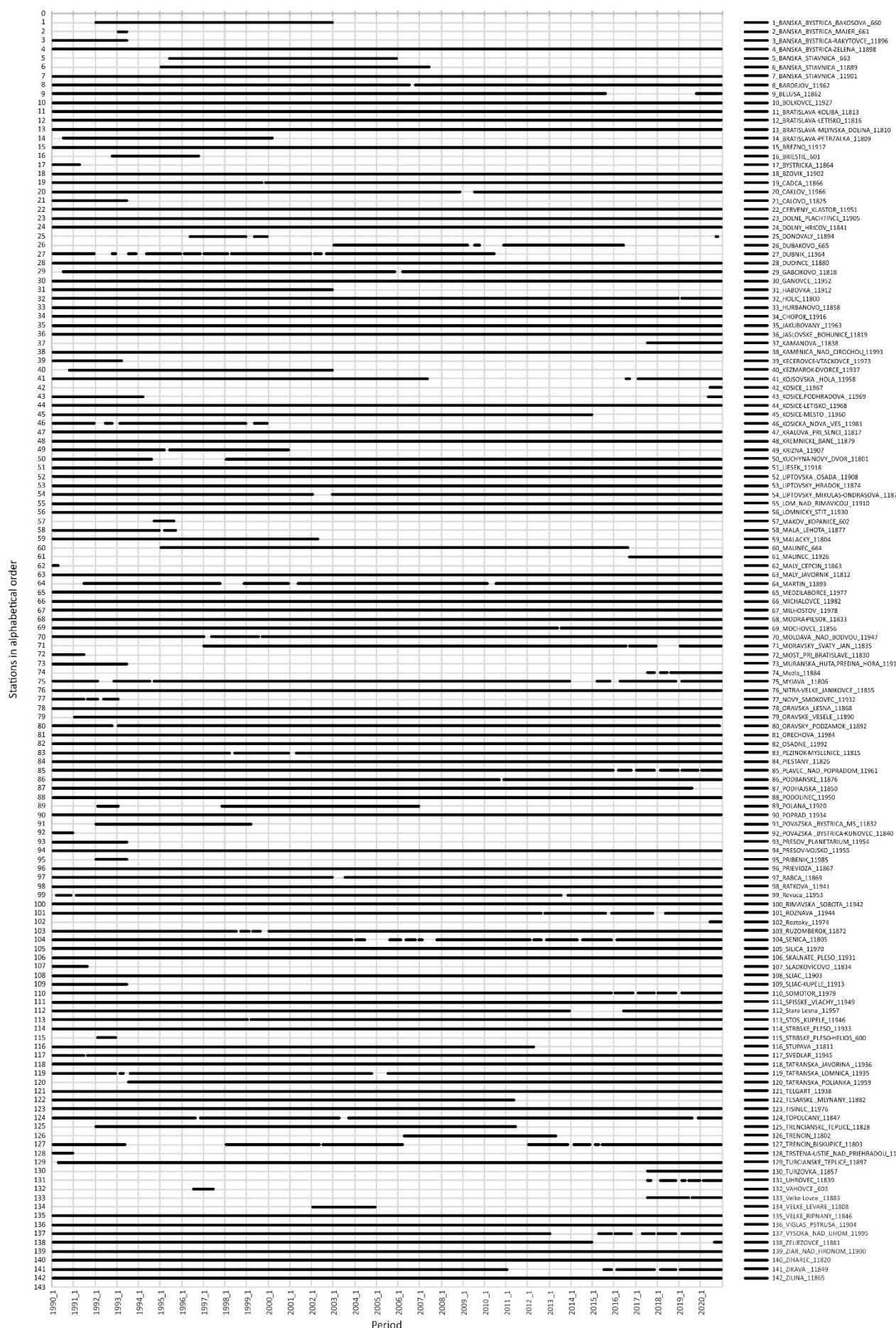


Figure 3. Data availability by meteorological station name in the period 1991–2020.



“WMO Guide + partially” – Climatological stations meeting the conditions of the **WMO GUIDE only in a certain part of the series** (understood the months for 1991 – 2020).

“According to the position extreme” – Climatological stations, meeting the conditions of the **WMO GUIDE only in number of years** its inclusion is possible under the assumption of the same year of occurrence of the extreme (for a given month in the period 1991 – 2020) as at the surrounding stations.

“Note to daily data” – at climatological stations, their daily records, there are incomplete time series (the month has an incomplete number of daily measurements).

Timelines of station measurement history

Because some territorially important stations dropped out of the list, we also built a graph of the occurrence of data in the timeline arranged by:

- a) Alphabetically order
(station name, Fig. 3);
- b) Meteorological station indicator.

This helped us to construct some other time series that fulfil the gap in station map

METHODS

MASH methods

Possible break points and shifts detect and adjust through mutual comparisons of series within the same climatic area. The candidate series chose from the available time series and the remaining series consider as reference series. The role of series changes “step by step” in the course of the procedure. Depending on the climatic elements, additive or multiplicative models are applied. The second case transform into the first one by logarithmization.

Several difference series construct from the candidate and weighted reference series. The optimal weighting is determined by minimizing the variance of the difference series, in order to increase the efficiency of the statistical tests. Assuming that the candidate series is the only common series of all the difference series, we assign the boundary points found in all the difference series to the candidate series. A new multiple break points detection procedure has been developed which takes the problem of significance and efficiency into account. We formulate significance and effectiveness according to conventional statistics regarding errors of the first and second type. This test obtains not only estimated break points and shift values, but the corresponding confidence intervals as well. We adjust the series using point and interval estimates. This version is evolving towards automation. Some developments connect with special problems of the homogenization of climatic time series. One of them is the relation of monthly, seasonal and annual series. The problem arises from the fact, that the signal to noise ratio is probably less in case of monthly series than in case of derived seasonal or annual ones. Thanks to this, we can more easily detect inhomogeneity in the derived series, even if we plan to adjust the monthly series. Another issue concerns the use

of metadata during the homogenization process. The developed version of MASH system makes possible to use the metadata information – in particular the probable dates of break points - automatically. This new version also includes a new transformation procedure that the author developed for the multiplicative model in order to solve the problem arising from values approaching zero. A new part of MASH system is a verification procedure (MASHVERI.BAT) which makes possible to evaluate the actual or the final stage of the homogenization. We think the verification is an important part of the topic of homogenization since all over the world there are a many so-called homogenized series however their reliability sometimes is doubtful. The basic concept of the verification procedure is that we can increase the reliability in homogenized series by joint comparative mathematical examination of the original and homogenized set of series.

The author of MASH connects the latest development with a certain automation of procedures.

Basic principles of MASH procedure:

- Relative homogeneity test procedure.
- Step by step procedure: the role of series (candidate or reference series) changes “step by step” in the course of the procedure.
- Depending on the climatic elements, we will use an additive or cumulative model.
- It is possible to homogenize monthly, seasonal or annual time series.
- In case you have monthly series for all 12 months, we can choose to homogenize the monthly, seasonal and annual series together.
- Derive daily inhomogeneities from monthly ones.
- Meta data (probable dates of break points) can be used automatically.
- There is a possibility to verify the actual or final stage of homogenization.

The mathematical basis of ‘MASH’ procedure

Statistical modelling:

Additive Model (for example temperature)

Examined series:

$$X(t) = C_j(t) + IH_j(t) + \varepsilon(t) \quad (j = 1, 2 \dots N; t = 1, 2 \dots n)$$

C: climate change; IH: inhomogeneity, ε : noise

Multiplicative Model

(for example monthly or seasonal precipitation)

Examined series:

$$X_j^*(t) = C_j^*(t) \cdot IH_j^*(t) \cdot \varepsilon_j^*(t) \quad (j = 1, 2 \dots N; t = 1, 2 \dots n)$$

C*: climate change; IH*: inhomogeneity, ε^* : noise

Logarithmization for Additive Model

$$X_j(t) = C_j(t) + IH_j(t) + \varepsilon(t) \quad (j = 1, 2 \dots N; t = 1, 2 \dots n)$$

$$\text{where: } \begin{aligned} X_j(t) &= \ln X_j^*(t) & C_j(t) &= \ln C_j^*(t) \\ IH_j(t) &= \ln IH_j^*(t) & \varepsilon_j(t) &= \ln \varepsilon_j^*(t) \end{aligned}$$

Basic characteristics of normal values 1991 – 2020 and statistics

Processing was carried out using standard procedures for calculating monthly, seasonal and annual values in tabular form for 88 meteorological stations and for meteorological characteristics (mean air temperature, mean maximum and mean minimum air temperature, absolute minimum and maximum air temperature. Later on number of days with characteristic temperatures for a summer day ($t_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$), tropical day ($t_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$), day with tropical night ($t_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$), frost ($t_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$), ice ($t_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) and arctic day ($t_{\max} < -10^{\circ}\text{C}$) were processed as well. The result is tabular outputs for individual stations as well as an overview table of normal values. Other statistics such as standard deviation, skewness, kurtosis, minimum and year of occurrence of minimum, maximum and year of occurrence of maximum and climatic certainty of occurrence as well as previous normal values for the periods 1981 – 2010, respectively, 1961 – 1990 were processed relied on WMO recommendations (WMO 2017, 2018).

RESULTS

Research on decadal air temperature averages

We converted the homogenized data and their characteristics into a standard form comparable to the outputs for previous periods (1981 – 2010, respectively 1961 – 1990).

For a better idea of the trend of air temperature in the historical series, we constructed the values of decade averages of air temperature at professional meteorological stations, which represent Slovakia horizontally and vertically (Fig. 4a, 4b and 4c).

Selected characteristics:

- Average decade air temperature
- Average decade maximum air temperature
- Average decade minimum air temperature

Comparison of decades of air temperature especially the normal period 1991 – 2020

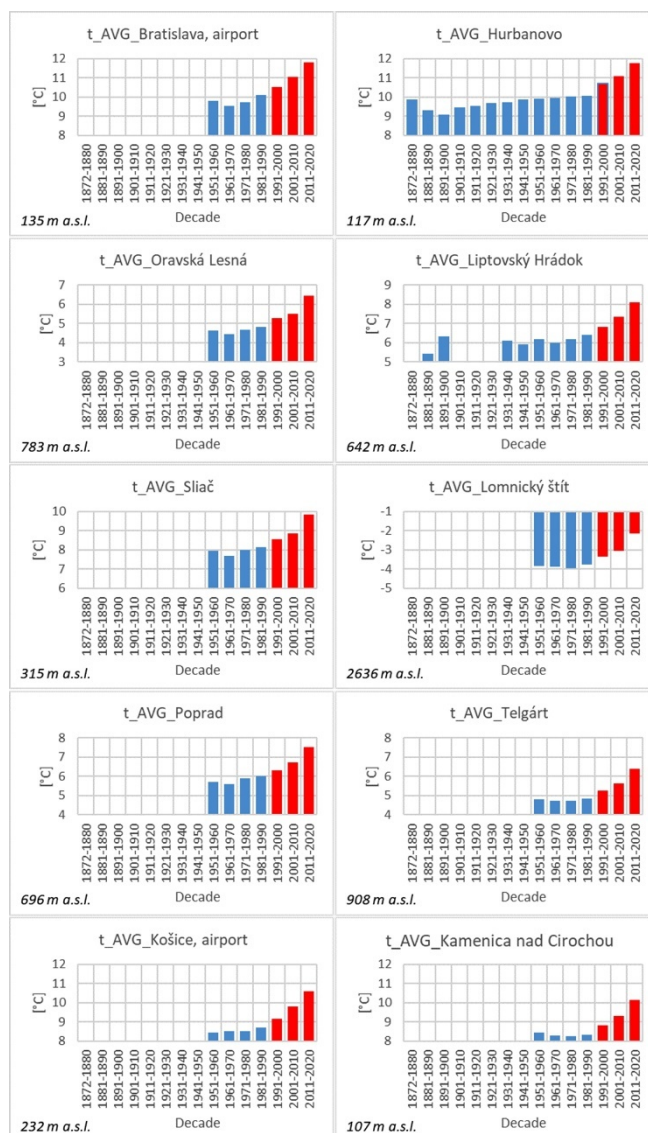
Common facts are that:

- Selected professional station represent Slovakia in latitude, longitude and altitude manner.
- The last 3 decades are the warmest.
- Never in the history of measurement has the last temperature decade been higher.
- The course of air temperature by altitude is exponential.
- The slope of the curve depends on period (season).

Decade air temperature (t_{AVG})

The largest decade differences in average air temperature are clearly between the 3rd and the 2nd decade of the period 1991 – 2020, reaching up to 1 $^{\circ}\text{C}$.

Figure 4a. Average decade air temperature.



Decade maximum air temperature (t_{\max_AVG})

The most significant decade changes in the maximum air temperature occurred between the 2nd and 3rd decade, reaching up to 1.1 $^{\circ}\text{C}$.

Decade minimum air temperature (t_{\min_AVG})

Although the decade difference t_{\min_AVG} between the 2nd and 3rd decades at selected stations was larger, it was not as significant as it was with t_{AVG} or t_{\max_AVG} .

Comparison of stations of different latitude and longitude and according to altitude and different periods 1991 – 2020 compared to 1981 – 2010 and 1991 – 2020 compared to 1961 – 1990

If it considers the differences in area (longitude, latitude) and vertically (altitude), then the dependencies show the following results (Fig. 5).

Figure 4b. Average decade maximum air temperature.

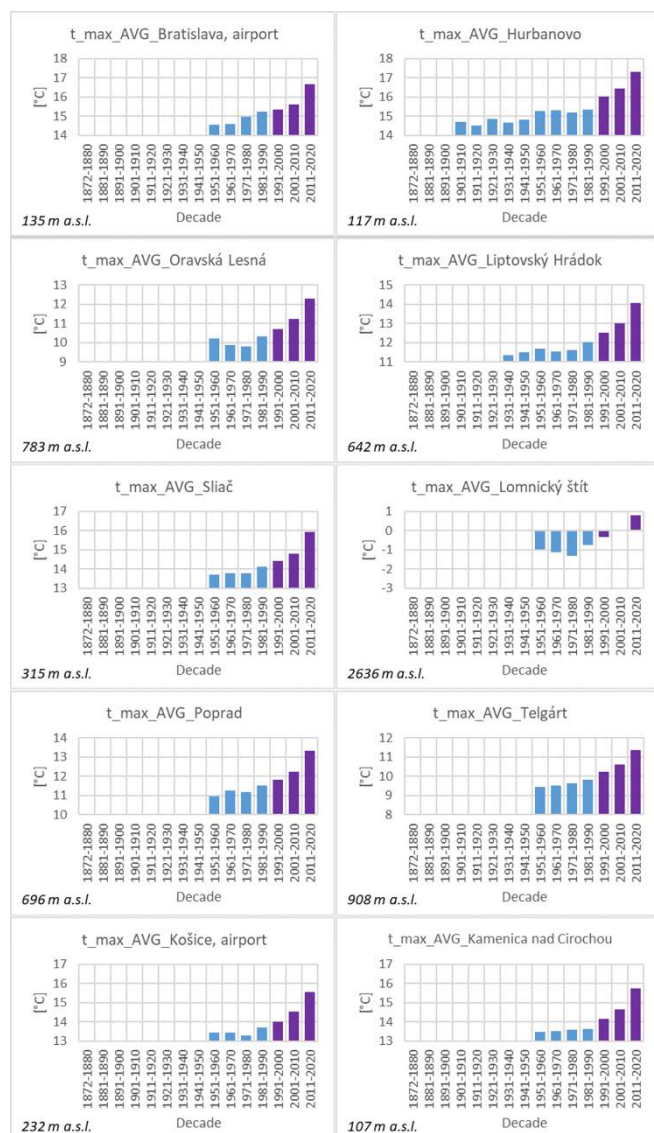
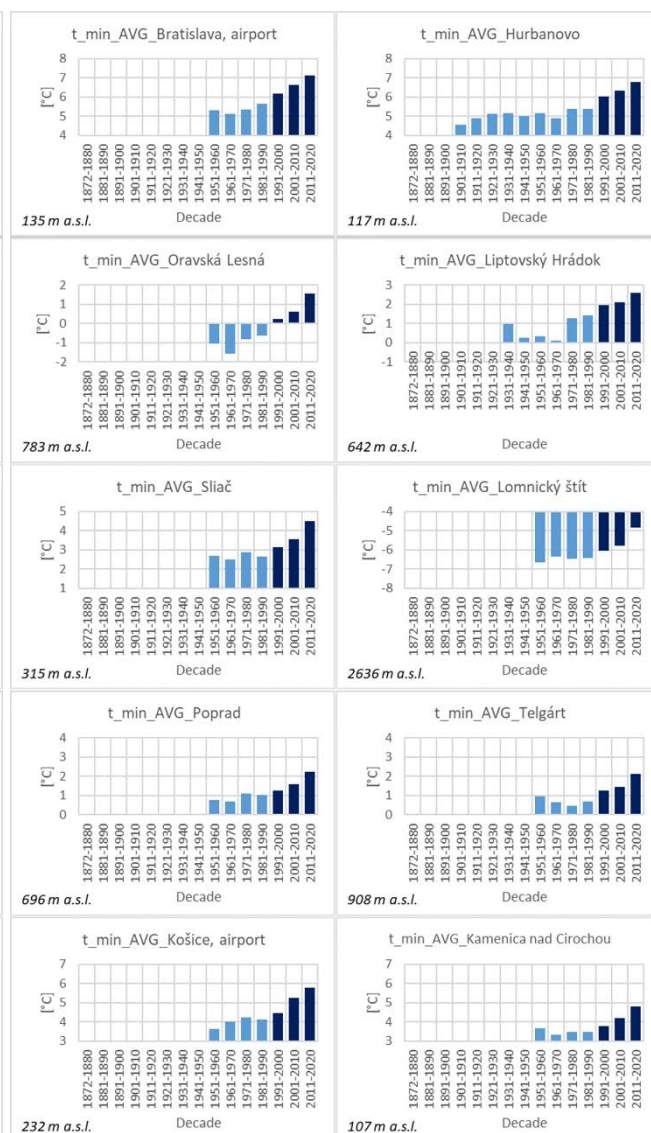


Figure 4c. Average decade minimum air temperature.



Comparing the periods 1991 – 2020, 1981 – 2010 and 1961 – 1990, we state:

- The difference in temperatures increases with time. More significantly in 1991 – 2020 compared to 1961 – 1990.
- Changing air temperature is important for various sectors (transport, tourism, agriculture, etc.). Therefore, we prepared the course of air temperature with height for comparison with the periods 1961 – 1990, 1981 – 2010. In both comparisons (1991 – 2020 versus 1961 – 1990 and 1981 – 2010), a positive difference in temperature can be seen in the corresponding altitudes. The dependence of air temperature with altitude indicates an exponential dependence in months, seasons and in the year.

Important facts:

- Slope of the curve and the distance between the two curves within the month are important.

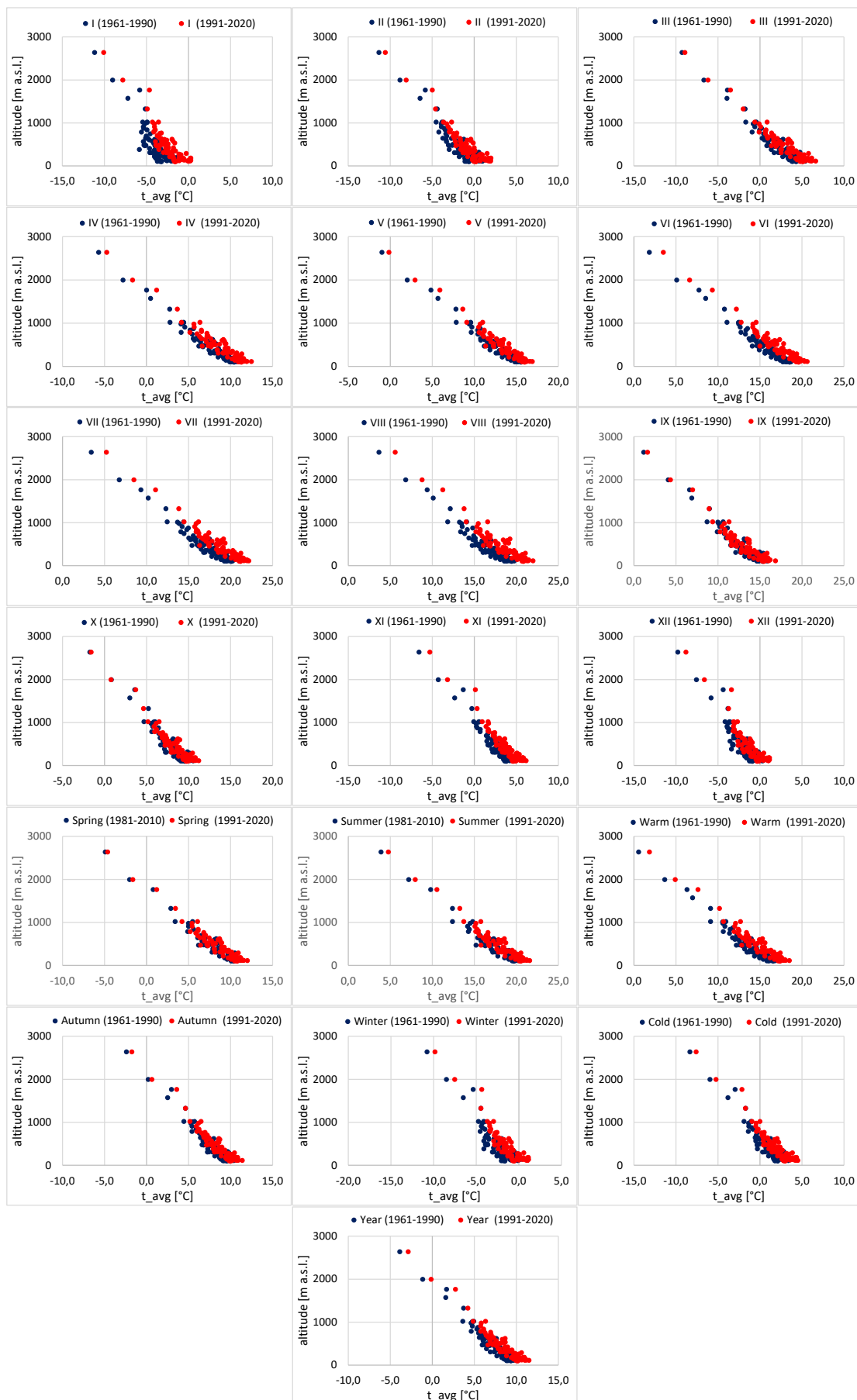
- In the winter months and in the cold half-year - a slower drop in temperature with altitude.
- In the summer months, in the spring and in the warm half-year - a faster drop in temperature with altitude.

Comparison of 1991 – 2020 and 1961 – 1990

Large (+) differences in temperature occur in: “JAN”, “JUN”, “JUL”, “AUG”, “NOV”, “DEC”.

In order to document at least some of the processes here in graphic form, we present the average air temperature in the coldest month of the year (January, Fig. 6) and in the warmest month of the year (July, Fig. 7). We used the additive model of the MASH program for homogenization. To homogenize the number of summer (Fig. 8) days (tropical, days with tropical night) or of frost (Fig. 9) days (ice, arctic) we used the multiplicative model of the MASH program and all this for the period 1991 – 2020.

Figure 5. Monthly (seasonal, yearly) average of air temperature comparison.



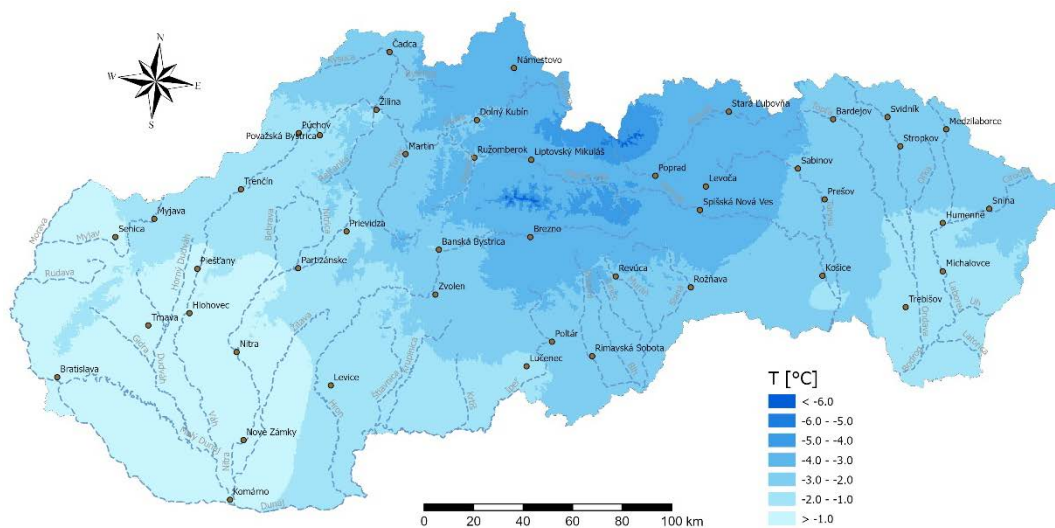


Figure 6.
Map processing
of January air
temperature
(mean monthly)
in the period
1991 – 2020.

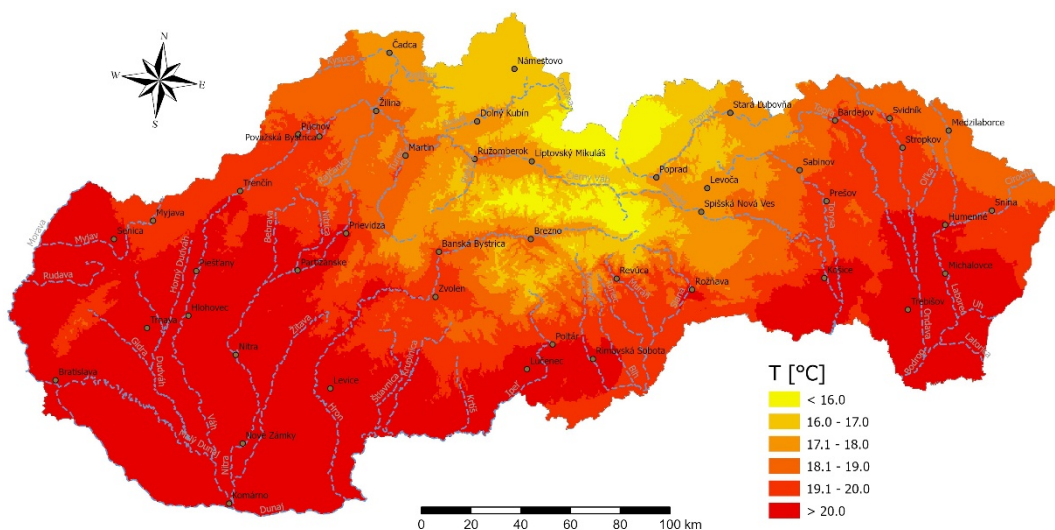


Figure 7.
Map processing
of July air
temperature
(mean monthly)
in the period
1991 – 2020.

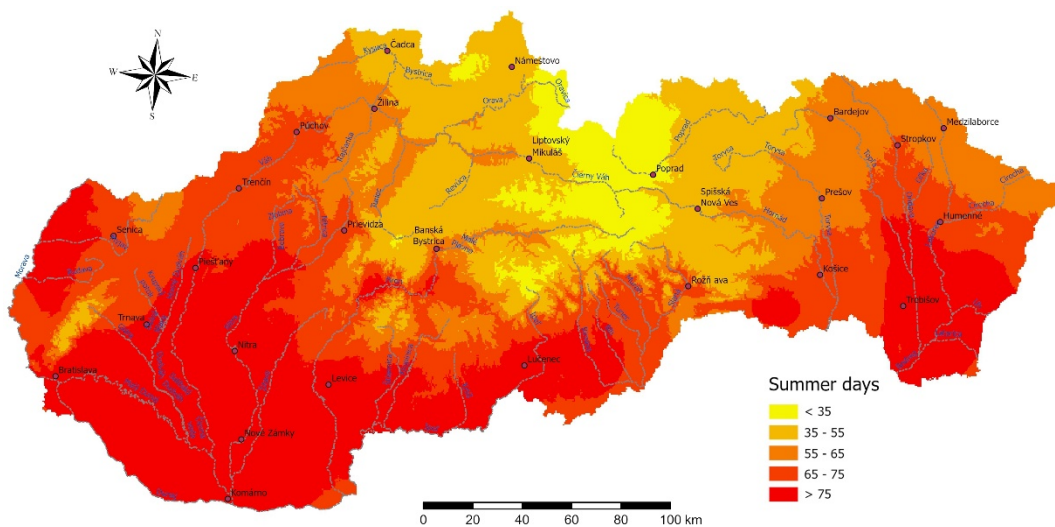


Figure 8.
Map processing
of summer days
(annual account)
in the period
1991 – 2020.

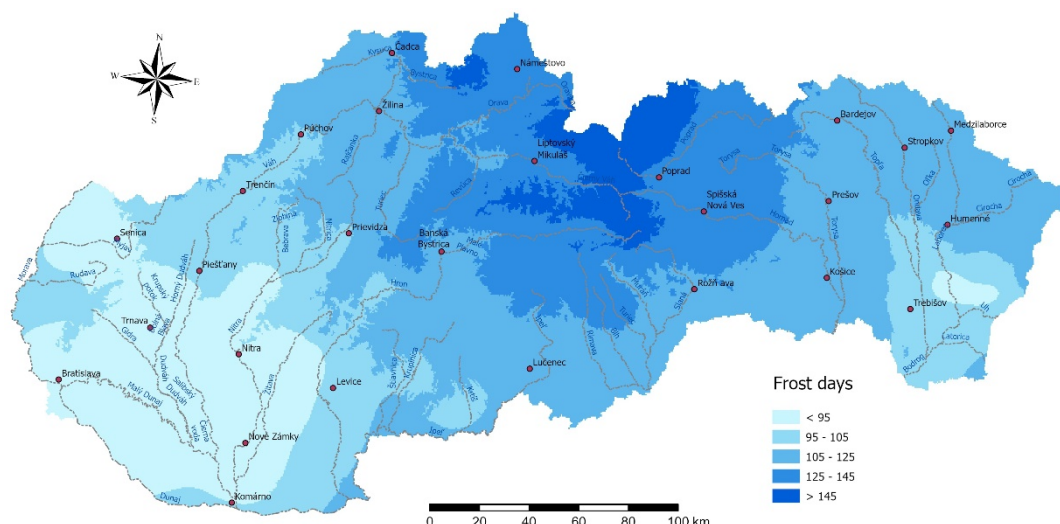


Figure 9.
*Map processing
of frost days
(annual account)
in the period
1991 – 2020.*

Evaluation of the change in average air temperature in the period 1991 – 2020

From a statistical (Tab. 1 and Tab. 2) point of view, the **January** trend of air temperature change turned out to be statistically insignificant (correlation coefficient (r) reached lower values of $p=0.1$ ($r=0.2573$) see Nosek (1972), where p is a level of significance. In January, we did not observe temperature changes during 1991 – 2020. In **February**, only at meteorological stations (from a selected number of stations) in Piešťany, Prievidza, Ružomberok, Liptovský Hrádok, Dudince, Sliač, Boľkovce and in the east of the country in Košice, airport, Medzilaborce, Milhostov, Somotor and in Kamenica nad Cirochou the changes (increase in air temperature) were statistically significant. In February, we recorded an average increase in air temperature of $+2.3^{\circ}\text{C}$, with maximums of 1.5°C to 2.8°C , especially in the east of Slovakia. In **March**, the number of statistically significant changes (increase in air temperature) expressed in the number of locations increased even more, while in some locations they were more significant ($p=0.05$ ($r=0.3044$)), e.g. in Bratislava at the airport, in Liptovský Hrádok, Boľkovce, Poprad, Košice at the airport, Medzilaborce, or in Kamenica nad Cirochou. In March, we observed an average increase in air temperature of $+1.7^{\circ}\text{C}$ with a maximum in Boľkovce and Košice, airport of $+2.2^{\circ}\text{C}$. In **April**, with the exception of Bratislava, airport the increase in air temperature was statistically very significant ($p=0.01$ (0.3932)). In April, we recorded an average increase in air temperature of $+2.5^{\circ}\text{C}$ with a maximum in Liptovský Hrádok of $+3.2^{\circ}\text{C}$. On the contrary, in **May** we observed statistically insignificant changes (no trend). There was no change in air temperature behavior in May. **June** was statistically the most significant (at all locations the dependence was higher than $p=0.01$ (0.3932)). We recorded the closest dependence for Košice, airport ($r=0.642$) and for Kamenica nad Cirochou ($r=0.627$). In June, we noted an increase in air temperature on average by $+2.3^{\circ}\text{C}$ with a maximum in Prievidza of $+2.8^{\circ}\text{C}$. **July** (similar to March, but with a relatively closer dependence), showed a statistically significant increase

in air temperature in most places, but not as significant as in June. In July, we observed an average increase in air temperature of $+1.2^{\circ}\text{C}$ with a maximum in Bratislava, airport of $+2^{\circ}\text{C}$. **August** as well as **September** showed a statistically significant trend (dependency) of an increase in air temperature. In August, we recorded an average increase in air temperature by $+1.5^{\circ}\text{C}$, with a maximum of $+2.4^{\circ}\text{C}$ at Lomnický štít, and $+1.9^{\circ}\text{C}$ at Chopok. In September, we observed an average increase in air temperature of $+1.8^{\circ}\text{C}$ with a maximum in Košice, airport of $+2.5^{\circ}\text{C}$.

At most meteorological stations, **October** showed a significant or strongly significant dependence on the increase in air temperature from 1991 to 2020. In October, we recorded an increase in air temperature on average by $+1.5^{\circ}\text{C}$ (maximum at Lomnický štít up to $+2.0^{\circ}\text{C}$, $+1.9^{\circ}\text{C}$ in Chopok and Bratislava, airport). In **November** and **December**, we observed a very close to extremely close dependence (except mountain stations in December) when the air temperature increased above $p=0.02$ (0.3578), respectively above $p=0.01$ (0.3932). In November, we recorded an increase in air temperature by $+2.7^{\circ}\text{C}$ on average, with a maximum of $+3.6^{\circ}\text{C}$ at Chopok and $+3.5^{\circ}\text{C}$ at Lomnický štít. In December, we observed an average increase in air temperature of up to $+3.1^{\circ}\text{C}$ with a maximum in Kamenica nad Cirochou up to $+4.5^{\circ}\text{C}$ ($+3.5^{\circ}\text{C}$ in Somotor and Milhostov). **Seasonal** values (except in winter) showed a statistically extremely significant trend of air temperature increase above $p=0.01$ (0.3932) with an average of the correlation coefficient in spring of 0.467 and a maximum of 0.588, in summer with an average of 0.537 and a maximum of 0.653, and in autumn with an average of 0.581 and a maximum of 0.705. In winter (Fig. 10), depending on the course of the air temperature from 1991 to 2020, we observed a statistically less significant closeness of the relationship than in other seasons, nevertheless more pronounced in the east of the country. In spring (Fig. 11), we recorded an average increase in air temperature by $+1.5^{\circ}\text{C}$ with a maximum of $+1.9^{\circ}\text{C}$ in Poprad. In the summer (Fig. 12), we observed an average increase in air temperature by $+1.7^{\circ}\text{C}$ with a maximum in Prievidza of $+2.1^{\circ}\text{C}$.

Table 1. Change in average air temperature in the period 1991 – 2020.

Ind. (short)	Name	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	spring	summer	autumn	winter	Wp	Cp	year
805	Senica	0.3	1.9	1.5	2.1	0.3	2.3	1.4	1.6	1.5	1.7	2.8	3.0	1.3	1.7	2.0	1.4	1.5	1.9	1.7
816	Bratislava, airport	0.1	2.2	2.0	2.6	0.2	2.5	2.0	1.2	1.8	1.9	2.4	3.0	1.6	1.9	2.1	1.5	1.7	1.9	1.9
826	Piešťany	0.2	2.4	1.6	2.3	0.0	2.5	1.6	1.3	1.3	1.5	3.0	3.2	1.3	1.8	1.9	1.6	1.5	2.0	1.7
835	Moravský sv. Ján	0.5	1.9	1.5	2.3	0.1	2.3	1.3	1.5	1.6	1.3	2.7	3.0	1.3	1.7	1.9	1.5	1.5	1.8	1.6
858	Hurbanovo	0.2	2.1	1.4	2.3	0.0	2.1	1.6	1.2	1.5	1.3	2.6	2.9	1.2	1.7	1.8	1.4	1.4	1.7	1.6
862	Beluša	-0.1	2.2	1.7	2.6	0.0	2.3	1.3	1.5	1.5	1.5	2.7	3.3	1.4	1.7	1.9	1.5	1.5	1.9	1.7
866	Čadca	-0.2	1.8	1.8	1.9	-0.2	2.1	0.8	1.0	1.0	1.2	2.7	3.1	1.2	1.3	1.7	1.3	1.1	1.8	1.4
867	Prievidza	0.0	2.4	1.8	2.9	0.8	2.8	1.7	1.9	1.9	1.7	2.7	3.0	1.8	2.1	2.1	1.5	2.0	1.9	1.9
868	Oravská Lesná	0.1	2.0	1.5	2.8	0.3	2.4	1.1	1.6	1.8	1.4	3.0	3.2	1.5	1.7	2.0	1.5	1.7	1.9	1.8
872	Ružomberok	-0.3	2.5	1.6	2.6	-0.2	2.2	0.8	1.3	1.6	1.0	2.5	2.8	1.3	1.4	1.7	1.4	1.3	1.7	1.5
874	Liptovský Hrádok	0.1	2.7	2.0	3.2	0.2	2.6	1.4	1.7	2.0	1.4	2.5	3.4	1.8	1.9	2.0	1.8	1.8	2.1	1.9
880	Dudince	0.3	2.7	1.6	2.1	0.1	2.3	1.3	1.3	1.6	1.4	2.7	3.1	1.2	1.7	1.9	1.6	1.5	1.9	1.7
903	Sliac	-0.2	2.6	1.7	2.5	0.0	2.4	1.2	1.7	2.0	1.8	2.6	3.0	1.4	1.8	2.2	1.3	1.6	1.8	1.8
916	Chopok	-1.2	1.2	1.5	3.0	0.6	2.6	0.9	1.9	2.4	1.9	3.6	2.0	1.7	1.9	2.6	0.4	1.9	1.5	1.7
927	Boľkovce	0.2	2.5	2.2	2.5	0.4	2.1	1.2	1.6	2.0	1.5	2.7	3.0	1.7	1.7	2.0	1.4	1.6	1.9	1.8
930	Lomnický štít	-1.1	1.6	1.5	3.0	0.6	2.4	0.7	2.4	2.3	2.0	3.5	1.6	1.7	1.8	2.6	0.4	1.9	1.5	1.7
934	Poprad	-0.4	1.9	2.1	3.0	0.5	2.5	1.3	1.6	2.0	1.5	2.7	3.4	1.9	1.8	2.1	1.4	1.8	1.9	1.9
938	Telgárt	-0.5	1.8	1.7	2.8	0.5	2.1	1.2	1.5	1.9	1.5	2.8	2.4	1.6	1.6	2.1	0.9	1.7	1.6	1.6
962	Bardejov	0.0	2.1	1.5	1.9	-0.3	1.7	0.5	1.1	1.9	1.1	2.6	3.4	1.0	1.0	1.1	1.9	1.6	1.1	1.7
968	Košice, airport	0.4	2.8	2.2	2.8	0.7	2.6	1.3	2.2	2.5	1.7	2.9	3.6	1.9	2.0	2.4	2.0	2.0	2.3	2.1
977	Medzilaborce	0.5	2.8	2.1	2.3	0.5	2.3	0.9	1.1	1.9	1.8	2.7	3.8	1.6	1.7	2.3	2.2	1.7	2.3	2.0
978	Milhostov	0.3	2.6	1.7	2.0	0.1	2.0	1.0	1.8	2.4	1.1	2.4	3.5	1.3	1.6	2.0	1.9	1.6	1.9	1.8
979	Somotor	0.5	2.8	1.6	1.6	-0.4	1.4	0.0	0.8	1.7	0.7	2.4	3.5	0.9	0.7	1.6	2.0	0.9	1.9	1.4
993	Kamenica n/C	0.8	2.8	2.0	2.5	0.7	2.5	1.1	1.8	1.9	1.3	2.6	4.5	1.7	1.8	1.9	2.5	1.8	2.3	2.1

Legend: JAN - January, FEB - February, MAR - March, JUN - June, JUL - July, AUG - August, SEP - September, OCT - October, NOV - November, DEC - December, spring - March to May, summer - June to August, Autumn - September to November, Winter - December to February, Wp - April to September, Cp - October to March, year - January to December.

Table 2. Correlation coefficient of change in average air temperature in the period 1991 – 2020.

Ind. (short)	Name	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	spring	summer	autumn	winter	Wp	Cp	year
805	Senica	0.045	0.203	0.250	0.398	0.054	0.489	0.296	0.287	0.288	0.313	0.422	0.458	0.410	0.483	0.567	0.253	0.539	0.431	0.615
816	Bratislava, airport	0.014	0.238	0.324	0.014	0.051	0.524	0.401	0.221	0.352	0.374	0.392	0.480	0.488	0.516	0.623	0.269	0.604	0.458	0.664
826	Piešťany	0.024	0.271	0.263	0.403	0.006	0.554	0.350	0.254	0.257	0.267	0.433	0.466	0.405	0.537	0.530	0.282	0.550	0.451	0.651
835	Moravský sv. Ján	0.059	0.212	0.256	0.401	0.017	0.481	0.280	0.287	0.349	0.256	0.415	0.422	0.395	0.500	0.554	0.249	0.550	0.419	0.651
858	Hurbanovo	0.026	0.223	0.245	0.428	0.004	0.469	0.356	0.238	0.299	0.256	0.380	0.439	0.387	0.498	0.556	0.247	0.543	0.424	0.631
862	Beluša	0.014	0.255	0.270	0.458	0.008	0.541	0.297	0.300	0.301	0.281	0.401	0.450	0.438	0.531	0.553	0.262	0.590	0.429	0.674
866	Čadca	0.028	0.200	0.266	0.358	0.046	0.509	0.187	0.230	0.233	0.228	0.398	0.386	0.369	0.453	0.525	0.213	0.480	0.399	0.573
867	Prievidza	0.003	0.277	0.282	0.483	0.145	0.595	0.347	0.366	0.360	0.316	0.384	0.423	0.521	0.626	0.579	0.252	0.697	0.429	0.706
868	Oravská Lesná	0.008	0.218	0.242	0.496	0.057	0.534	0.265	0.382	0.371	0.254	0.415	0.417	0.469	0.587	0.589	0.257	0.680	0.429	0.674
872	Ružomberok	0.037	0.273	0.265	0.458	0.050	0.494	0.187	0.284	0.326	0.185	0.364	0.373	0.410	0.485	0.491	0.230	0.519	0.399	0.607
874	Liptovský Hrádok	0.010	0.288	0.309	0.551	0.039	0.605	0.324	0.399	0.406	0.285	0.348	0.439	0.543	0.611	0.562	0.292	0.690	0.452	0.706
880	Dudince	0.033	0.289	0.296	0.386	0.026	0.527	0.306	0.271	0.341	0.293	0.412	0.414	0.430	0.537	0.588	0.261	0.570	0.437	0.674
903	Sliac	0.028	0.276	0.293	0.472	0.004	0.589	0.290	0.365	0.401	0.361	0.392	0.373	0.476	0.589	0.629	0.214	0.641	0.397	0.670
916	Chopok	0.156	0.172	0.242	0.501	0.108	0.566	0.195	0.394	0.388	0.261	0.294	0.282	0.521	0.586	0.609	0.094	0.701	0.407	0.702
927	Boľkovce	0.020	0.274	0.369	0.494	0.074	0.530	0.307	0.340	0.391	0.315	0.413	0.365	0.555	0.561	0.637	0.233	0.628	0.432	0.700
930	Lomnický štít	0.156	0.213	0.240	0.485	0.117	0.497	0.163	0.530	0.360	0.267	0.504	0.229	0.513	0.591	0.566	0.081	0.708	0.394	0.731
934	Poprad	0.046	0.192	0.323	0.551	0.107	0.639	0.339	0.398	0.399	0.286	0.375	0.435	0.588	0.653	0.614	0.234	0.724	0.420	0.720
938	Telgárt	0.087	0.219	0.269	0.513	0.110	0.545	0.291	0.355	0.358	0.266	0.422	0.386	0.521	0.578	0.597	0.196	0.656	0.401	0.711
962	Bardejov	0.003	0.243	0.238	0.369	0.065	0.473	0.114	0.316	0.392	0.239	0.379	0.450	0.336	0.336	0.429	0.622	0.273	0.487	0.394
968	Košice, airport	0.065	0.342	0.343	0.519	0.132	0.642	0.284	0.457	0.456	0.343	0.455	0.473	0.560	0.624	0.705	0.352	0.673	0.519	0.779
977	Medzilaborce	0.066	0.329	0.308	0.455	0.107	0.578	0.206	0.316	0.471	0.338	0.378	0.488	0.565	0.624	0.664	0.376	0.706	0.499	0.794
978	Milhostov	0.041	0.319	0.278	0.394	0.022	0.558	0.230	0.405	0.459	0.251	0.390	0.473	0.452	0.527	0.647	0.336	0.610	0.452	0.716
979	Somotor	0.071	0.325	0.250	0.327	0.069	0.412	0.005	0.179	0.322	0.151	0.397	0.475	0.306	0.252	0.557	0.353	0.335	0.443	0.595
993	Kamenica n/C	0.105	0.294	0.306	0.473	0.141	0.627	0.266	0.435	0.389	0.249	0.333	0.533	0.551	0.610	0.582	0.379	0.677	0.479	0.595

Legend: Correlation coefficient values for the significance limit $p = 0.1$; 0.05 ; 0.02 and 0.01 .
 $p = 0.1$ (0.2960); $p = 0.05$ (0.3494); $p = 0.02$ (0.4093); $p = 0.01$ (0.4487)

Figure 10.
Map processing
of average air
temperature
change (winter)
in the period
1991 – 2020.

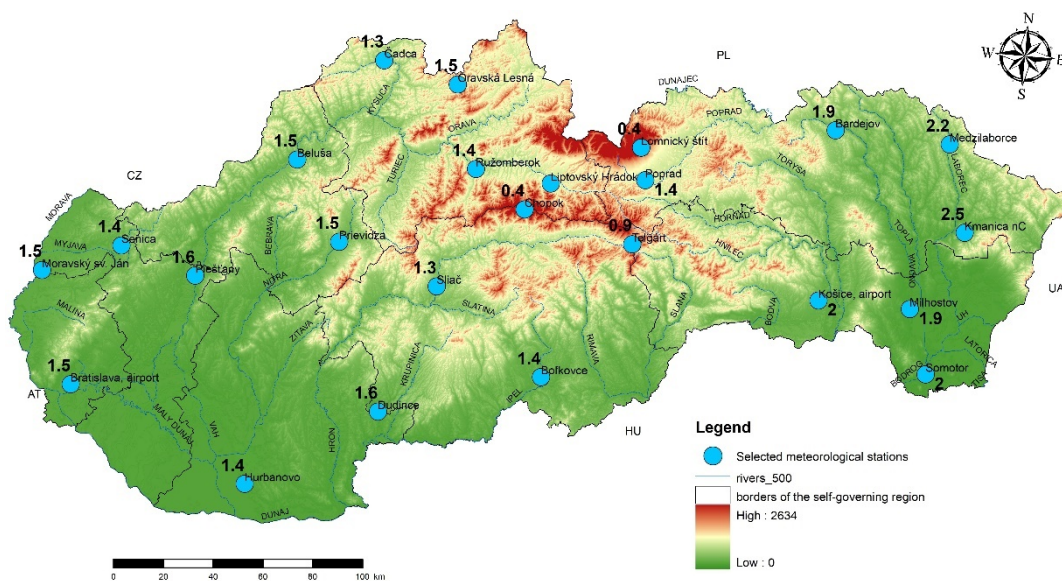


Figure 11.
Map processing
of average air
temperature
change (spring)
in the period
1991 – 2020.

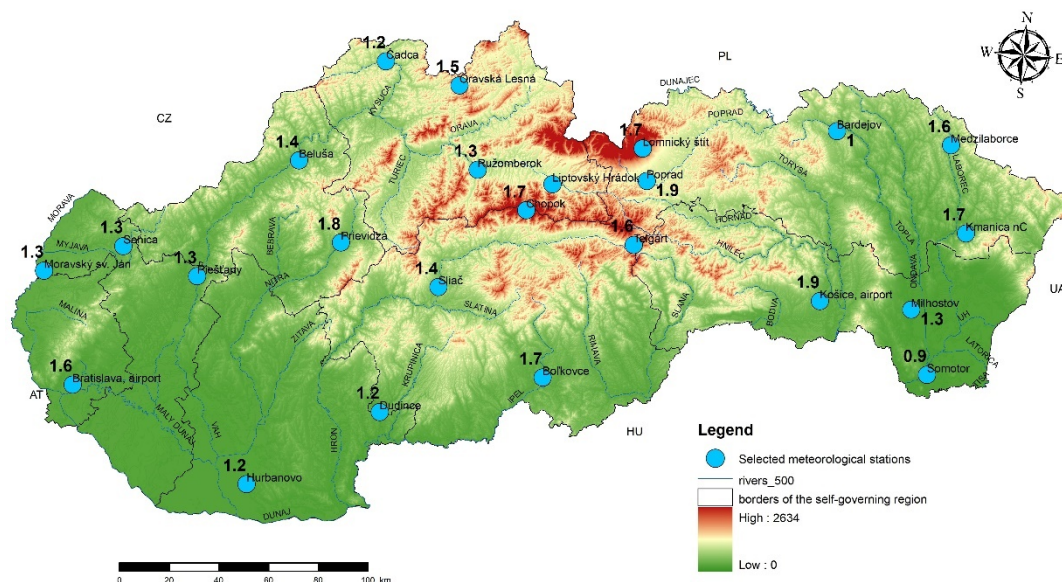


Figure 12.
Map processing
of average air
temperature
change (summer)
in the period
1991 – 2020.

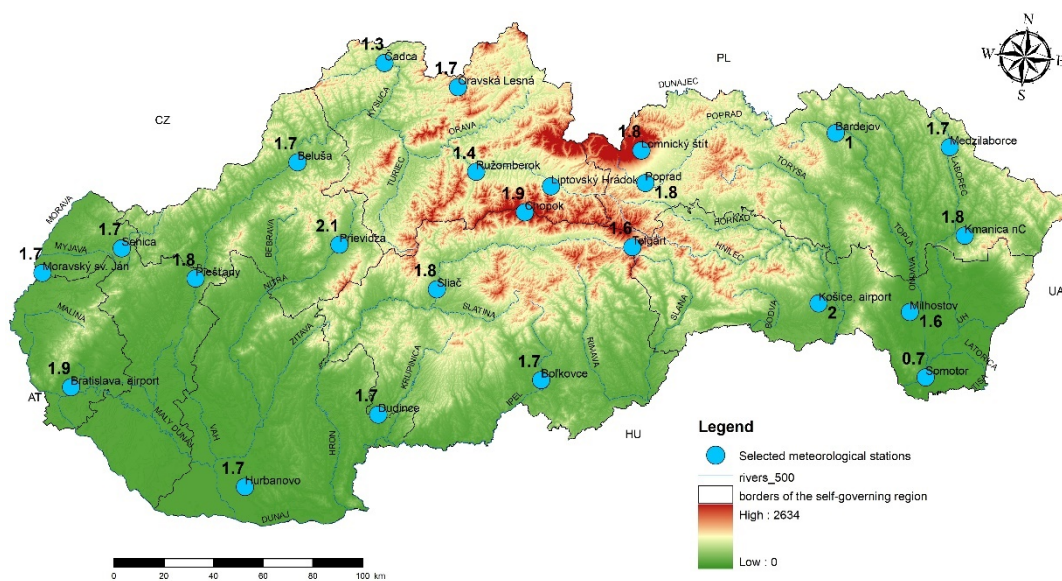


Figure 13.
Map processing
of average air
temperature
change (autumn)
in the period
1991 – 2020.

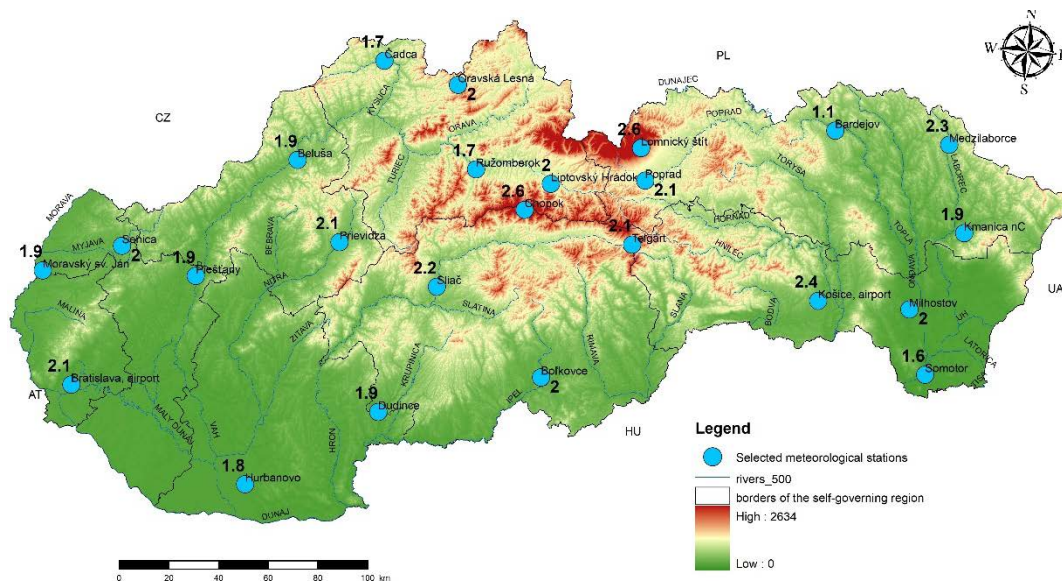
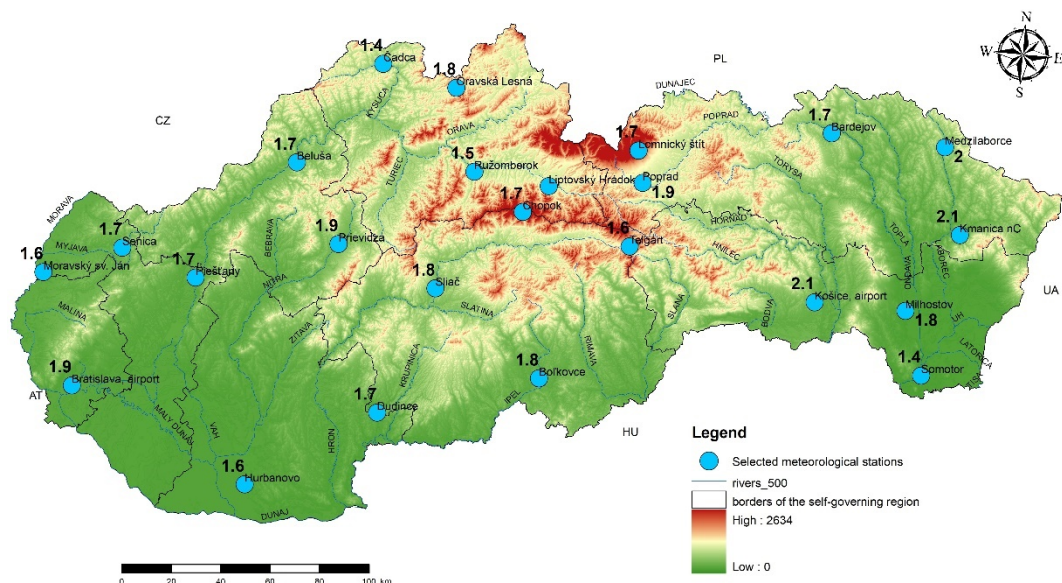


Figure 14.
Map processing
of average air
temperature
change (annual)
in the period
1991 – 2020.



In autumn (Fig. 13), we recorded an increase in the air temperature by $+2^{\circ}\text{C}$ on average, with a maximum of $+2.6^{\circ}\text{C}$ at both Chopok and Lomnický štít. In winter, we observed an average increase in air temperature of $+1.5^{\circ}\text{C}$ with a maximum in Kamenica nad Cirochou of $+2.5^{\circ}\text{C}$. In the **warm** half-year (April to September), we observed a very close to extremely close dependence expressed by the increase in air temperature in the period from 1991 to 2020 (correlation coefficient on average 0.598 and maximum 0.724). In the warm half-year, we recorded an average increase in air temperature of $+1.6^{\circ}\text{C}$ with a maximum of $+2^{\circ}\text{C}$ in Prievidza and Košice. In the **cold** half-year (October to March), we observed an extremely close dependence in the period from 1991 to 2020 (correlation coefficient on average 0.437 and maximum 0.519). The dependence is smaller than in the warm half-year, nevertheless extremely significant. In the cold half of the year, we observed an average increase in air temperature by $+1.9^{\circ}\text{C}$ with a maximum in the east of Slovakia in Košice, airport,

Medzilaborce and Kamenica nad Cirochou by $+2.3^{\circ}\text{C}$. In the **annual** values of the average air temperature, there was a significant dependence on the growth of the air temperature in the period 1991 to 2020, with an average value of the correlation coefficient of 0.664 and a maximum of 0.794 in the entire territory of Slovakia. In the annual values of the average air temperature (Fig. 14), we recorded an increase in air temperature on average by $+1.8^{\circ}\text{C}$ with a maximum of $+2.1^{\circ}\text{C}$ in Kamenica nad Cirochou.

Evaluation of the change in the number of frost days in the period 1991 – 2020

Changes in the number of frost days are observed especially when there are more days with (minimum) temperatures above 0°C , thus the number of frost days decreases (negative trend). This happens (from a selected number of meteorological stations sufficiently covering the territory of Slovakia) mainly in February, March and April. Also in the highest mountain locations in June and September respec-

tively (Tab. 3 and Tab. 4). With the increasing decrease in temperature, the most pronounced (understand at a significant number of stations) in October (on average a decrease of -4.9 frost days compared to the value from the period 1991 – 2020), in November (-6.6) and in December (-6.5).

During the annual seasons, we observed significant changes in spring with an average decrease of 9.2 days (calculated only from statistically significant decreases, see Tab. 4), respectively at mountain stations and in summer (Chopok -5.8 days and Lomnický štít -13.2 days). We observed a clear decrease (statistically significant) at all stations in autumn with an average decrease of -11.1 days. In the winter period (December to February), we recorded

a (statistically) significant decrease in Prievidza (-10.2 days), Oravská Lesná (-6.2 days), Liptovský Hrádok (-7.4 days), Sliač (-11.3 days), in Poprad (-5.5 days) and in the east of the country with an average decrease of up to -14.6 days. In the warm part of the year (April to September), we observed changes in the number of frost days on Chopok -19.1 days, in Boľkovce -4 days, on Lomnický štít up to -24.7 days and in Medzilaborce -11 days.

In the cold half-year (October to March), the average decrease was -24.6 days. In the annual frequency, we recorded an average decrease from all (selected) meteorological stations -28.2 days for the period 1991 – 2020.

Table 3. Statistically significant change in the number of frost days in the period 1991 – 2020.

Ind. (short)	Name	FEB	MAR	APR	JUN	SEP	OCT	NOV	DEC	spring	summer	autumn	winter	Wp	Cp	year
805	Senica						-4.4	-7.8	-7.4			-12.1		-22.4	-23.7	
816	Bratislava, airport						-4.1	-6.6	-7.7			-10.7		-20.4	-22.5	
826	Piešťany	-5.3					-4.1	-5.5	-7.4			-9.6		-22.5	-23.6	
835	Moravský sv. Ján											-7.6				
858	Hurbanovo						-3.5	-7.1	-6.5			-10.5		-19.5	-21.4	
862	Beluša						-4.5			-8.3		-8.9				-28.0
866	Čadca															
867	Prievidza	-6.2		-3.4			-5.3		-6.4	-6.5		-9.9		-25.1		
868	Oravská Lesná						-6.9	-7.6	-4.9			-16.0	-6.2	-24.6	-26.6	
872	Ružomberok											-7.9		-15.5		
874	Liptovský Hrádok	-3.2					-5.4		-5.1			-10.6	-7.4	-21.2	-25.9	
880	Dudince	-5.7					-5.3	-6.9	-5.8			-12.2		-24.2	-27.7	
903	Sliač	-6.1					-5.7	-7.3	-6.9			-13.1	-11.3	-29.0	-33.1	
916	Chopok		-0.8	-4.4	-3.5			-5.3	-0.8	-8.8	-5.8	-12.2		-19.1	-26.3	
927	Boľkovce			-3.8			-5.1			-6.7		-12.5		-4.0	-25.0	-30.7
930	Lomnický štít				-9.4	-7.7		-4.0			-13.2	-14.3		-24.7		-31.2
934	Poprad	-3.4	-3.9				-5.5		-2.7	-9.2		-11.8	-5.5	-21.4	-26.7	
938	Telgárt		-3.1				-5.3	-6.9		-7.0		-12.1		-17.8	-22.2	
962	Bardejov						-4.6		-7.5			-9.6		-21.2	-21.3	
968	Košice, airport	-6.7	-6.5	-2.9			-5.2	-6.5	-7.6	-9.3		-11.9	-13.1	-34.5	-36.5	
977	Medzilaborce	-6.0	-8.1	-7.7			-5.7	-8.2	-9.4	-17.8		-15.1	-16.9	-11.0	-40.0	-49.8
978	Milhostov	-6.9					-4.0		-7.3			-9.3	-13.8	-27.8	-29.0	
979	Somotor	-7.0					-3.5		-7.6			-9.6	-14.4	-29.5	-30.5	
993	Kamenica n/C	-5.1							-9.1			-6.9	-14.6	-25.4	-26.2	

Table 4. Coefficient of correlation (significance) of frost days in the period 1991 – 2020.

Ind. (short)	Name	FEB	MAR	APR	JUN	SEP	OCT	NOV	DEC	spring	summer	autumn	winter	Wp	Cp	year
805	Senica						0.404	0.420	0.385			0.542		0.364	0.443	
816	Bratislava, airport						0.438	0.365	0.387			0.496		0.346	0.389	
826	Piešťany	0.304					0.374	0.304	0.368			0.435		0.380	0.430	
835	Moravský sv. Ján											0.337				
858	Hurbanovo						0.351	0.394	0.314			0.482		0.335	0.371	
862	Beluša						0.412			0.341		0.392				0.488
866	Čadca															
867	Prievidza	0.332		0.335			0.444		0.350	0.318		0.435		0.432		
868	Oravská Lesná						0.413	0.382	0.530			0.583	0.302	0.577	0.542	
872	Ružomberok											0.356		0.304		
874	Liptovský Hrádok	0.320					0.399		0.432			0.454	0.330	0.475	0.549	
880	Dudince	0.344					0.417	0.370	0.304			0.515		0.442	0.500	
903	Sliač	0.411					0.466	0.374	0.387			0.553	0.332	0.517	0.595	
916	Chopok		0.332	0.310	0.342			0.470		0.307	0.366	0.430		0.613	0.754	
927	Boľkovce			0.322			0.425			0.305		0.530		0.324	0.447	0.539
930	Lomnický štít				0.524	0.357		0.500			0.494	0.458		0.563		0.615
934	Poprad	0.314	0.336				0.410		0.305	0.420		0.514		0.510	0.573	
938	Telgárt		0.336				0.352	0.357		0.303		0.514		0.455	0.507	
962	Bardejov						0.369		0.413			0.396		0.391	0.449	
968	Košice, airport	0.427	0.338	0.320			0.464	0.303	0.372	0.396		0.470	0.354	0.564	0.635	
977	Medzilaborce	0.392	0.435	0.474			0.393	0.398	0.507	0.577		0.564	0.437	0.552	0.600	0.714
978	Milhostov	0.406					0.349		0.354			0.373	0.339	0.459	0.566	
979	Somotor	0.421					0.351		0.380			0.416	0.364	0.511	0.645	
993	Kamenica n/C	0.307							0.459			0.297	0.370	0.440	0.538	

Table 5. Change in the number of ice days in the period 1991 – 2020.

Ind. (short)	Name	FEB	APR	AUG	SEP	NOV	DEC	spring	autumn	winter	Wp	Cp	year
805	Senica					-4.3							
816	Bratislava, airport					-2.3	-5.0	-2.3	-11.3		-14.2	-14.4	
826	Piešťany						-5.5					-9.0	
835	Moravský sv. Ján					-1.6	-6.2	-1.6	-9.4		-10.4	-11.5	
858	Hurbanovo					-1.1		-1.1			-8.4	-9.6	
862	Beluša					-1.0	-7.0	-1.0	-9.8		-11.0	-11.5	
866	Čadca					-2.9	-7.1	-2.8				-13.5	
867	Prievidza						-6.3		-9.5		-10.0	-11.0	
868	Oravská Lesná					-3.3	-8.9	-3.8			-16.4	-16.8	
872	Ružomberok					-2.7	-5.5	-2.7					
874	Liptovský Hrádok						-7.1					-14.3	
880	Dudince					-0.8		-0.8					
903	Sliač												
916	Chopok		-9.1			-10.9		-12.3	-13.2		-11.9	-15.5	-26.3
927	Boľkovce					-6.2						-9.9	
930	Lomnický štít		-9.4	-1.0	-3.9	-5.7	-3.5	-11.9	-12.0		-18.0	-9.2	-27.2
934	Poprad					-4.2	-8.3	-4.7			-18.6	-17.7	
938	Telgárt	-5.6				-6.4					-13.0	-13.9	
962	Bardejov					-2.0	-6.6	-2.0					
968	Košice, airport					-8.0						-13.0	
977	Medzilaborce					-2.4	-7.0	-2.4				-11.3	
978	Milhostov	-5.1				-6.9						-12.1	
979	Somotor					-8.0						-14.0	
993	Kamenica n/C					-1.8	-7.7	-1.8	-13.7		-14.9	-15.8	

Table 6. Coefficient of correlation (significance) of ice days in the period 1990 – 2020.

Ind. (short)	Name	FEB	APR	AUG	SEP	NOV	DEC	spring	autumn	winter	Wp	Cp	year
805	Senica						0.297						
816	Bratislava, airport					0.342	0.342		0.342	0.338	0.395	0.453	
826	Piešťany						0.343					0.296	
835	Moravský sv. Ján					0.343	0.394		0.343	0.300	0.320	0.424	
858	Hurbanovo					0.277			0.277		0.280	0.368	
862	Beluša					0.272	0.399		0.272	0.281	0.292	0.352	
866	Čadca					0.313	0.336		0.312			0.299	
867	Prievidza						0.367			0.323	0.330	0.405	
868	Oravská Lesná					0.275	0.425		0.340		0.287	0.337	
872	Ružomberok					0.413	0.289		0.413			0.366	
874	Liptovský Hrádok						0.342						
880	Dudince					0.336			0.336				
903	Sliač												
916	Chopok		0.549			0.593		0.581	0.531		0.597	0.345	0.543
927	Boľkovce					0.298						0.304	
930	Lomnický štít		0.532	0.454	0.269	0.369	0.336	0.430	0.396		0.544	0.269	0.595
934	Poprad					0.382	0.393		0.429		0.345	0.399	
938	Telgárt	0.275					0.340				0.274	0.318	
962	Bardejov					0.287	0.319		0.287				
968	Košice, airport						0.370					0.378	
977	Medzilaborce					0.371	0.310		0.371			0.334	
978	Milhostov	0.282					0.325					0.352	
979	Somotor						0.407					0.396	
993	Kamenica n/C					0.415	0.359		0.415	0.320	0.340	0.456	

Evaluation of the change in the number of ice days in the period 1991 – 2020

We observed statistically significant changes (decrease) in the number of ice days especially in November and December (Tab. 5 and Tab. 6). In high mountain locations, significant changes also occurred in April and in August or September. Average decrease in November –3.1 days, in December –6.6 days. In the summer months, the decrease at the highest altitudes (Chopok –9.1 days and Lomnický štít –9.4 days). In the spring, the decrease in the mountains (Chopok –12.3 days and Lomnický štít –11.9 days). Average fall in autumn –3.7 days at most selected meteo-

rological stations. In winter, the frequency of statistically significant changes is lower (average decrease –10.7 days). In the warm half-year, changes only in the mountains (Chopok –11.9 days and Lomnický štít –18 days). In the cold half of the year, the frequency is higher (average decrease –12.9 days). Significant change in annual frequency at most stations (average decrease in the number of ice days –14.3)

Evaluation of the change in the number of summer days in the period 1991 – 2020

The occurrence of summer days we connect to the warm part of the year, although their occurrence in March or October we cannot exclude. Statistically significant increase (Tab. 7 and Tab. 8) in the number of summer days was in **June** at almost all meteorological stations meeting the assumption of this characteristic, by an average of +7.3 days, with a maximum of +9.1 days in Prievidza with a correlation coefficient of 0.545. Statistically significant increase in the number of summer days in **July**, especially in the colder (mostly in north part) locations of Slovakia (Čadca, Oravská Lesná, Sliač, Poprad), with the exception of Somotor (south of eastern Slovakia), with an average increase of +5.4 to 5.7 days. In **August**, similar to July, statistically significant increase in the number of summer days in the colder locations of our country (Čadca, Oravská Lesná, Liptovský Hrádok) and also in the east of Slovakia (Milhostov, Somotor and Kamenica nad Cirochou) with an average increase of 6.6 days respectively in the east 5.6 days was recorded. In **September** (similarly

to June), statistically significant increase in the number of summer days at most weather stations, on average by +6.5 days with a maximum of +10.1 days in the east of the country in Somotor was recorded. Changes in the frequency of occurrence of summer days in the period 1991–2020 during the **summer** were significant at practically all meteorological stations (except Senica and Telgárt) with an average increase in the period of +15.5 summer days. In **autumn**, the situation repeated, but the changes in the number of summer days were smaller, an increase of +6.5 days on average. In the **warm half-year** (also considering the length of the period), the frequency of increase was even

Table 7. Change in the number of summer days in the period 1991 – 2020.

Ind. (short)	Name	JUN	JUL	AUG	SEP	summer	autumn	Wp	year
805	Senica	6.5						13.3	13.4
816	Bratislava, airport	7.8				13.2	5.4	19.7	20.3
826	Piešťany	8.7			5.4	13.1	5.6	17.0	17.2
835	Moravský sv. Ján	8.4				14.5		20.4	20.5
858	Hurbanovo	7.4			7.0	12.6	8.0	21.0	21.9
862	Beluša	8.9			6.4	15.5	6.7	24.6	24.9
866	Čadca	7.4	5.9	6.2	6.4	19.5	6.2	26.3	26.1
867	Prievidza	9.1			7.8	14.2	8.9	26.4	27.5
868	Oravská Lesná	4.4	5.5	7.1	3.4	17.1	3.3	21.1	21.1
872	Ružomberok								
874	Liptovský Hrádok	6.4	6.3	5.7	5.6	18.4	5.9	25.9	26.3
880	Dudince	8.9			7.3	15.2	7.4	23.9	24.0
903	Sliač	8.1	4.8		8.2	16.5	8.5	27.5	27.8
916	Chopok								
927	Boľkovce	8.8			8.0	16.2	8.1	27.2	27.3
930	Lomnický štít								
934	Poprad	4.4	6.0	7.3	3.3	17.7	3.4	21.5	21.6
938	Telgárt				1.2		1.2	8.4	8.4
962	Bardejov	7.7			6.3	16.6		24.2	24.1
968	Košice, airport	6.5			7.6	14.7	7.4	22.4	22.2
977	Medzilaborce	4.7			6.4	10.5	6.1	17.5	17.1
978	Milhostov	5.1		5.0	7.7	13.8	7.4	20.5	20.2
979	Somotor	8.9	4.1	6.5	10.1	19.4	10.0	33.2	33.2
993	Kamenica n/C	6.9		5.4	8.5	15.3	7.9	24.3	23.7

Table 8. Coefficient of correlation (significance) of summer days in the period 1991 – 2020.

Ind. (short)	Name	JUN	JUL	AUG	SEP	summer	autumn	Wp	year
805	Senica	0.376						0.300	0.302
816	Bratislava, airport	0.459				0.425	0.305	0.417	0.426
826	Piešťany	0.523			0.321	0.435	0.317	0.366	0.368
835	Moravský sv. Ján	0.503				0.516		0.437	0.435
858	Hurbanovo	0.494			0.343	0.502	0.353	0.464	0.457
862	Beluša	0.512			0.371	0.485	0.368	0.479	0.477
866	Čadca	0.448	0.310	0.328	0.563	0.532	0.554	0.551	0.548
867	Prievidza	0.545			0.434	0.501	0.455	0.530	0.533
868	Oravská Lesná	0.341	0.337	0.435	0.541	0.543	0.534	0.592	0.589
872	Ružomberok								
874	Liptovský Hrádok	0.423	0.318	0.297	0.533	0.499	0.563	0.596	0.598
880	Dudince	0.593			0.347	0.546	0.320	0.483	0.468
903	Sliač	0.519	0.296		0.466	0.531	0.454	0.548	0.548
916	Chopok								
927	Boľkovce	0.568			0.416	0.514	0.395	0.500	0.495
930	Lomnický štít								
934	Poprad	0.361	0.386	0.392	0.410	0.529	0.428	0.542	0.543
938	Telgárt				0.494		0.494	0.308	0.308
962	Bardejov	0.484			0.540	0.450		0.516	0.513
968	Košice, airport	0.431			0.459	0.444	0.433	0.446	0.436
977	Medzilaborce	0.320			0.456	0.362	0.440	0.413	0.404
978	Milhostov	0.375		0.324	0.437	0.458	0.412	0.443	0.434
979	Somotor	0.582	0.273	0.412	0.490	0.604	0.468	0.604	0.592
993	Kamenica n/C	0.440		0.318	0.505	0.486	0.484	0.503	0.493

Table 9. Change in the number of tropical days in the period 1991 – 2020.

Ind. (short)	Name	JUN	JUL	AUG	SEP	summer	autumn	Wp	year
805	Senica	4.3			2.0	11.2	2.0	13.6	13.6
816	Bratislava, airport	3.7			1.9	10.7	1.9	12.6	12.6
826	Piešťany	4.2			1.8	12.1	1.8	14.6	14.6
835	Moravský sv. Ján	3.8			1.9	9.4	1.9	11.4	11.4
858	Hurbanovo	4.1	6.5		3.2	12.6	3.2	15.9	15.9
862	Beluša	3.9	6.1		2.2	14.9	2.2	17.5	17.5
866	Čadca	2.1			0.6	8.8	0.6	9.6	9.6
867	Prievidza	4.9	6.5		2.2	17.0	2.2	20.2	20.2
868	Oravská Lesná	1.2				4.3		4.4	4.4
872	Ružomberok								
874	Liptovský Hrádok	3.2				9.5		9.6	9.6
880	Dudince	5.3	7.3		3.1	16.4	3.1	19.7	19.7
903	Sliač	5.8	6.1	5.6	1.8	0.2	1.8	20.3	20.3
916	Chopok								
927	Boľkovce	4.6	6.5		2.0	16.5	2.0	18.8	18.8
930	Lomnický štít								
934	Poprad								
938	Telgárt								
962	Bardejov	3.1				7.8		8.1	8.1
968	Košice, airport	3.5			1.8	9.4	1.8	11.4	11.4
977	Medzilaborce								
978	Milhostov	3.2		5.3	1.4	11.5	1.4	13.0	13.0
979	Somotor	5.7	4.8	8.1	2.5	18.5	2.5	22.2	22.2
993	Kamenica n/C	3.3			1.2	9.3	1.2	11.0	11.0

Table 10. Coefficient of correlation (significance) of tropical days in the period 1991 – 2020.

Ind. (short)	Name	JUN	JUL	AUG	SEP	summer	autumn	Wp	year
805	Senica	0.375			0.442	0.346	0.442	0.402	0.402
816	Bratislava, airport	0.336			0.420	0.298	0.420	0.336	0.336
826	Piešťany	0.397			0.429	0.359	0.429	0.409	0.409
835	Moravský sv. Ján	0.341			0.325	0.296	0.325	0.344	0.344
858	Hurbanovo	0.309	0.380		0.475	0.368	0.475	0.414	0.414
862	Beluša	0.353	0.338		0.489	0.439	0.489	0.488	0.488
866	Čadca	0.301			0.420	0.362	0.420	0.386	0.386
867	Prievidza	0.467	0.404		0.501	0.516	0.501	0.573	0.573
868	Oravská Lesná	0.324				0.312	0.311		0.311
872	Ružomberok								
874	Liptovský Hrádok	0.412				0.404		0.405	0.405
880	Dudince	0.381	0.398		0.475	0.436	0.475	0.479	0.479
903	Sliač	0.458	0.366	0.279	0.421	0.489	0.421	0.527	0.527
916	Chopok								
927	Boľkovce	0.390	0.391		0.441	0.479	0.441	0.498	0.498
930	Lomnický štít								
934	Poprad								
938	Telgárt								
962	Bardejov	0.372				0.333		0.335	0.335
968	Košice, airport	0.370			0.514	0.317	0.514	0.354	0.354
977	Medzilaborce								
978	Milhostov	0.329		0.275	0.309	0.382	0.309	0.381	0.381
979	Somotor	0.455	0.299	0.391	0.439	0.499	0.439	0.497	0.497
993	Kamenica n/C	0.375			0.359	0.324	0.359	0.346	0.346

higher (compared to summer or autumn) and statistically significant at all (relevant) meteorological stations with an average increase of +22.2 during the period 1991 – 2020. Changes (increase) in the **annual** frequency of occurrence of summer days, which primarily linked to the warm part of the year, and the results are similar to the summer half-year. However, even the rare frequency of occurrence outside the summer half-year caused the result to be different. The average change (increase) in the annual number of summer days was +22.3.

Evaluation of the change in the number of tropical days in the period 1991 – 2020

The occurrence of tropical days is associated with the warmest part of the year. We recorded a statistically significant increase in the number of tropical days in **June** (Tab. 9 and Tab. 10) at almost all meteorological stations meeting the assumption of this characteristic, by an average of +3.9 days, with a maximum of +5.8 days at Sliač with a correlation coefficient of 0.458. We observed a statistically significant increase in the number of summer days in **July**

at a smaller number of locations in Slovakia (Hurbanovo, Beluša, Prievidza, Dudince, Sliač, Boľkovce and Somotor) with an average increase of +6.2 and a maximum of +7.3 days in Dudince. In **August**, we recorded a statistically significant increase in the number of tropical days at Sliač and in the east of Slovakia. In **September** (similarly to June), we observed a statistically significant increase in the number of tropical days at most weather stations, on average by +2.0 days with a maximum of +3.2 days in the southwest of the country in Hurbanovo. Changes in the frequency of occurrence of summer days in the period 1991–2020 during the **summer** were significant at practically all meteorological stations (except higher meteorological stations) with an average increase in the period of +11.1 tropical days. In **autumn**, the situation repeated, but the changes in the number of summer days were smaller, an increase of +2.0 days on average. In the **warm half-year** (also considering the length of the period), the frequency of increase was even higher (compared to summer or autumn) and statistically significant at all (relevant) meteorological stations with an average increase of +14.1 days during the period 1991–2020. Changes (increase) in the **annual** frequency of occurrence of tropical days corresponded to the warm half-year.

CONCLUSION

Decadal processing as well as processing according to altitude showed us the need to restore long-term averages of various characteristics (here air temperature) for the various needs of the national economy, tourism, etc. We pointed out the fact of almost an increase in air temperature in recent decades as well as significant differences corresponding altitudes in different normal periods.

The above results have shown that the analyzed temperature characteristics of the Slovak Republic have changed positively during the observed period 1991–2020 compared to the periods 1981–2010 or 1961–1990. If we take into account the average monthly air temperatures, then the most significant increases in the **average monthly air temperature** we see in the summer months.

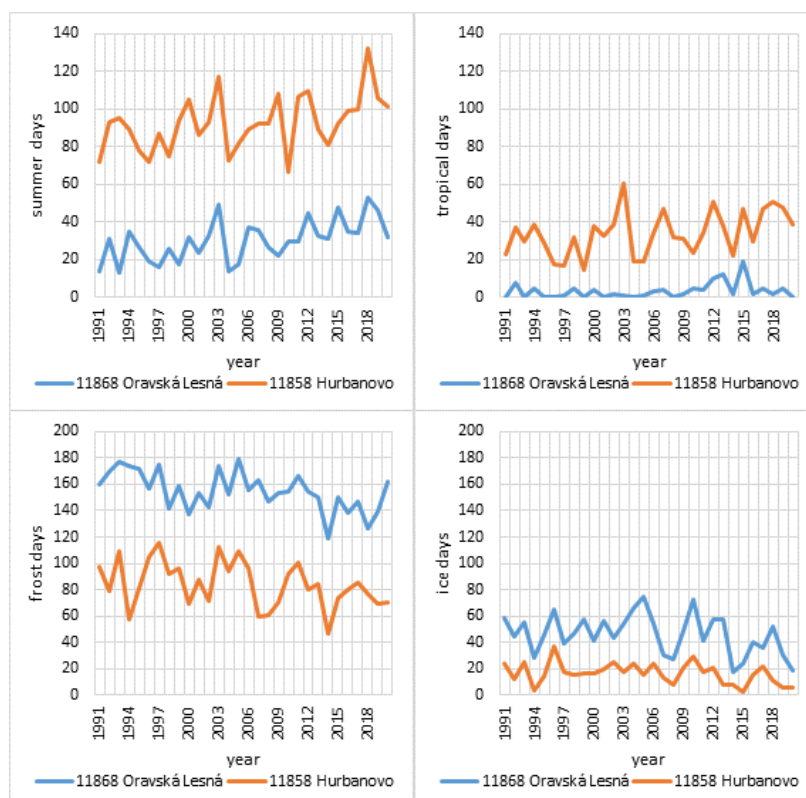
An increase in air temperature is evident in every month of the year except January and May in the period 1991–2020. On average for Slovakia, the highest air temperature increases are observed in February (+2.3 °C), April (+2.5 °C), June (+2.3 °C), November (+2.7 °C) and in December (+3.1 °C). In seasonal values, there is an increase everywhere (spring +1.5 °C, summer +1.7 °C, autumn +2.0 °C (maximum) and winter +1.5 °C). The cold half-year warms up more significantly

than the warm half-year. The warming of the annual air temperature for Slovakia represents a value of +1.8 °C. As such, the good news in the adverse development of air temperatures is that in the highest locations of the Tatras in the winter months (December, January, February), the changes are the lowest (even negative in January). At the same time, however, the correlation coefficients in the winter months for these locations (as well as many others especially in January and February) are statistically below the threshold of significance. Peculiarities in the variability as well as in the explicitness of the trend or the differences of locations in the south and north of Slovakia see in Fig. 15.

We observed a statistically significant change in the number of **frost days** in the period 1991–2020 in February to April, in more remote locations also in June and July and then in September. October to December turned out to be the most numerous (also statistically significant). In the seasonal evaluation, autumn occurred the most, but in some localities also winter (more significant in the east of Slovakia). In the warm half-year, especially the mountainous and cold regions of Slovakia. In the cold half-year, there was a (statistically significant) decrease in the number of frost days in almost all locations in Slovakia. In the annual frequency, we recorded a decrease in the number of frosty days by an average of 27 days.

The most significant decrease in the number of **ice** days in the period 1991–2020 is observed mainly at the end of autumn (November, decrease of –3.1 days) and even more significantly at the beginning of winter (December, decrease of –6.6 days). In the highest mountain locations, we note

Figure 15. Number of summer, tropical, frost and ice days in different locations in the period 1991–2020.



a decrease even earlier (in April –9.4 days, in August –1 day, in September –3.9 days). In the annual frequency, the changes are the biggest, namely a decrease (decrease) of ice days up to –14.3 days on average. We recorded the highest decrease in ice days up to –27.2 at Lomnický štít.

We expected that with the increase in air temperature, the number of summer days would also increase. However, it was not clear where the number of days statistically significantly increase the most, i.e. how the significant changes in the warm part of the year are distributed. Statistical evaluation confirmed that despite the fact that we observe an increase in the number in almost all months (April – September in the period 1991 – 2020) we observe a statistically significant increase precisely at the beginning and end of the warm part of the year.

Changes (increase) in the number of **tropical** days are mainly concentrated in the beginning of summer (June) and then in the beginning of spring (September) in the period 1991 – 2020. We also observe changes in some stations (especially those located further south (except for stations that may have slightly changed their position to a warmer position) in July. In the seasons, the biggest changes are quite logically recorded in summer (11.1 days on average) and smaller in autumn (2 days on average). Due to the fact, that tropical days occur mainly in the warm half of the year, changes in frequency for the period 1991 – 2020 are identical to changes in annual frequency and reach an increase of 14 days on average.

REFERENCES

- Petrovič at al., *Klimatické a fenologické pomery Západoslávského kraja*, HMÚ, Praha 1968 (*Climatic and phenological conditions of the West Slovak Region*, HMÚ, Prague 1968).
- WMO-No. 1203, *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals* (2017), SBN 978-92-63-11203-3. WMO-No. 100: *Guide to Climatological Practices*, Geneva (2018), ISBN 978-92-63-10100-6.
- Nosek, M., *Metódy v klimatológii*, SAV Praha 1972, ISBN 509-21-875.
- Szentimrey, T., 2017, *Manual of homogenization software MASHv3.03*, Hungarian Meteorological Service, p.71.
- Szentimrey, T., 2021, *Mathematical questions of homogenization and summary of MASH*, *Proceedings of the 10th Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases and 5th Conference on Spatial Interpolation Techniques in Climatology and Meteorology* (Ed. Lakatos M., Hoffmann L., Kirsi A., Szentimrey T.), Budapest, Hungary, 2020, WCDMP-No. 86, 4 – 17.
- Szentimrey, T., 2013, *Theoretical questions of daily data homogenization and daily benchmark results for MASH*, *Proceedings of the Seventh Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases jointly organized with the Meeting of COST ES0601 (HOME) Action MC Meeting*, Budapest, Hungary, 2011; WCDMP[1] No. 78, 2013, 37 – 47.

NOČNÁ MINIMÁLNA TEPLOTA VZDUCHU AKO KLIMATOLOGICKÝ INDIKÁTOR: NIEKTORÉ TEPLTNÉ ASPEKTY NOCÍ NA ZÁPADNOM SLOVENSKU

DALIBOR VÝBERČI¹, JOZEF PECHO^{2,3}, PAVOL FAŠKO², MILAN ONDERKA^{4,2}

¹ 941 62 Kmeťovo, daliborvyberci@protonmail.com

² Slovenský hydrometeorologický ústav, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava

³ Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie, Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave, Mlynská dolina F1, 842 48 Bratislava

⁴ Ústav vied o Zemi Slovenskej akadémie vied, Dúbravská cesta 9, 840 05 Bratislava

This study serves as an overview of the basic concepts of climatological assessment, brought in with use of nighttime minimum air temperature – a specific, rarely used characteristic with a sufficiently long tradition of evidence in Slovakia. According to the obtained initial outcomes, several specifics of nights within our country are demonstrated. In some calendar months, the warming of nights manifested itself differently than it is commonly documented using all-day temperature averages. Although the majority of results speak in favour of more marked increase in daily temperature maxima, nighttime minima may be locally increasing at a higher pace. Particularly strikingly expressed trends in the occurrence of longer periods of very warm nights were confirmed. In addition, there is a signal that after 1990, the overwhelming majority of the nighttime temperature stress induced since the end of the Second World War may have been accumulated.

Táto štúdia predstavuje prehľad základných konceptov klimatologického spracovania, ktoré so sebou prináša nočná minimálna teplota vzduchu – na Slovensku zriedkavo používaná špecifická teplotná charakteristika s dostatočne dlhou tradíciou evidencie. Na základe nadobudnutých iniciálnych analytických výstupov sa preukazuje niekoľko zaujímavých zvláštností nocí v rámci územia našej krajiny. V niektorých kalendárnych mesiacoch sa otepľovanie nocí prejavilo odlišne, než je dokumentované bežne na základe celodenných priemerov teplôt. Hoci výsledky pre väčšinu staníc hovoria v prospech výraznejšieho rastu denných teplotných maxím, lokálne sa u nás v rýchlejšom tempe môžu zvyšovať nočné minimá. Potvrdzujú sa obzvlášť nápadne vyjadrené trendy vo výskyte súvislých dlhších období veľmi teplých nocí, a popritom sa objavuje signál, že v období po roku 1990 sa mohla nahromadiť nesmierne veľká časť nočného teplotného stresu, vyindukovaného od konca druhej svetovej vojny.

Key words: nighttime minimum temperature, nighttime warming, nighttime warm spells, climate change, Western Slovakia, Hurbanovo

ÚVOD

V programe klimatologických pozorovaní na meteorologických staniách na Slovensku (obdobne aj v Česku), a teda v rámci príslušnej evidencie z nich, je časový úsek medzi večerným (o 21. h stredného miestneho slnečného času [SMČ]) a ranným (o 7. h SMČ) klimatologickým termínom pozorovaní považovaný za nočný (nokturnálny) čas, t. j. „(klimatologickú) noc“ (Slabá, 1976; Sobíšek, 1993). Nočná minimálna teplota vzduchu, čiže najnižšia dosiahnutá hodnota teploty vo výške 2 m nad zemským povrchom od večerného do ranného termínu merania vrátane, je v odbornej sfére popri prízemnej minimálnej teplote vzduchu asi najčastejšie, hoci stále pomerne ojedinele využívanou nočnou charakteristikou.

Zaznamenávanie nočnej minimálnej teploty vzduchu nie je medzinárodne obligatórnym, no v (česko)slovenskej praxi má dlhú tradíciu. Štandardizovaná evidencia tejto charakteristiky sa na niektorých najvýznamnejších staniách vyššieho rádu (profesionálnych, synoptických, leteckých, vojenských) objavuje už počas medzivojnového obdobia 1. Československej republiky v staničných denných záznamníkoch (tzv. veľkých denníkoch). Postupne sa príslušná denníková evidencia rozšírila prakticky na všetky stanice

uvedeného druhu. Od roku 1971 bola nočná minimálna teplota začlenená aj do mesačných výkazov meteorologických pozorovaní, súc tam vykazovaná ako minimálna teplota o 7. h SMČ, a takto evidovaná už celosieťovo zo všetkých klimatologických staníc. V súčasnosti v prípade staníc, na ktorých je zabezpečované už iba automatické meranie teploty, sa nočná minimálna teplota v klimatologickej evidencii už špecificky nenachádza, avšak možno ju náležite určiť z dostupných podrobných (minútových) údajov z týchto staníc. Dodajme, že nočnú minimálnu teplotu nachádzame aj medzi operatívnymi údajmi v národnom spravodajstve INTER (denné spravodajstvo z klimatologických pozorovaní) existujúcom asi od polovice 20. storočia. Počet tzv. interových staníc sa v priebehu času postupne zvyšoval, a to aj o dobrovoľnícke klimatologické stanice, avšak po komplexnej automatizácii dobrovoľníckych staníc sa znovu zredukoval na stanice, na ktorých je naďalej zachované aj analógové meranie, čo sú momentálne takmer výlučne len profesionálne (synoptické) stanice.

V jednotlivých primárnych údajových zdrojoch sa nočná minimálna teplota vzduchu vyskytuje pod rôznymi skratkami, napr. T_{min7} , T_{min_noc} , alebo T_{nn} . Definitívne hodnoty charakteristiky sú obsiahnuté v meteorologických

výkazoch, resp. denníkoch. V digitálnej forme sa údaje o nočnej minimálnej teplote dlhodobo a systematicky nevidia ako riadna, revízií podliehajúca súčasť ústrednej klimatologickej databázy Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ; viď aj Krška a Racko, 1993). Dohľadateľné údaje v elektronickej podobe v doplnkovej evidencii zo spravodajstva INTER (od roku 1998) majú, ako sme už spomenuli, len charakter operatívnych údajov.

Význam nočnej teploty spočíva predovšetkým v umocňovaní tepelnej záťaže na organizmus človeka pri výskyte nocí s veľmi vysokými, u nás typicky tropickými minimami, teda v najteplejšej časti roka. Takouto nocou zapríčinené obmedzenie regeneračnej schopnosti ľudského tela bežne vedie k prerušovaniu a skracovaniu spánku, až nespavosti a v najzávažnejších prípadoch vyúsťuje až v letálne dôsledky, pričom v súčasnej rýchlo sa otepľujúcej klíme sa tieto riziká amplifikujú (napr. Obradovich a kol., 2017; Royé a kol., 2021; Minor a kol., 2022; Altena a kol., 2023; Rippstein a kol., 2023). V biometeorologickom kontexte navyše nové dôležité skutočnosti nedávno publikovali Hass a kol. (2022), podľa zistení ktorých najvyššie hodnoty teplôt a komplexných tepelných charakteristík (indexov), ktoré ľudia reálne zažívajú (zohľadňujúc ich aktivitu v priebehu dňa), sú vo všeobecnosti často pozorované neskôr večer, zatiaľ čo najnižšie sa bežne vyskytujú nie v noci, ale v priebehu dennej doby. Vaghefi a kol. (2022) vo svojich výstupoch dokumentujú, že s ohľadom na budúci vývoj podmienok by mali byť prioritizované adaptačné mechanizmy zamerané na zvýšenie toleranciu práve voči nočným teplotám.

Napriek kľúčovému potenciálnemu uplatneniu v oblasti ľudskej biometeorológie má nočná minimálna teplota vzduchu svoje opodstatnené miesto v odbornej sfére aj v tradičnej klimatológii. Na Slovensku bola táto teplotná charakteristika zatiaľ využitá v hodnoteniach tzv. letných a tropických nocí (Lapin a kol., 2016; Babin a kol., 2021). Nočná minimálna teplota ale tiež poskytuje vhodnú možnosť na analýzu efektu nočného otepľovania, optimálne aj s jeho následným porovnaním s otepľovaním dennej doby, a teda stanovení ich čiastkového podielu na celkovom oteplení klímy (koncept diurnálnej asymetrie otepľovania; napr. Davy a kol., 2017). Súvisiacim námetom môže byť hodnotenie nočných, resp. združených nočno-denných teplých vln, keďže v dosiaľ publikovanej literatúre nesporne prevláda, ba až dominuje denný typ teplých vln, resp. vln horúčav, analyzovaných na základe teplotných maxím. Napríklad Wu a kol. (2023) však najnovšie upozorňujú na výraznejší nárast frekvencie a zastúpenia v priebehu roka práve pri nočných a kombinovaných teplých vlnách v porovnaní s dennými. Tomu by mohlo zodpovedať aj obzvlášť nápadné pribúdanie súvislých periód tropických nocí, ktoré sme konštatovali v našej prvej štúdii s využitím nočnej minimálnej teploty (Babin a kol., 2021).

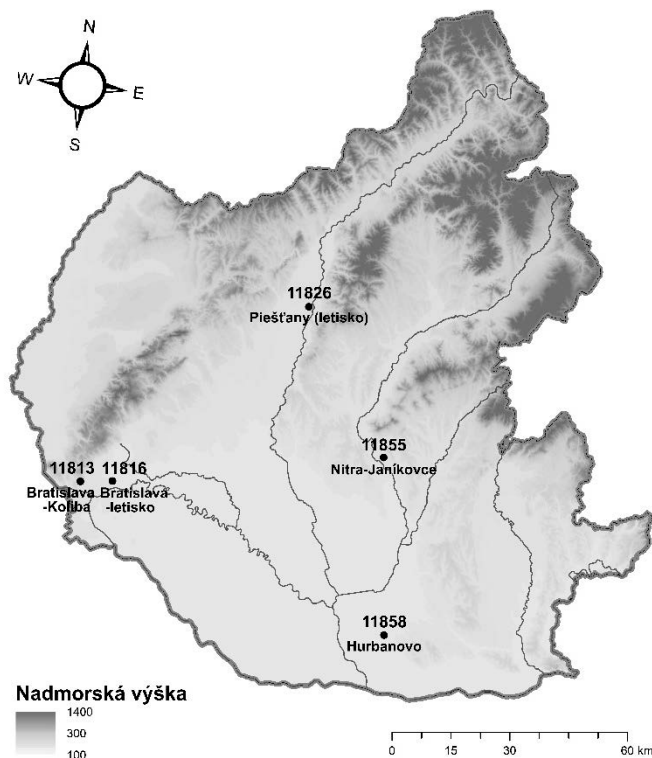
V tomto príspevku sa z perspektívy tradičnej klimatológie zameriavame na spomenuté teplotné aspekty nocí podľa nočnej minimálnej teploty vzduchu vo výberovom súbore piatich popredných klimatologických staníc v oblasti západného Slovenska. Jednotlivé sledované aspekty postupne uvádzame a vyhodnocujeme v metodickej, resp. výsledkovej časti práce. Štúdia je zároveň akýmsi predstavením príležitostí, ktoré charakteristika „nočná minimálna teplota vzduchu“ ponúka; tento prístup a konkrétne spracované témy na Slovensku doposiaľ v odborných publikáciách absentovali.

POUŽITÝ MATERIÁL A METODIKA SPRACOVANIA

Pre analytickú časť práce boli spracované údaje o teplote vzduchu z klimatologických meraní na piatich profesionálnych meteorologických staniách SHMÚ (Obr. 1): z Hurbanova za obdobie rokov 1946–marec 2023, z Bratislavy-Kolíby, Bratislavy-letiska a Piešťan (letisko) za obdobie 1971–2020 a z Nitry-Janíkoviec za obdobie 1982–2020. Na všetkých týchto staniách je dlhodobo až do súčasnosti klimatologické meranie realizované tradičným/konvenčným spôsobom na analógových teplomeroch v meteorologickej búde, ktoré tak aj po automatizácii má v kontexte príslušnej evidencie prednosť pred automatickým meraním. Časové rady zo všetkých uvedených staníc spĺňajú prísnejšie kritéria homogenity a kompletnosti príslušných údajov.

Obrázok 1. Poloha záujmových klimatologických staníc v rámci oblasti západného Slovenska. Číslo predstavuje staničný indikatív WMO.

Figure 1. Location of used climatological stations within the territory of Western Slovakia. WMO stations identifiers are indicated.



Primárnu analyzovanú meteorologickú charakteristiku predstavovala nočná minimálna teplota vzduchu (jej bližší popis je v úvodnej kapitole). Formálne poznamenávame, že nočná minimálna teplota priradená dňu d v oficiálnej evidencii označuje minimum dosiahnuté v noci medzi večerným termínom predchádzajúceho kalendárneho dňa $d-1$ a daného dňa d , teda napr. nočná minimálna teplota pre 15. júl je nameraná v noci zo 14. na 15. júla. Zo zásady vždy platí, že hodnota nočnej minimálnej teploty nemôže byť vyššia ako okamžitá suchá teplota v priliehajúcom večernom klimatologickom termíne merania (o 21. h SMČ; začiatok noci), nemôže byť vyššia ako okamžitá suchá teplota v priliehajúcom rannom klimatologickom termíne (o 7. h SMČ; koniec noci), a súčasne nemôže byť nižšia ako minimálna celodenná teplota vzduchu.

Údaje o nočnej minimálnej teplote vzduchu boli prevzaté/zdigitalizované zo štandardných mesačných meteorologických výkazov (k dispozícii od roku 1971), prípadne aj z meteorologických denníkov (spred roku 1971) v archíve SHMÚ v Bratislave-Kolibe a v staničnom archíve meteorologického observatória SHMÚ v Hurbanove. Všetky hodnoty boli skontrolované a prípadné sporné hodnoty boli expertne posudzované a ustálené; celý tento proces bol realizovaný s využitím, resp. za pomoci termínových hodnôt teploty vzduchu vo večernom a rannom klimatologickom termíne, minimálnej celodennej teploty vzduchu, prízemnej minimálnej teploty vzduchu, operatívnych údajov o nočnej minimálnej teplote zo spravodajstva INTER, vyčíslení termografických pásovk, paralelných údajov z automatického merania, denníkových údajov, a/alebo operatívnych údajov o minimálnej teplote z medzinárodného spravodajstva SYNOP.

Analytické spracovanie iných údajov okrem nočnej minimálnej teploty vzduchu bolo uskutočnené so zreteľom na konkrétny hodnotený aspekt, vid' nasledujúci metodický popis jednotlivých čiastkových analýz.

Trendová analýza nočnej minimálnej teploty vzduchu a analýza efektu nočného otepľovania

Z denných hodnôt nočnej minimálnej teploty vzduchu boli štandardizovaným postupom vypočítané mesačné, a následne z nich sezónne a ročné priemery. Rovnakým spôsobom boli pre potreby komparatívneho hodnotenia spracované priemery ďalších teplotných meteorologických charakteristík: večernej termínovej teploty vzduchu, rannej termínovej teploty vzduchu, maximálnej (celo)dennej teploty vzduchu a minimálnej (celo)dennej teploty vzduchu.

V prípade večernej termínovej teploty vzduchu, ktorá je údajom na rozhraní dvoch klimatologických dní ako celkov (špecifickejšie dennej doby „starého“ dňa a noci nového dňa), bol údaj vzhľadom k zameraniu práce hodnotený v kontexte noci; preto údaj z večerného klimatologického termínu posledného kalendárneho dňa v mesiaci bol analyzovaný ako už náležiaci prvému dňu nového mesiaca.

Dlhodobý vývoj ročných priemerov nočnej minimálnej teploty vzduchu a uvedených porovnávaných charakteristík bol vyhodnotený pre všetkých päť záujmových staníc, v prípade jednotlivých sezón a mesiacov bola analýza

uskutočnená pre najdlhší pripravený časový rad z meteorologického observatória Hurbanovo.

Analýza nočných teplých vln

Nočné teplé vlny boli identifikované ako sled silne nadnormálnych hodnôt nočnej minimálnej teploty vzduchu. Analogicky k našej skoršej súbornej práci s príbuznou tematikou (Výberčí a kol., 2018b) bola za nočnú teplú vlnu považovaná séria aspoň 5 za sebou idúcich dní s kladnou odchýlkou nočnej minimálnej teploty od hodnoty 90. percentilu jej empirickej distribúcie pre daný deň v roku z obdobia 1961–1990, pričom hodnoty denných percentilov boli zhladené 5-dňovými centrovanými klzavými priermi. Referenčné normálové obdobie 1961–1990 bolo zvolené v súlade s príslušnou smernicou Svetovej meteorologickej organizácie (WMO, 2017), nakoľko predmetom hodnotenia bol dlhodobý vývoj klimatických podmienok s poukázaním na potenciálne prejavy klimatickej zmeny.

Nočné teplé vlny boli identifikované v rámci celého roka (január až december). Hodnotené bolo a) trvanie vln; b) intenzita vln – určená veľkosťou denných odchýlok nad prahovou hodnotou, dosiahnutie ktorej je potrebné na klasifikáciu vlny podľa uvedenej definície; c) (meteorologická) závažnosť vln – kombinovaný ukazovateľ trvania a priemernej intenzity každej vlny, t.j. jej sumárna intenzita.

Táto analýza bola uskutočnená pre najdlhší pripravený časový rad z meteorologického observatória Hurbanovo, zahrňujúci celé uvedené normálové obdobie.

VÝSLEDKY

Trendy nočnej minimálnej teploty vzduchu a nočné otepľovanie

Spomedzi päťice analyzovaných lokalít bolo najväčšie tempo zvyšovania ročných priemerov nočnej minimálnej teploty vzduchu zaznamenané na bratislavskom letisku (0,44 °C/10 rokov) a len nepatrne nižšie v Bratislave-Kolibe a Nitre-Janíkovciach. V Piešťanoch bola zistená rýchlosť nárastu o čosi menšia, stále však štatisticky veľmi významná až na hladine významnosti 99,9 % (Tab. 1).

Večerná termínová teplota vzduchu na začiatku noci dlhodobo vzrástla v zásade v podobnej miere než ranná na konci noci na všetkých sledovaných staniaciach s výnimkou Nitry-Janíkoviec, kde bolo zaregistrované nápadnejšie tempo rastu teploty v rannom termíne v porovnaní s večerným.

Ak porovnáme dlhodobý vývoj hodnôt nočnej minimálnej teploty vzduchu s celodennými teplotnými minimami, na každej zo staníc bol rozdiel v tempách príslušných rastúcich trendov v podstate zanedbateľný.

Zaujímavejšia je komparácia tendencie rastu nočných teplotných miním a maximálnej dennej teploty vzduchu. Na štyroch z piatich staníc sa maximá v priebehu času zvýšili vo vyššom až výrazne vyššom tempe; najmarkantnejšie v Piešťanoch a Nitre-Janíkovciach. Na poslednej hodnotenej stanici Bratislava-letisko však bola situácia celkom opačná a výraznejšie tam vzrástli nočné minimá, pričom v nápadne väčšej miere v porovnaní s dennými maximami.

Tabuľka 1. Hodnoty vybraných štatistických ukazovateľov lineárnej regresnej analýzy ročných priemerov vybraných charakteristík teploty vzduchu.

Table 1. Values of selected statistical parameters from the linear regression analysis of selected air temperature characteristics' yearly averages. The characteristics in columns from left: nighttime minimum temperature, evening temperature at the climatological measurement at 21 hrs local mean solar time [LMT], morning temperature at the climatological measurement at 7 hrs LMT, all-day minimum temperature, daily (all-day) maximum temperature.

stanica	obdobie	nočná minimálna teplota	večerná teplota o 21. h SMČ	ranná teplota o 7. h SMČ	minimálna (celo)denná teplota	maximálna denná teplota
Hurbanovo	1946 – 2022	0,0263 °C/rok intercept: 4,93 °C R ² = 0,4681 p < 0,001	0,0260 °C/rok intercept: 8,50 °C R ² = 0,4192 p < 0,001	0,0232 °C/rok intercept: 7,23 °C R ² = 0,3951 p < 0,001	0,0265 °C/rok intercept: 4,64 °C R ² = 0,4769 p < 0,001	0,0297 °C/rok intercept: 14,69 °C R ² = 0,4000 p < 0,001
Hurbanovo	1971 – 2020	0,0376 °C/rok intercept: 5,28 °C R ² = 0,4643 p < 0,001	0,0438 °C/rok intercept: 8,62 °C R ² = 0,5009 p < 0,001	0,0414 °C/rok intercept: 7,27 °C R ² = 0,516 p < 0,001	0,0371 °C/rok intercept: 5,02 °C R ² = 0,4658 p < 0,001	0,0528 °C/rok intercept: 14,71 °C R ² = 0,5202 p < 0,001
Bratislava-Koliba	1971 – 2020	0,0405 °C/rok intercept: 5,72 °C R ² = 0,5315 p < 0,001	0,0429 °C/rok intercept: 8,58 °C R ² = 0,4996 p < 0,001	0,0419 °C/rok intercept: 7,00 °C R ² = 0,5090 p < 0,001	0,0407 °C/rok intercept: 5,46 °C R ² = 0,5458 p < 0,001	0,0510 °C/rok intercept: 13,40 °C R ² = 0,4798 p < 0,001
Bratislava-letisko	1971 – 2020	0,0445 °C/rok intercept: 5,30 °C R ² = 0,6073 p < 0,001	0,0565 °C/rok intercept: 8,41 °C R ² = 0,6670 p < 0,001	0,0555 °C/rok intercept: 7,06 °C R ² = 0,6588 p < 0,001	0,0445 °C/rok intercept: 5,04 °C R ² = 0,5896 p < 0,001	0,0377 °C/rok intercept: 14,59 °C R ² = 0,3269 p < 0,001
Piešťany	1971 – 2020	0,0277 °C/rok intercept: 4,69 °C R ² = 0,3056 p < 0,001	0,0404 °C/rok intercept: 8,03 °C R ² = 0,4594 p < 0,001	0,0445 °C/rok intercept: 6,33 °C R ² = 0,5136 p < 0,001	0,0268 °C/rok intercept: 4,36 °C R ² = 0,2898 p < 0,001	0,0469 °C/rok intercept: 13,84 °C R ² = 0,4597 p < 0,001
Nitra-Janíkovce	1982 – 2020	0,0404 °C/rok intercept: 4,94 °C R ² = 0,4061 p < 0,001	0,0524 °C/rok intercept: 8,46 °C R ² = 0,4982 p < 0,001	0,0628 °C/rok intercept: 7,04 °C R ² = 0,6158 p < 0,001	0,0425 °C/rok intercept: 4,59 °C R ² = 0,4173 p < 0,001	0,0605 °C/rok intercept: 14,41 °C R ² = 0,4631 p < 0,001

Tabuľka 2. Hodnoty vybraných štatistických ukazovateľov lineárnej regresnej analýzy mesačných priemerov nočnej minimálnej teploty vzduchu v Hurbanove za obdobie 1946 – 2022.

Table 2. Values of selected statistical parameters from the linear regression analysis of nighttime minimum temperature monthly averages in Hurbanovo, 1946 – 2022.

ukazovateľ	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
°C/rok	0,0397	0,0383	0,0206	0,0121	0,0206	0,0305	0,0324	0,0398	0,0192	0,0323	0,0135	0,0167
intercept [°C]	-4,99	-3,67	0,27	5,01	9,26	12,22	13,52	12,76	9,90	4,86	2,05	-2,00
R ²	0,0999	0,0721	0,0611	0,0327	0,1138	0,2614	0,3110	0,4375	0,1021	0,1508	0,0235	0,0296
p	< 0,01	< 0,05	< 0,05	0,1155	< 0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,01	< 0,001	0,1829	0,1346

Tabuľka 3. Hodnoty vybraných štatistických ukazovateľov lineárnej regresnej analýzy sezónnych priemerov nočnej minimálnej teploty vzduchu v Hurbanove za obdobie 1946 – 2022 (pre zimu a chladný polrok 1946/1947 – 2022/2023).

Table 3. Values of selected statistical parameters from the linear regression analysis of nighttime minimum temperature seasonal averages in Hurbanovo, 1946 – 2022 (for winter and cold halfyear: 1946/1947 – 2022/2023).

ukazovateľ	jar III–V	leto VI–VIII	jeseň IX–XI	zima XII–II	teplý polrok IV–IX	chladný polrok X–III
°C/rok	0,0179	0,0344	0,0219	0,0332	0,0257	0,0282
intercept [°C]	4,84	12,83	5,59	-3,58	10,45	-0,61
R ²	0,1619	0,5380	0,1718	0,1431	0,4805	0,2384
p	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Na základe mesačných priemerov zo 77 rokov dlhého časového radu z Hurbanova dochádza k najmarkantnejšiemu zvyšovaniu nočnej minimálnej teploty v januári a februári, v letných mesiacoch a októbri (Tab. 2). V januári a auguste bolo tempo otepľovania spomedzi individuálnych kalendárnych mesiacov najvyššie: 0,40 °C/10 rokov. Menej výrazne, ale štatisticky významne na hladine aspoň 95 %, sa z pohľadu nočných miním oteplili marec, máj a september.

Naopak, v apríli, novembri a decembri je rastúci trend najmenej výrazný a štatisticky nevýznamný.

Sezónne priemery nočnej minimálnej teploty vzduchu sa v prípade analyzovaného hurbanovského radu zvýšili vo všetkých hodnotených častiach roka so štatistickou významnosťou na hladine 99,9 % (Tab. 3). Najrýchlejší trend bol pritom zaznamenaný v prípade leta a zimy (0,34 resp. 0,33 °C/10 rokov).

Nočné teplé vlny v Hurbanove

Podľa použitej metodiky bolo v Hurbanove v rokoch 1946–2022 identifikovaných spolu 127 nočných teplých vln so sumárnym trvaním 811 dní. V Tab. 4 sú prezentované vybrané základné ukazovatele výskytu, rozdelené/agregované do dvoch kontextuálnych období za účelom charakterizácie prejavov klimatickej zmeny.

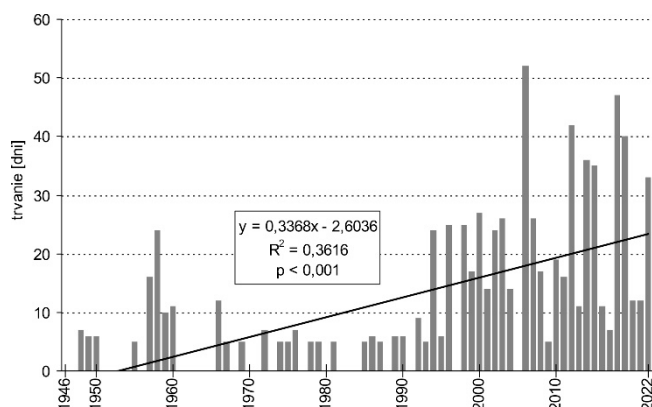
Tabuľka 4. Hodnoty vybraných ukazovateľov výskytu nočných teplých vln v Hurbanove v dvoch vybraných periódach rokov v rámci obdobia 1946–2022.

Table 4. Values of selected indicators of nighttime warm spells occurrence in Hurbanovo in two selected time periods within 1946–2022. Indicators in rows from top: number of spells, average duration in days, total duration, duration of the longest spell, average intensity (sum of daily temperature deviations above 1961–1990 normal), severity i.e. total intensity, most severe spell. In the lower part of the table, the values for spells with onset in the summer months are only shown.

sezóna	ukazovateľ nočných teplých vln	1946 – 1990 (45 rokov = 58,4 % celého obdobia)	1991 – 2022 (32 rokov = 41,6 %)
všetky vlny (celoročne)	počet vln	31 (24,4 %)	96 (75,6 %)
	priemerné trvanie vlny	5,6 dňa	6,6 dňa
	sumárne trvanie vln	174 dní (21,5 %)	637 dní (78,5 %)
	trvanie najdlhšej vlny	7 dní	16 dní
	priemerná intenzita vlny	12,1 °C	15,0 °C
	závažnosť (= sumárna intenzita) vln	373,9 °C (20,6 %)	1438,5 °C (79,4 %)
	najzávažnejšia vlna	31,5 °C	47,1 °C
iba vlny so začiatkom v letných mesiacoch	počet vln	6 (12,8 %)	41 (87,2 %)
	priemerné trvanie vlny	5,5 dňa	7,0 dňa
	sumárne trvanie vln	33 dní (10,3 %)	286 dní (89,7 %)
	priemerná intenzita vlny	11,0 °C	14,2 °C
	závažnosť (=sumárna intenzita) vln	66,3 °C (10,2 %)	580,6 °C (89,8 %)

Obrázok 2. Ročné trvanie, t.j. počet dní v rámci nočných teplých vln v Hurbanove v období 1946–2022. Čiarou je naznačený odhad lineárneho trendu.

Figure 2. Annual duration, i.e. count of days within the nighttime warm spells in Hurbanovo, 1946–2022. The line indicates the respective linear trend.



Až do roku 1990 vrátane sa v Hurbanove vyskytovali len nočné teplé vlny s trvaním nanajvýš 7 dní, avšak následne až do konca roku 2022 bolo zaregistrovaných až 21 prípadov dlhších, teda aspoň 8-dňových vln, z toho dokonca 10 vln s dĺžkou najmenej 10 dní. Absolútne najdlhšie zaznamenané trvanie nočnej teplej vlny 16 dní bolo dosiahnuté v prípade dvoch vln, ktoré sa obe vyskytli v rovnakom roku – 2006. Vzhľadom k uvedenému tak sumárne ročné trvanie vln (Obr. 2) neprekvapivo vykazuje jednoznačný významný štatistický trend. V tomto kontexte je pritom tiež pozoruhodné, že až do približne polovice 90. rokov 20. storočia boli len zriedkavé prípady viac než jednej vlny v priebehu roka. Odvtedy sa to však stalo celkom normálnym javom, a v najexponovanejších rokoch sa vyskytlo až 6 individuálnych nočných teplých vln.

Konformne k zvýšeniu početnosti a predĺžovaniu nočných teplých vln došlo aj k ich intenzifikácii, ergo nárastu ich meteorologickej závažnosti (Tab. 4). Úplne najzávažnejšia nočná teplá vlna sa v Hurbanove vyskytla v priebehu leta 2012.

Dosiahnuté výsledky sa ukázali ako obzvlášť pozoruhodné v letnom období – vo všeobecnosti najdôležitejšej časti roka z pohľadu dôsledkov nočných teplých vln. Rozdiel medzi uvažovanými obdobiami pred, resp. od nástupu výraznejších prejavov klimatickej zmeny, bol pre letnú sezónu pri všetkých parametroch vln ešte markantnejší (Tab. 4). Zrejme najpodstatnejšou zistenou skutočnosťou pritom je, že bezmála 90 % celkového trvania a sumárnej intenzity/závažnosti letných nočných teplých vln v Hurbanove sa vyskytlo od roku 1991.

DISKUSIA A ZÁVERY

V tejto štúdii nebolo našim zámerom opätovne poukazovať na otepľujúci sa trend ako-taký, ktorý bol na Slovensku v ére rýchlo postupujúcej klimatickej zmeny dostatočne často a komplexne dokumentovaný (napr. Labudová a kol., 2015; Faško a kol., 2022). V rámci trendovej analýzy sme sa sústredili hlavne na identifikáciu prípadných nápadných odlišností a špecifik nocí v nastúpenom procese otepľovania. Rozdiely sa ukázali napr. v prípade analýzy mesačných priemerov nočnej minimálnej teploty vzduchu, uskutočnenej na príklade Hurbanova, a to pre mesiace apríl – otepľujúci sa trend vyjadrený menej výrazne než pri priemernej teplote, september a október – výraznejšie vyjadrený trend.

Výsledky komparatívnej analýzy dokladajú, že denné maximá teploty vzduchu s otepľujúcou sa klímou (vz)rástli na väčšine sledovaných lokalít západného Slovenska výraznejšie v porovnaní s nočnými minimami. Lokálne sa však môžu objaviť miesta s obráteným charakterom otepľovania, ako sa ukázalo v prípade stanice Bratislava-letisko.

Vytvára otázka, či a do akej miery mohol k tomuto stavu prispieť proces bratislavskej suburbanizácie a s ňou spojené zmeny, súvisiace s fenoménom tamojšieho mestského ostrova tepla (Šveda a Šuška, 2019; Holec a kol., 2020), alebo ide o čistý dôsledok vplyvu prirodzených faktorov, akým je napr. vyššia veternosť lokality, či poloha v závetří Álp pri štandardne prevládajúcom prúdení zo západných smerov. V každom prípade však tento zistený detail núti poukázať na špecifický význam podmienok veľkých miest a aglomerácií v súčasnej dobe rýchleho otepľovania.

Z pohľadu praktických zistení pre budúce štandardné klimatologické spracovania sa preukázalo, že pri priemerovaných ročných hodnotách minimálna celodenná teplota vzduchu dosahuje veľmi podobné výsledky ako nočná minimálna teplota, a v dlhodobých hodnoteniach tohto druhu teda je možné používať ju ako zástupnú teplotnú charakteristiku v kontexte nocí.

V hodnotení nočných teplých vln v Hurbanove sa adekvátne potvrdili skoršie poznatky o osobitne výraznom pribúdaní dlhých období so silne nadnormálnymi hodnotami minim teploty vzduchu (Výberčí a kol., 2018b). Iné naše predošlé zistenie, o obzvlášť nápadne narastajúcom výskyte veľmi teplých nocí v sériách v letnom období (Babin a kol., 2021), sa pre zmenu ukazuje byť platným aj v celoročnom kontexte.

Na severnej pologuli bol na konci 90. rokov 20. storočia zistený prudký nárast vo výskyte nočných teplotných extrémov v období leta, majúci charakter režimového „skoku“ (Yeh a kol., 2021). Práve v letnej sezóne predstavujú veľmi teplé noci v exponovaných najteplejších oblastiach udalosti s najväčšími potenciálnymi zdravotnými rizikami pre zasiahnutú populáciu. Na túto časť roka sme preto pri hodnotení upriamili pozornosť osobitne a zistené výsledky preukazujú výnimočnosť pozorovaného stavu. Naše výsledky signalizujú, že od konca 2. svetovej vojny sa až zhruba 90 % celkového trvania a intenzity letných vln teplých nocí, čo možno v prenesenom zmysle interpretovať ako týmito periódami vyvolaný potenciálny nočný teplotný stres, naakumulovalo v období po roku 1990. Humánno-biometeorologické analýzy sa v problematike nočných teplôt ďalej ponúkajú ako celkom evidentný krok smerom do aplikovanej sféry a oblasti hodnotení a ich dôsledkov na spoločnosť. Pre prípadné budúce spracovania tohto druhu však znovu upozorňujeme na potrebu uvažovať v nich aj nad kratšie trvajúcimi periódami, keďže z nedávnej minulosti sú známe negatívne zdravotné dôsledky teplotného stresu na Slovensku už pri dvojdnovom trvaní letných periód horúceho počasia (Výberčí a kol., 2015 a 2018a).

Teplotné pomery nocí sú v určitých ohľadoch nepochybne zaujímavou problematikou a dostatočne dlhá tradícia klimatologickej evidencie nočnej minimálnej teploty vzduchu, hoci táto nepredstavuje štandardnú charakteristiku primárneho záujmu, nám na Slovensku umožňuje vhodne skúmať ich rôznorodé aspekty. V práci sme uviedli a vyhodnotili niektoré z perspektívy klimatológie najzákladnejšie možnosti využitia predmetnej teplotnej charakteristiky. Okrem toho môže byť nočná minimálna teplota využívaná aj na ďalšie zaujímavé špecifické účely, napr. v kombinácii s celodennou minimálnou teplotou na analýzu ochladení v priebehu dennej doby. Zásadnú potenciálnu príležitosť

však predstavuje predovšetkým spomínané následné aplikovanie charakteristiky v oblasti humánnej biometeorológie (bioklimatológie), ktorému by sme sa radi venovali v rámci našich nasledujúcich aktivít.

Podakovanie

Za pomoc pri zhromažďovaní údajov pre analytickú časť práce ďakujeme zamestnancom meteorologického observatória SHMÚ v Hurbanove.

LITERATÚRA

- Altena, E.–Baglioni, C.–Sanz-Arigita, E.–Cajochen, C.–Riemann, D., 2023, *How to deal with sleep problems during heatwaves: practical recommendations from the European Insomnia Network*. *Journal of Sleep Research*, 32(2): e13704.
- Babin, L.–Pecho, J.–Onderka, M.–Faško, P.–Výberčí, D., 2021, *Tropické noci podľa nočnej minimálnej teploty vzduchu v Hurbanove (1945–2021)*. *Meteorologický časopis* 24(2): 85–91.
- Davy, R.–Esau, I.–Chernokulsky, A.–Outten, S.–Zilitinkevich, S., 2017, *Diurnal asymmetry to the observed global warming*. *Bulletin of the American Meteorological Society* 37(1): 79–93.
- Faško, P.–Bochníček, O.–Markovič, L., 2022, *Evolution of the long-term average values of air temperature and atmospheric precipitation in Slovakia*. *Meteorologický časopis* 22(2): 79–88.
- Hass, A.L.–McCanless, K.–Cooper, W.–Ellis, K.–Fuhrmann, C.–Kintziger, K. W.–Sugg, M.–Runkle, J., 2022, *Heat exposure misclassification: Do current methods of classifying diurnal range in individually experienced temperatures and heat indices accurately reflect personal exposure?* *International Journal of Biometeorology* 66(7): 1339–1348.
- Holec, J.–Feranec, J.–Šťastný, P.–Szatmári, D.–Kopecká, M.–Garaj, M., 2020, *Evolution and assessment of urban heat island between the years 1998 and 2016: case study of the cities Bratislava and Trnava in western Slovakia*. *Theoretical and Applied Climatology* 141(3–4): 979–997.
- Krška, K.–Racko, S., 1993, *Horúce leto 1992 v Českej a v Slovenskej republike, jeho synoptický výklad a klimatologické zhodnotenie*. *Meteorologické zprávy* 46(2): 33–41.
- Labudová, L.–Faško, P.–Ivaňáková, G., 2015, *Changes in climate and changing climate regions in Slovakia*. *Moravian Geographical Reports* 23(3): 71–82.
- Lapin, M.–Šťastný, P.–Turňa, M.–Čepčková, E., 2016, *High temperatures and heat waves in Slovakia*. *Meteorologický časopis* 19(1): 3–10.
- Minor, K.–Bjerre-Nielsen, A.–Jonasdottir, S.S.–Lehmann, S.–Obradovich, N., 2022, *Rising temperatures erode human sleep globally*. *One Earth* 5(5): 534–549.
- Obradovich, N.–Migliorini, R.–Mednick, S.C.–Fowler, J.H., 2017, *Nighttime temperature and human sleep loss in a changing climate*. *Science Advances* 3(5): e1601555.
- Rippstein, V.–de Schrijver, E.–Eckert, S.–Vicedo-Cabrera, A.M., 2023, *Trends in tropical nights and their effects on mortality in Switzerland across 50 years*. *PLOS Climate* 2(4): e0000162.
- Royé, D.–Sera, F.–Tobías, A.–Lowe, R.–Gasparrini, A.–Pascal, M.–de Donato, F.–Nunes, B.–Teixeira, J. P., 2021, *Effects of hot nights on mortality in Southern Europe*. *Epidemiology* 32(4): 487–498.

- Slabá, N., 1976, *Návod pre pozorovateľov meteorologických staníc ČSSR – Zborník predpisov III*. Bratislava: Hydro-meteorologický ústav, 273 pp.
- Sobíšek, B. (ed.), 1993, *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR, 594 pp.
- Šveda, M.–Šuška, P. (eds.), 2019, *Suburbanizácia – Ako sa mení zázemie Bratislavy?* Bratislava: Geografický ústav SAV, 300 pp.
- Vaghefi, S.A.–Muccione, V.–Neukom, R.–Huggel, C.–Salzmann, N., 2022, *Future trends in compound concurrent heat extremes in Swiss cities - An assessment considering deep uncertainty and climate adaptation options*. *Weather and Climate Extremes* 38: 100501.
- Výberčí, D.–Labudová, L.–Eštoková, M.–Faško, P.–Trizna, M., 2018a, *Human mortality impacts of the 2015 summer heat spells in Slovakia*. *Theoretical and Applied Climatology* 133(3-4): 925–936.
- Výberčí, D.–Pecho, J.–Faško, P.–Bochníček, O., 2018b, *Teplé a chladné obdobia na Slovensku (1951–2017) v kontexte klimateckej zmeny*. *Meteorologický časopis* 21(2): 101–108.
- Výberčí, D.–Švec, M.–Faško, P.–Savinová, H.–Trizna, M.–Mičietová, E., 2015, *The effects of the 1996–2012 summer heat events on human mortality in Slovakia*. *Moravian Geographical Reports* 23(3): 58–70.
- WMO, 2017, *WMO guidelines on the calculation of climate normals*. WMO-No. 1203, Ženeva: 18 pp.
- Wu, S.–Luo, M.–Zhao, R.–Li, J.–Sun, P.–Liu, Z.–Wang, X.–Wang, P.–Zhang, H., 2023, *Local mechanisms for global daytime, nighttime, and compound heatwaves*. *Npj | Climate and Atmospheric Science* 6(1): 36.
- Yeh, S.-W.–Lee, E.-H.–Min, S.-K.–Lee, Y.-H.–Park, I.-H.–Hong, J.-S., 2021, *Contrasting factors on the trends in hot days and warm nights over Northern Hemisphere land during summer*. *Weather and Climate Extremes* 34: 100389.

STRUČNÉ POROVNANIE DVOCH MODELOV STOMATÁLNEJ VODIVOSTI OZÓNU PRE BOROVICU LIMBOVÚ

ANNA BUCHHOLCEROVÁ¹, PETER FLEISCHER JR.^{2,3}

¹ Slovenská akadémia vied, Ústav vied o Zemi, Ďumbierska 1, Banská Bystrica, Oddelenie fyziky atmosféry

² Technická Univerzita Zvolen, Lesnícka fakulta, T. G. Masaryka 24, Zvolen

³ Štátne lesy TANAPu, Tatranská Lomnica, Vysoké Tatry

Chamber studies have proven the adverse effect of ozone to vegetation. With regard to tropospheric ozone distribution in the atmosphere (its concentration increases along with increasing altitude), we conclude that the most endangered vegetation might be located in mountain areas enriched in ozone. In this article, two models of stomatal conductance are evaluated according to stomatal conductance gained by experiment.

Komorové štúdie poukazujú na nepriaznivý vplyv koncentrácií ozónu na vegetáciu. S ohľadom na rozloženie troposférického ozónu v atmosfére (jeho koncentrácia narastá so zvyšujúcou sa nadmorskou výškou) usudzujeme, že vegetácia nachádzajúca sa v horských oblastiach bohatých na ozón môže byť výraznejšie ohrozená. V článku vyhodnotíme dva modely prieduchovej vodivosti borovice limbovej s experimentálne získanými hodnotami.

Key words: stomatal conductance, ozone, vegetation, Swiss pine

ÚVOD

Rastlina je otvoreným termodynamickým systémom a výmena častíc medzi ňou a prostredím sa uskutočňuje viacerými cestami. Jednou z nich je výmena plyných látok prostredníctvom prieduchov, ktorá umožňuje získavanie oxidu uhličitého potrebného na fotosyntézu z okolitého vzduchu, a obdobne vylučovanie kyslíka pri dýchaní. Intenzitu výmeny plynov popisuje stomatálna, čiže prieduchová vodivosť, ktorá je určená stupňom otvorenia prieduchovej štrbiny daným turgorom a osmotickým potenciálom. Prieduchovú vodivosť meriame porometrami a udávame ju v jednotkách $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Obyčajne sa meria pre oxid uhličitý, danú hodnotu je možné prepočítať na iné plyny (napríklad ozón).

Výskumy ohľadom toxického vplyvu vysokých koncentrácií ozónu na vegetáciu sa vykonávajú vydymovaním v skleníkoch, v komorách s otvorenou vrchnou časťou, tzv. open-top chambers (OTC) a taktiež priamo v externých podmienkach. Komory OTC sa podobajú na fóliovníky s rozdielom, že im chýba vrchná časť. Prítomné steny zabráňujú horizontálnej výmene vzduchu medzi komorou a okolím, vertikálna výmena vzduchu vplyvom použitej geometrie výrazne obmedzená nie je. V komore sa nachádza vyústenie trubice, ktorou vzduch s vopred pripraveným chemickým zložením, určený na vydymovanie, vstupuje do komory. Experimenty s vydymovaním viedli k popisu poškodení vegetácie zapríčinených pôsobením ozónu (Jäger a kol., 1993; Bergmann a kol., 1999; Manning a kol., 2002; Jurán a kol., 2021). Boli popísané zmeny v štruktúre pletív, ktoré v niektorých podmienkach viedli k poškodeniu viditeľnému voľným okom, či k poklesu produkcie rastliny. Viditeľné poškodenia na rastline sa líšia v závislosti od druhu a patria medzi ne napr. škvrny na listoch, strakatosť a bronzovanie. Názorné ukážky sú zobrazené v mobilnej aplikácii na zhromažďovanie viditeľných poškodení vyvinutej organizáciou Medzinárodného kooperatívneho programu o vplyve znečistenia vzduchu na rastlinné spoločenstvá ICP Vegetation

(Ozone app – Ozone Injury Recording App; <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/ozone-injury/record>). Problém pri určovaní poškodenia vegetácie ozónom na rozdiel napr. od ťažkých kovov spočíva v tom, že v pletivách ozón nezanecháva špecifické reziduá, ale mení sa na reaktívne oxidy kyslíka ROS. Tieto formy kyslíka reagujú s ďalšími zlúčeninami, až sa chemickou reakciou premenia do podoby, v ktorej strácajú svoje oxidačné vlastnosti. Posúdením viditeľného poškodenia ozónu na lesné druhy sa zaoberá literatúra (Schaub a kol., 2020).

Toxický vplyv ozónu na vegetáciu je zapríčinený chemickou štruktúrou ozónu, ktorá spôsobuje vysokú reaktivitu zlúčeniny, čím narušuje rastlinné pletivá. Výskum sa v tejto oblasti zaoberá najmä hospodárskymi plodinami (experimenty na pšenici, sóji a pod.) a dominantnými druhmi využívanými v drevospracujúcom priemysle. Nerovnomerné vertikálne rozloženie ozónu v atmosfére však naznačuje možné významnejšie ohrozenie vegetácie vo vyšších nadmorských výškach, a preto sa v tejto práci venujeme zástupcovi horskej vegetácie, borovici limbovej. Borovica limbová, limba (*Pinus cembra* L.), je mohutným ihličnatým stromom dosahujúcim výšku priemerne 10–12 m a dožívajúcim sa aj 1000 rokov. Ihlice na limbe vyrastajú vo zväzkoch po 5 ihlic v brachyblaste a vytrvávajú na strome 3–5 rokov. Na nepriaznivé podmienky druh reaguje citlivo prostredníctvom zmenšenia výškového prírastku. Borovica limbová je mrazuvzdorným druhom odolným voči chladu, čo dosahuje prostredníctvom zníženia obsahu vody v ihliciach v zime a nie je preto odkázaná na prítomnosť snehovej pokrývky. Na rozdiel od borovice horskej (*Pinus mugo* Turra), je limba menej citlivá na výsušné mrazivé vetry (Pagan a kol., 1999; Caudullo a kol., 2016). Limbe vyhovuje nadmorská výška od 1100 do 2500 m n.m. Na území Slovenska sa prirodzene vyskytuje na hornej hranici lesa v Západných, Vysokých a Belianskych Tatrách, pričom preferuje južné svahy (Pagan a kol. 1999).

Tabuľka 1. Charakteristika meraní stomatálnej vodivosti ozónu pre borovicu limbovú v roku 2016.

Table 1. Characteristic of ozone stomatal conductance measurements for Swiss pine in 2016.

Dátum	Počet meraní	Začiatok merania SEČ	Koniec merania SEČ	Priemerná teplota °C	Priemerná vlhkosť kPa	Priemerná intenzita žiarenia $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
16.7.2016	19	08:43	11:29	20,9	0,4	1395
9.8.2016	37	08:27	12:41	29,4	2,3	1500
13.8.2016	55	09:36	15:54	25,6	1,5	1099
14.8.2016	37	09:34	14:44	27,5	1,7	1529
1.9.2016	15	11:04	12:55	29,5	1,5	1500
3.9.2016	28	10:11	12:48	27,1	1,3	1000

Jeden zo spôsobov určovania depozície ozónu do vegetácie je prostredníctvom modelovania toku ozónu do vegetácie, pričom kľúčovou hodnotou pre jeho výpočet je prieduchová vodivosť, ktorú je možné merať napríklad prostredníctvom systému LiCOR priamo na vegetácii. V tomto článku porovnáme dva modely (Mills a kol., 2017; Bičárová a kol., 2019) na určenie stomatálnej vodivosti na meraniach, ktoré boli vykonané na borovici limbovej v roku 2016.

METODIKA

Merania prieduchovej vodivosti vodnej pary na borovici limbovej boli uskutočnené gazometrom LiCOR 6400 v štandardizovanej nepriehľadnej kuvete LiCOR 6400-22 Opaque Conifer Chamber prostredníctvom lešenia. Získané hodnoty prieduchovej vodivosti boli prepočítané konštantou 0,663 na stomatálnu vodivosť ozónu (Massman, 1998). Použitá kuveta pre ihličnaté stromy je stavaná pre vetvičky s maximálnou dĺžkou 7,5 cm a pre dĺžku ihlíc približne 3 cm. Do kuvety bola vložená koncová vetvička a vytvorený systém sa nechal približne 5 minút stabilizovať na svetelných podmienkach (s intenzitou 500 až 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ fotosynteticky aktívneho žiarenia), ktoré boli určené vnútorným zdrojom žiarenia LiCOR 6400-18 RGB Light Source. Po stabilizácii sa odmerali hodnoty prostredia v kuvete – teplota, sýtosťný doplnok¹, relatívna vlhkosť a vlastnosti vegetácie – prieduchová vodivosť a intenzita fotosyntézy. Merania sa opakovali na ďalších vetvičkách. Vetvičky počas meraní zostali spojené so stromom, a preto boli počas merania vnútornými procesmi spojené aj s podmienkami, v ktorých sa nachádzal zvyšok stromu. Žiarenie v kuvete dosahovalo pre väčšinu meraní hodnoty typické pre jasné počasie. Základný popis meraní sa nachádza v Tab. 1.

Jarvisov multiplikatívny model výpočtu prieduchovej vodivosti je často používaný model z dôvodu svojej jednoduchosti v porovnaní s inými mechanistickými modelmi (Mills a kol., 2017). Model je určený niekoľkými modifikačnými faktormi f nadobúdajúcimi hodnoty v rozmedzí 0 až 1 a maximálnou prieduchovou vodivosťou určenou pre jednotlivé drevisy nasledovne:

$$g_{sto} = g_{max} * f_{phen} * f_{light} * \max\{f_{min}, (f_{temp} * f_{VPD} * f_{SWP})\}. \quad (1)$$

Z definície platí, že modelové hodnoty stomatálnej vodivosti nadobúdajú maximálne hodnotu g_{max} . Táto hodnota je obvyčajne určená z experimentálnych meraní, pričom jej

výber závisí od použitej metodiky a obvykle sa určí na hodnotu 80. až 95. percentilu z nameraných hodnôt, resp. z hodnôt nameraných pri optimálnych podmienkach. Modifikačné faktory použité v Jarvisovom modeli sú nasledovné: fenologický f_{phen} , teplotný f_{temp} , faktor sýtosťného doplnku f_{VPD} , faktor vlhkosti pôdy f_{SWP} , svetelný f_{light} a minimálny faktor f_{min} .

Fenologický faktor f_{phen} pre ihličnaté stromy sa obvyčajne parametrizuje hodnotou 1 pre celé trvanie vegetačného obdobia a hodnotou 0 pre ostatné obdobie. Svetelný faktor f_{light} je určený intenzitou fotosynteticky aktívneho žiarenia (PAR).

$$f_{light} = 1 - e^{-light_a PAR}. \quad (2)$$

Keď táto hodnota nie je k dispozícii, určí sa z globálneho slnečného žiarenia (Global) nasledovným spôsobom:

$$f_{light} = 1 - e^{-light_a (Global/0,486263)}, \quad (3)$$

kde $light_a$ je jedným z parametrov Jarvisovho modelu. Faktor f_{light} nadobúda hodnotu 0,9 s použitím parametra $light_a = 0,0032$ už pri intenzite fotosynteticky aktívneho žiarenia $PAR = 700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Minimálny faktor f_{min} určuje minimálnu prieduchovú vodivosť počas vegetačného obdobia a pri dostatočnej intenzite slnečného žiarenia. Teplotný faktor f_{temp} je určený tromi parametrami, kde parametre T_{min} a T_{max} ohraničujú teplotu vzduchu, pri ktorej dochádza k otvoreniu, resp. uzatvoreniu prieduchov (Emberson a kol., 2010; Op de Beeck a kol., 2010). Optimálna teplota T_{opt} je označením pre teplotu vzduchu, počas ktorej je možné namerať maximálnu hodnotu stomatálnej vodivosti a teda popisuje optimálne podmienky pre rast vegetácie.

$$f_{temp} = \max \left[f_{min}, \left(\frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right) \left(\frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{opt}} \right)^{bt} \right], \quad (4)$$

$$bt = \frac{T_{max} - T_{opt}}{T_{opt} - T_{min}}. \quad (5)$$

Faktor vlhkosti vzduchu f_{SWP} je vyjadrený prostredníctvom sýtosťného doplnku VPD . Zvyšovaním sýtosťného doplnku sa zhoršujú podmienky pre stomatálnu vodivosť. Hodnotu VPD odvodzujeme z teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu, pomocou prepočtu z napätia nasýtenia $E_{(T)}$.

$$f_{VPD} = \min \left[1, \max \left[f_{min}, \frac{(1 - f_{min})(VPD_{min} - VPD)}{(VPD_{min} - VPD_{max})} + f_{min} \right] \right] \quad (6)$$

Faktor pôdnej vlhkosti f_{SWP} sme pre horskú oblasť určili na hodnotu 1.

¹ Sýtosťný doplnok je charakteristika vlhkosti vzduchu, vyjadrujúca množstvo vodnej pary, potrebné dodať do vzduchu

pri konštantnej teplote, aby sa stal nasýteným. (<http://slovník.cmes.cz/vyklad/>).

Tabuľka 2. Parametre modifikačných faktorov pre výpočet prieduchovej vodivosti g_{sto} .

Table 2. Parameters of modification factors for stomatal conductance g_{sto} calculation.

Parameter	g_{max}	f_{min}	$light_a$	T_{min}	T_{opt}	T_{max}	VPD_{max}	VPD_{min}
Hodnota	113	0,1	0,0032	0	27	200	0,25	2,5
Jednotka	$\mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$			$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kPa	kPa

Parametre pre Jarvisov model sme odvodili podľa najtesnejšieho vzťahu medzi nameranými a namodelovanými hodnotami prieduchovej vodivosti (určeného koeficientom determinácie), podrobný postup je uvedený v článku Buchholcerová a kol. 2019. Parametre, na ktoré nebola stomatálna vodivosť v našich meraniach citlivá, sme určili z dostupnej literatúry. Získané hodnoty sú uvedené v Tab. 2.

Merania sme vyhodnotili aj stochastickým modelom získaným metódou symbolickej regresie prostredníctvom programu Heuristic Lab verzia 3.13 (Wagner a kol., 2014). Použitý model bol získaný z rozsiahlych meraní na borovici horskej (*Pinus mugo* Turra) uskutočnených v mesiacoch jún až november meraniami v lokalitách Stará Lesná (810 m n.m.) a Skalnaté pleso (1788 m n.m.) systémom LiCOR 6400 (Bičárová a kol. 2019):

$$g_{sto} = \left(\frac{TA \cdot \log(c_0 \cdot TA + c_1) \cdot c_2}{c_3 \cdot VPD} \right) + c_4, \quad (7)$$

kde TA označuje teplotu vzduchu v jednotkách $^{\circ}\text{C}$, VPD sýtosťný doplnok v kilopaskaloch a c_0 až c_4 zodpovedajú konštantám s hodnotami: $c_0 = 1,9854$, $c_1 = -16,34$, $c_2 = 0,16571$, $c_3 = 267,39$ a $c_4 = 0,01287$. Táto rovnica poukazuje na význam teploty a sýtosťného doplnku pre určenie prieduchovej vodivosti rastlín.

VÝSLEDKY

Hodnoty troch meteorologických prvkov, vstupujúcich v podobe premenných do funkcií určujúcich hodnoty modifikačných faktorov Jarvisovho modelu (teplota, sýtosťný doplnok a intenzita žiarenia), sú zobrazené v grafoch na Obr. 1. Na grafoch sú krúžkami znázornené hodnoty meteorologických prvkov. Zodpovedajúce hodnoty relatívnej prieduchovej vodivosti sú určené nasledovným predpisom:

$$g_{sto_{rel}} = \frac{g_{sto}}{g_{max}}. \quad (8)$$

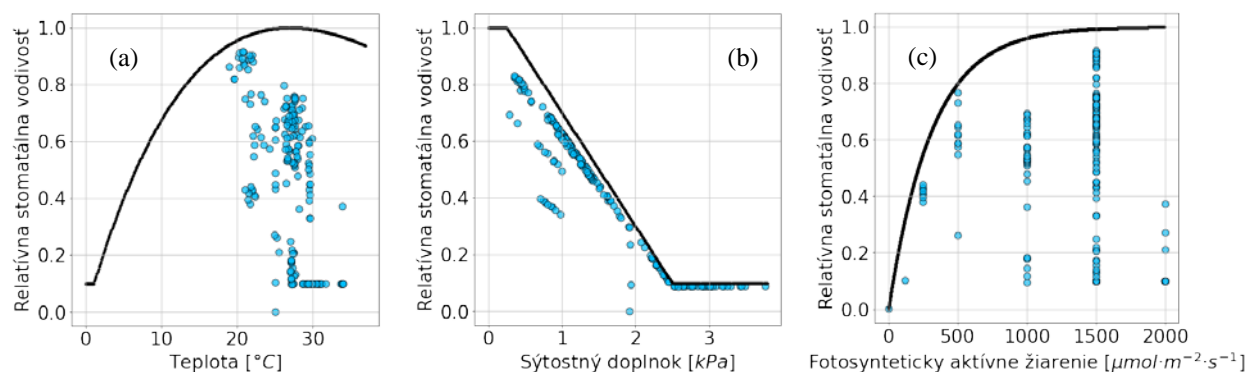
Čierne krivky zobrazujú hypotetickú maximálnu hodnotu prieduchovej vodivosti, ktorá zodpovedá danému meteorologickému prvku. Preto dané krivky sú obalovými funkciami a hodnoty sa nachádzajú v priestore vymedzenom danou krivkou a osou x. To vyjadruje súčinné pôsobenie jednotlivých modifikačných faktorov na výslednú stomatálnu vodivosť. Pre ostatné modifikačné faktory predpokladáme v priebehu meraní stabilnú hodnotu (f_{phen} , f_{SWP})

Ďalej budeme porovnávať hodnoty stomatálnej vodivosti ozónu do vegetácie pre Jarvisov a stochastický model s meraniami získanými systémom LiCOR.

Grafy na Obr. 2 a 3 zobrazujú hodnoty stomatálnej vodivosti pre bodové merania na pozadí hodnôt vypočítaných z oboch modelov pre podmienky $f_{phen} = 1$, $f_{SWP} = 1$, a $PAR = 1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Danú hladinu fotosynteticky aktívneho žiarenia sme vybrali z dôvodu najväčšieho množstva meraní pre túto hodnotu (konkrétne 126 údajov z celkového počtu 191). Os x zobrazuje teplotu vzduchu, os y sýtosťný doplnok a farebná škála zobrazuje stomatálnu vodivosť. Biela oblasť vľavo hore vo všetkých grafoch zodpovedá nerealistickým hodnotám sýtosťného doplnku, ktorý je funkciou teploty a vlhkosti vzduchu. Pozadie grafu zobrazuje výpočet Jarvisovým (Obr. 2) a stochastickým modelom (Obr. 3). Jednotlivé body označujú hodnoty namerané systémom LiCOR. V oboch modeloch vidíme vplyv sýtosťného doplnku na prieduchovú vodivosť. Pokles prieduchovej vodivosti s nárastom sýtosťného doplnku zodpovedá pozorovaným meraniam. Stochastický model lepšie popisuje práve merania s nižšími nameranými hodnotami VPD . Na druhej strane, Jarvisov model lepšie popisuje rozsah grafu pre vyššie VPD a tiež pre hodnoty VPD blízke nule, kde sa stochastický model približuje k nerealistickej hodnote $400 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$, čo je však kvôli jednotnému ohraňovaniu mierky grafu (0 až $125 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$) slabšie viditeľné. Z Obr. 1b vyplýva, že parameter $VPD_{max} = 0,25 \text{ kPa}$ by mohol byť posunutý na nižšiu hodnotu, čím by sa posu-

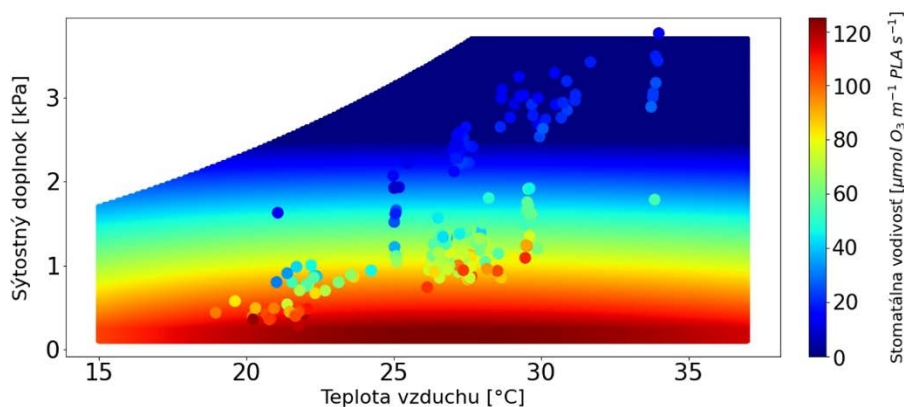
Obrázok 1. Znázornenie funkcií modifikačných faktorov teploty (a), sýtosťného doplnku (b) ako opisnej charakteristiky vlhkosti a fotosynteticky aktívneho žiarenia (c) spolu s hodnotami relatívnej stomatálnej vodivosti pre jednotlivé merania LiCOR.

Figure 1. Displaying functions of modification factors of temperature (a), vapour pressure deficit (b) as a describing humidity characteristic and photosynthesis active radiation (c) together with stomatal conductance relative values for single measurements LiCOR.



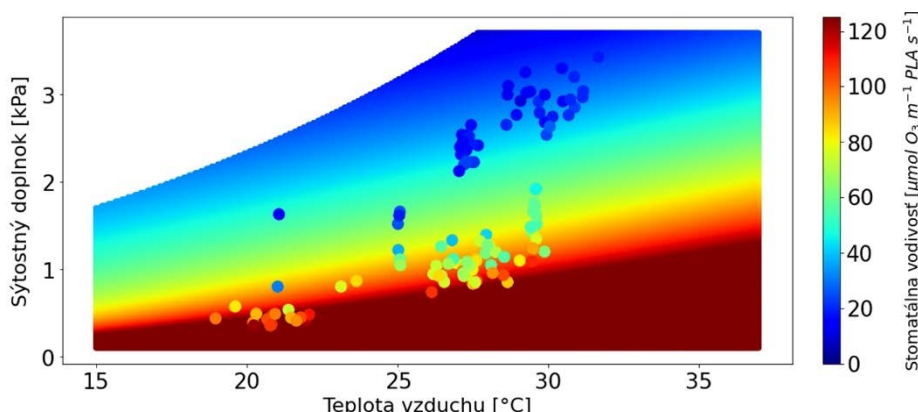
Obrázok 2.
Jarvisov model stomatálnej vodivosti v porovnaní s meraniami LiCOR.

Figure 2.
Jarvis model of stomatal conductivity in comparison with LiCOR measurements.



Obrázok 3.
Stochastický model stomatálnej vodivosti v porovnaní s meraniami LiCOR.

Figure 3.
Stochastic model of stomatal conductivity in comparison with LiCOR measurements.



nul pás modelovanej prieduchovej vodivosti v oblasti okolo $60 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$ bližšie k nameraným hodnotám.

Pri nízkych hladinách sýťostného doplnku sú hodnoty g_{sto} na Obr. 3 veľmi vysoké. Najväčšiu odlišnosť medzi stochastickým modelom a meraniami vidíme pre vyššie hodnoty sýťostného doplnku, kedy model priradzuje pre jednotlivé merania vyššie prieduchové vodivosti v rozmedzí $20 - 40 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$, pričom hodnoty určené meraním boli v rozpätí 5 až $28 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$.

V Tab. 3 sa nachádza jednoduché porovnanie modelov. Použili sme Pearsonov korelačný koeficient, strednú kvadratickú chybu (RMSE) a rozdiel priemerných hodnôt jednotlivých súborov (BIAS).

Tabuľka 3. Porovnanie modelov pre výpočet stomatálnej vodivosti.

Table 3. Comparison of models for stomatal conductivity calculation.

	Stochastický model	Jarvisov model
Korelačný koeficient	0,937	0,916
RMSE	24,8	12,5
BIAS	-21,8	0,92

DISKUSIA

Použitý stochastický model vychádzal z meraní v Starej Lesnej na príbuznom druhu borovice, čo mohlo spôsobiť nadhodnotenie hodnôt prieduchovej vodivosti. Korelačný koeficient dosahoval vyššie hodnoty pri stochastickom

modeli ako pri Jarvisovom modeli. Výhodou daného modelu je vyššia presnosť pre najčastejšie tréňované hodnoty a možnosť vytvorenia modelu bez poznania hlbších väzieb medzi premennými. Merania prieduchovej vodivosti prostredníctvom LiCOR sú špecifické svojimi mikroklimatickými podmienkami v kuvete v blízkosti zdroja žiarenia, čo sa pravdepodobne odzrkadlilo na malom počte meraní s nižšími hodnotami sýťostného doplnku, a teda nerealistickými hodnotami prieduchovej vodivosti v stochastickom modeli. Bez kontroly však stochastický model môže udávať nerealistické hodnoty najmä pre rozsah a kombinácie vstupných premenných, pre ktoré neboli k dispozícii tréňovacie údaje. Tieto nedostatky sa dajú odstrániť vhodným doplnením umelých tréňovacích údajov. Bez tohto doplnenia je potrebné model používať vo vopred určenom rozsahu vstupných premenných.

Jarvisov multiplikatívny model popisuje údaje vo všeobecnosti realistickejšie ako predchádzajúci model. Je však náročnejší na parametrizáciu a popis vplyvu premennej na prieduchovú vodivosť nemusí byť dostatočný. Napríklad, v použitej konfigurácii parametrov je $T_{max} = 200^\circ\text{C}$, kde daná hodnota nezodpovedá reálnej maximálnej teplote vzduchu, pri ktorej ustáva výmena plynov medzi vegetáciou a prostredím, keďže tá nastáva oveľa skôr. Samotná správa Európskej hospodárskej komisie OSN UNECE (Mills a kol., 2017) však túto hodnotu schvaľuje a navrhuje ju používať pre ihličnany v miernom pásme. V danom prípade by však stála za zváženie zmena predpisu pre obaťovú krivku prislúchajúcu vplyvu teploty na stomatálnu vodivosť.

Na výpočty prieduchovej vodivosti a toku ozónu do vegetácie pomocou Jarvisovho modelu je možné použiť DO₃SE model dostupný na stránke Štokholmského environmentálneho inštitútu SEI <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/do3se-deposition-ozone-stomatal-exchange/> alebo aplikáciu vyvinutú Národným lesníckym centrom <http://www.nlcsk.sk/mapfod/>.

Tento článok vznikol vďaka podpore projektov Agentúry pre vedu a výskum APVV 21-0412 a APVV 17-0644 a projektu Vedeckej agentúry VEGA 2/0093/21.

LITERATÚRA

- Bičárová, S.–Sitková, Z.–Pavlendová, H.–Fleischer Jr., P.–Fleischer Sr., P.–Bytnerowicz, A. 2019, *The role of environmental factors in ozone uptake of pinus mugo turra. Atmospheric Pollution Research*, 10(1): 283–293.
- Buchholcerová, A.–Fleischer, Jr., P.–Štefánik, D.–Bičárová, S.–Lukasová, V., 2021, *Specification of Modified Jarvis Model Parameterization for Pinus cembra. Atmosphere*, 2021, 1, 5. <https://doi.org/10.3390/atmos1010005>.
- Caudullo, G.–de Rigo, D., 2016, *Pinus cembra in Europe: distribution, habitat, usage and threats. European Atlas of Forest Tree Species.*, pages e01bd9b+.
- Emberson, L.D.–Wieser, G.–Ashmore, M.R., *Modelling of stomatal conductance and ozone flux of Norway spruce: comparison with field data. Environmental Pollution*, 109:393–402, 2000.
- Massman, W.J., 1998, *A review of the molecular diffusivities of H₂O, CO₂, CH₄, CO, O₃, SO₂, NH₃, N₂O, NO, and NO₂ in air, O₂ and N₂ near STP. Atmospheric Environment*, 32: 1111–1127.
- Mills, G.–Harmens, H.–Hayes, F.–Pleijel, H.–Büker, P.–González-Fernández, I.–Alonso, R.–Bender, J.–Bergmann, E.–Bermejo, V.–Braun, S.–Danielsson, H.–Gerosa, G.–Grünhage, L.–Karlsson, P.E.–Marzuoli, R.–Schaub, M.–Simpson, D., 2017, *Mapping critical levels for vegetation revised chapter 3 of the manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. The International Co-operative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops.*
- Op de Beeck, M.–Löw, M.–Deckmyn, G.–Ceulemans, R., 2010, *A comparison of photosynthesis dependent stomatal models using twig cuvette field data for adult beech (fagus sylvatica l.). Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4): 531–540.
- Pagan, J. a kolektív, 1999, *Lesnícka dendrológia. Zvolen: Technical University in Zvolen*, 2 edition.
- Wagner, S.–Kronberger, G.–Beham, A.–Kommenda, M.–Scheibenpflug, A.–Pitzer, E.–Vonolfen, S.–Kofler, M.–Winkler, S.–Dorfer, V.–Affenzeller, M., 2014, *Architecture and design of the heuristic lab optimization environment. In: In: Klempous, R., Nikodem, J., Jacak, W., Chaczko, Z. (Eds.), Advanced Methods and Applications in Computational Intelligence. Topics in Intelligent Engineering and Informatics*, vol. 6. 197–261. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01436-4_10.

CHANGES IN THE FREQUENCY OF METEOROLOGICAL PHENOMENA IN SLOVAKIA BETWEEN CLIMATOLOGICAL NORMAL 1961 – 1990 AND 1991 – 2020

MARCEL GARAJ¹, JURAJ HOLEC¹, PAVEL ŠŤASTNÝ¹, VIERA RATTAYOVÁ²

¹ Slovak Hydrometeorological Institute, Jeséniova 17, Bratislava, Slovakia

² Department of Land Water Resources Management, Faculty of Civil Engineering, Slovak University of Technology, Radlinského 11, 810 05 Bratislava, Slovakia

The last three decades showed significant change in the daily, seasonal and annual course of various meteorological variables. Global warming affects physical processes in the atmosphere and analysis of long-term data for selected meteorological phenomena (MP) can supplement information about the response of land meteorological observation on climate changes. This study aims to analyze changes in frequency of selected MP in comparison of climatological normals (CLINOs) 1991 – 2020 and 1961 – 1990. We used 10 professional climatological stations for the purpose of this research. Investigated phenomena are fog, glaze, hail and thunderstorm. Results show decreasing trend in hail occurrence in 8 of 10 studied stations and also increasing trend in glaze incidence in 9 of 10 selected station. The highest increase in fog appearance is present on the mountain stations: Chopok and Lomnický štít. Both mountain stations, Chopok and Lomnický štít, recorded increase in thunderstorm activity as well. Detecting these changes may help to prevent the risk of natural hazards, possible damage on socio-economical activities and also could help to adapt on changing environment.

Posledné tri dekády zaznamenávame významnú zmenu v dennom, sezónnom a ročnom chode rôznych meteorologických premenných. Klimatická zmena a globálne otepľovanie ovplyvňujú fyzikálne procesy v atmosfére a my sme toho svedkami. Rozdielne správanie meteorologických javov (MP) je toho dôkazom. Táto štúdia má za cieľ analyzovať rozdiely v početnosti výskytu vybraných meteorologických javov pri porovnaní klimatologických normálov (CLINOs) 1991 – 2020 a 1961 – 1990. Pre účely výskumu sme vybrali 10 profesionálnych meteorologických staníc. Skúmanými javmi sú výskyt hmly, poľadovice, krupobití a búrky. Výsledky ukazujú pokles vo výskyte krupobití na 8 z 10 sledovaných staníc a tiež nárast výskytu poľadovice na 9 z 10 sledovaných staníc. Najvyšší nárast výskytu hmly sme zo sledovaných staníc zaznamenali na horských staniách – Chopku a Lomnickom štíte. Obe vysokohorské stanice, Chopok a Lomnický štít, zaznamenali taktiež nárast výskytu búrok na stanici. Detekcia týchto zmien môže pomôcť v prevencii rizika prírodných hrozieb, možných škôd na hospodárskych aktivitách a tiež môže pomôcť v adaptácii na zmenené podmienky prostredia.

Key words: meteorological phenomena, fog, glaze, hail, thunderstorm, climatological normal

INTRODUCTION

Present climate change affects various meteorological variables as air temperature, precipitation patterns and other. Changes are visible especially when longer period is taken into account. The research of meteorological phenomena changes in time and space is less frequent than most important basic meteorological variables like air temperature or precipitation. However, the research of the meteorological phenomena is important due to their potential negative impact on the society, especially particular sectors, e.g. impact of fogs and glaze on transport, impact of thunderstorms and hails on agriculture etc. Among the papers dealing with this kind of topic, the most frequent is the climatological analysis of thunderstorms, e.g. Kunz et al. (2009) in south-western Germany or Vose et al. (2014) in United States coastal regions. Sometimes the research of thunderstorm climatology is coupled with other phenomena, like hail (Allen et al., 2011), glaze and hail (Changnon, 1968). Further, we can mention works dealing with glaze and/or freezing rain climatology, e.g. Bezrukova et al. (2006) in Russia, Gay and Davis (1993) in south-eastern United States. Papers describing fog climatology or trends in fog occurrence are described e.g. by Avotniece et al.

(2015) on the territory of Latvia or Cséplő et al. (2019) on Hungarian meteorological stations. In this paper we present the comparison of meteorological phenomena normals between present normal period 1991 – 2020 and previous normal period 1961 – 1990 in order to find out how the changing climate affects frequency and spatial distribution of meteorological phenomena.

MATERIAL AND METHODS

In this paper we present the comparison of meteorological phenomena normals between present normal period 1991 – 2020 and previous normal period 1961 – 1990. Meteorological normals serve as reference values of meteorological variables and can be used in monitoring, process of planning etc. Therefore the society can prepare for weather influences, climate oscillation, climate change etc. The Slovak Hydrometeorological Institute (SHMÚ) publishes meteorological normals in compliance with the methodology presented in the manuals of World Meteorological Organization (WMO 2017, 2018). The normal period 1991 – 2020 represents fourth generation of normal periods after periods 1901 – 1930, 1931 – 1960 and 1961 – 1990.

The data for creation of the normal values are extracted from meteorological database of SHMÚ, originally 78 stations which met the WMO criteria of completeness were processed for evaluation of meteorological phenomena (Národný klimatický program SR, 2023). For the purposes of this paper, we selected 10 stations (Fig. 1, Tab. 1) with emphasis on the presence of professional observation, that is only on part of the stations, distribution across the whole country and across various altitudes, from lowland stations e.g. Hurbanovo (115 m a.s.l.) up to mountain stations, e.g. Lomnický štít 2633 m a.s.l. Finally, we selected four meteorological phenomena for further analysis – fog, glaze, hail and thunderstorm. The selected meteorological phenomena belong to the group of dangerous meteorological phenomena. The occurrence of fog, i.e. the presence of small water droplets or ice crystals near the earth's surface, causing a decrease in horizontal visibility below 1 km, is dangerous for all types of transport. Glaze, a layer of ice on objects and the earth's surface, which was formed by the freezing of raindrops and drizzle, is limiting factor for infrastructure and transport routes. Another two phenomena are associated with storm activity. One of the destructive phenomena is the occurrence of hail, which can destroy harvest on fields or trees, and it is risk for people's health and human property. The storm phenomenon in our processing includes a storm at the station and also a remote

storm. The storm, in addition to the already mentioned hail, is accompanied by atmospheric discharges, potentially strong winds and intense precipitation. It is dangerous for all kinds of human activity. In this article, only the number of days with the occurrence of individual phenomena was processed, i.e. their intensity was not evaluated, or multiple occurrences in one day. We digitised data from previous CLINO 1961–1990 (NKP SR, 2015) and subsequently processed the data from absolute frequency to average annual frequency and finally computed absolute and relative deviations between the two normal periods. We also used digital version of the newest CLINO 1991–2020 (NKP SR, 2023). Graphical outputs were created in ArcGIS Pro 3.1.2 software. Selected MP don't need any equipment to measure. Their observance depends strictly on subject dedicated to provide these observations. Slovak Hydrometeorological Institute (SHMÚ) provides 78 stations with MP observations. We chose just those 10 stations with professional staff to avoid possible gaps in observations because the majority of stations in the SHMÚ network have volunteer staff. However stations except Bratislava-letisko, Košice-letisko and Poprad have changed their period of observations from continuous 24 hour observations to limited period 06:30 till 21:00 CET. This change took place in 2000, thus this fact could affect some of the presented results for normal 1991–2010 (NKP SR, 2023).

Figure 1.
*Spatial distribution
of selected climatological
stations in Slovakia
used for the comparison
between CLINOs
1991–2020 and
1961–1990.*

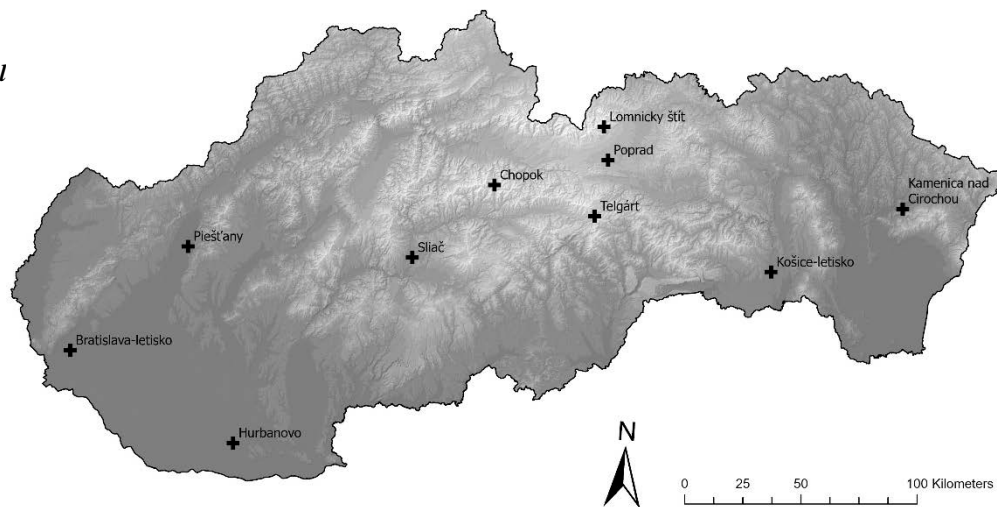


Table 1.
*Selected climatological
stations in Slovakia
used for the comparison
between CLINOs and
their coordinates
and altitude.*

number	indicative	station	x-sjtsk	y-sjtsk	elevation [m]	latitude	longitude
1	11816	Bratislava-letisko	-566058	-1278668	128	48.17028	17.20750
2	11826	Piešťany	-515344	-1234074	161	48.61306	17.83167
3	11858	Hurbanovo	-495941	-1318480	115	47.87250	18.19306
4	11903	Sliač	-418827	-1238812	310	48.6425	19.14194
5	11916	Chopok	-383440	-1207744	2005	48.94389	19.59222
6	11930	Lomnický štít	-336375	-1182764	2634	49.19528	20.21306
7	11934	Poprad	-334574	-1197046	693	49.06806	20.24944
8	11938	Telgárt	-340448	-1221138	900	48.84861	20.18917
9	11968	Košice-letisko	-264473	-1245053	229	48.67056	21.23861
10	11993	Kamenica nad Cirochou	-207790	-1218033	176	48.93472	21.99417

RESULTS AND DISCUSSION

Fog

Four of ten presented stations show decrease in fog occurrence, other six stations show increase. Decrease is present in western and central Slovakia except Bratislava-letisko

station and in the easternmost station used in this analysis – Kamenica nad Cirochou. Most significant increase in terms of absolute numbers can be observed in the mountain stations – Chopok with increase of 28.6 days and Lomnický štít with increase of 25.8 days (Fig. 2) followed by Bratislava-letisko station (+18.5 days).

Figure 2. Absolute difference in number of days with fog in selected stations between CLINOs 1991 – 2020 and 1961 – 1990

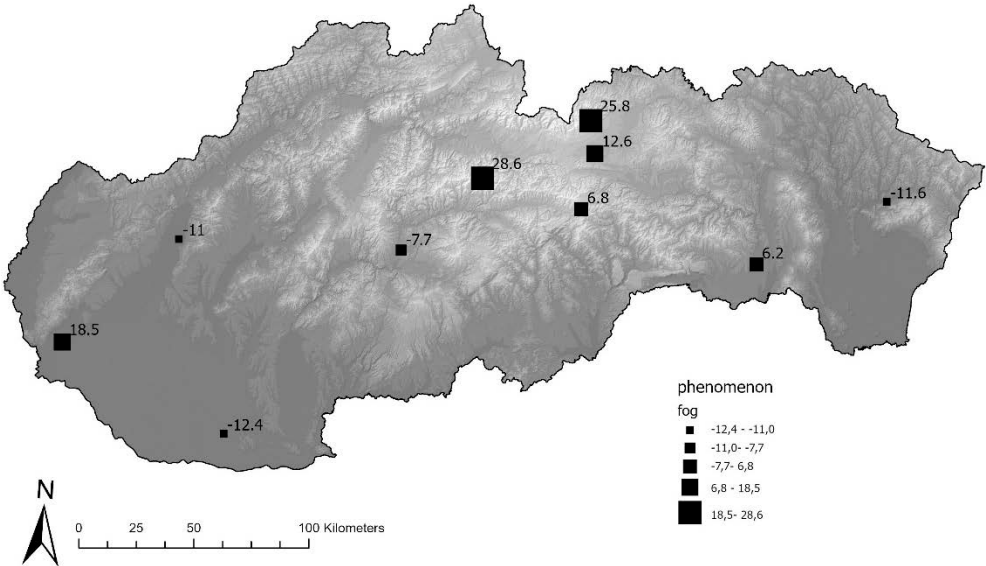
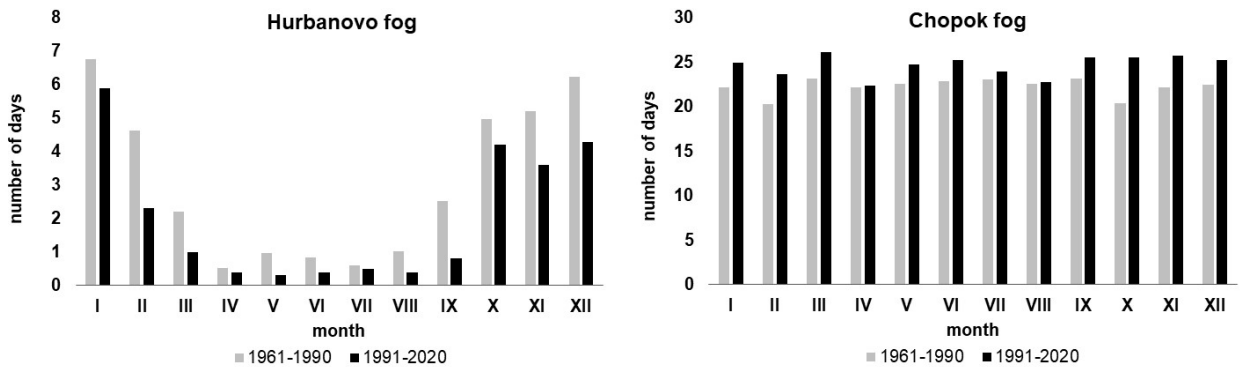


Table 2. Monthly change in number of days with fog between CLINOs 1991 – 2020 and 1961 – 1990 for selected stations.

indicative station	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Year
11816 Bratislava-letisko	-0.2	-0.1	0.6	2.1	1.9	1.5	1.8	1.9	3.2	3.7	1.3	0.7	18.5
11826 Piešťany	-1.8	-0.9	-1.8	0.5	0.1	-0.7	-0.3	-0.2	-1.7	-0.7	-0.9	-2.4	-11.0
11858 Hurbanovo	-0.9	-2.3	-1.2	-0.1	-0.7	-0.4	-0.1	-0.6	-1.7	-0.8	-1.6	-1.9	-12.4
11903 Sliač	-0.7	0.9	-1.8	0.5	0.1	-1.4	-0.4	-2.0	-2.5	-0.6	0.2	0.0	-7.7
11916 Chopok	2.7	3.4	2.9	0.2	2.2	2.3	0.9	0.2	2.4	5.1	3.5	2.8	28.6
11930 Lomnický štít	1.9	2.2	2.3	1.7	2.7	2.0	1.9	2.0	2.6	3.6	1.6	1.3	25.8
11934 Poprad	2.4	-0.6	-1.1	0.1	0.8	2.0	2.5	1.9	1.2	1.0	1.5	1.1	12.6
11938 Telgárt	2.1	-0.6	0.7	-0.2	0.4	-0.4	0.2	0.1	0.0	1.0	1.4	2.1	6.8
11968 Košice-letisko	-0.9	-0.2	-1.5	0.5	1.2	0.8	1.2	0.4	1.9	2.3	0.1	0.3	6.2
11993 Kamenica nad Cirochou	-0.5	-0.4	-1.5	-0.3	-0.9	-1.0	-0.2	-3.9	-2.0	-0.1	0.6	-1.2	-11.6

Figure 3. The mean monthly number of days with fog in stations Hurbanovo and Chopok for CLINOs 1991 – 2020 and 1961 – 1990.



Glaze

We can see the increase of glaze phenomenon between normal periods on nine stations, only Chopok shows decrease. Highest absolute increase can be seen on Košice-letisko and Bratislava-letisko stations with 10.5 and 6.5 days per year respectively (Fig. 4, Tab. 3). Climate change can play role in increase of glaze phenomenon on the majority

of the stations, with generally warmer temperature in winter months and suitable conditions for freezing rain and glaze formation. Absolute values for CLINOs 1991–2010 and 1961–1990 on the stations Bratislava-letisko and Košice-letisko are presented on Fig. 5 showing changes of the phenomena – in case of Bratislava-letisko, highest increase is present in January and December, in case of Košice-letisko, highest increase is present in January and February.

Figure 4.
*Absolute difference
in number of days with
glaze in selected stations
between CLINOs
1991–2020 and
1961–1990.*

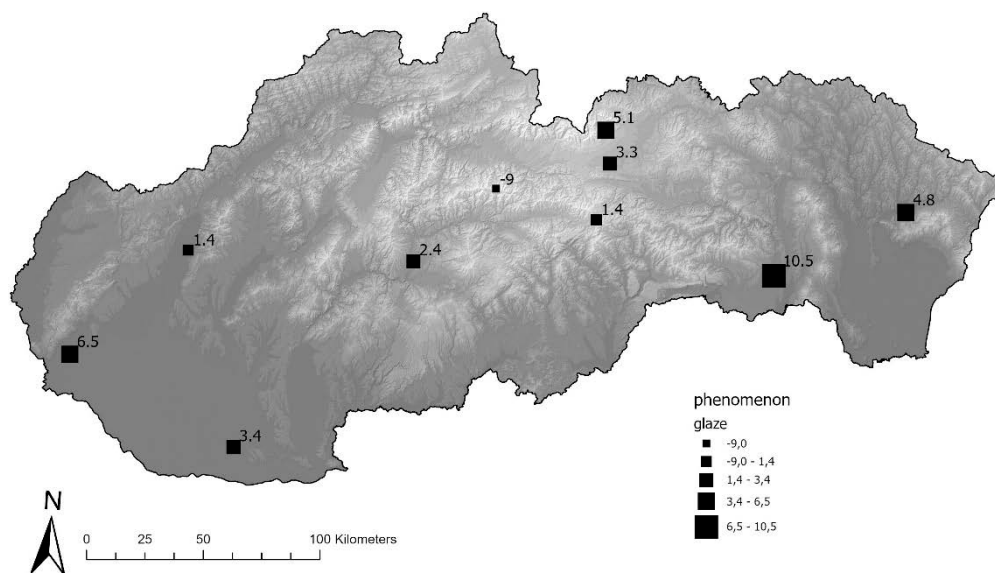
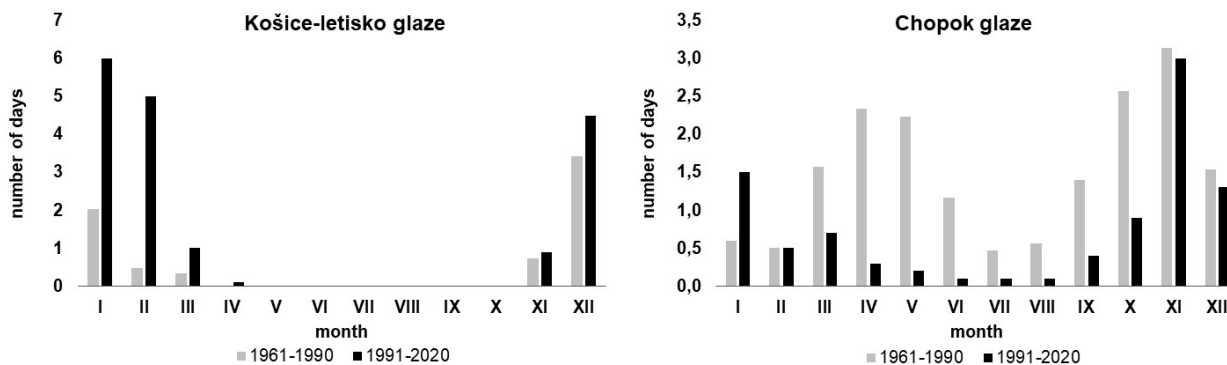


Table 3. *Monthly change in number of days with glaze between CLINOs 1991–2020 and 1961–1990 for selected stations.*

indicative station	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Year
11816 Bratislava-letisko	2.4	0.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	2.6	6.5
11826 Piešťany	1.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	1.4
11858 Hurbanovo	2.0	1.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.0	3.4
11903 Sliač	1.0	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	2.4
11916 Chopok	0.9	0.0	-0.9	-2.0	-2.0	-1.1	-0.4	-0.5	-1.0	-1.7	-0.1	-0.2	-9.0
11930 Lomnický štít	1.0	0.2	0.0	0.0	0.2	-0.1	0.1	-0.3	0.8	0.5	2.0	0.7	5.1
11934 Poprad	1.3	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.1	3.3
11938 Telgárt	0.4	0.2	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	-0.1	1.0	1.4
11968 Košice-letisko	4.0	4.5	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	1.1	10.5
11993 Kamenica nad Cirochou	1.9	1.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	4.8

Figure 5. *The mean monthly number of days with glaze in stations Košice-letisko and Chopok for CLINOs 1991–2020 and 1961–1990.*



Hail

The occurrence of MP hail is strictly connected with another convective cells, supercells and thunderstorms. Overall, we observed decreasing amount of hail incidence in 8 of 10 investigated climatological stations (Fig 6). Poprad is the only station with increase of hail (+0.1 days) and Piešťany station remains without change. The highest increase is in April and summer months at these stations in comparison between CLINOs 1991–2010 and 1961–1990 (Tab. 4). Station Poprad gained increase by 10.5% and Lomnický štít 7.6% per year in average. On the other hand, the highest decrease in days with hail appeared at the station Sliač with

relative frequency value -57.1% in average. We could assume that increasing number of days with hail in the High Tatras Region are connected with prevailing wind direction from north-west, increasing trend in precipitation amount, convective situations and lower level of 0°C isotherm during spring and early summer months (Łupikasza and Szypuła, 2019). Decreasing amount of days with hail in the rest of selected stations could be explained by leeward effect of Tatras Mountains during prevailing north-west situations and different morphology conditions in lowland areas. Absolute values for CLINOs 1991–2010 and 1961–1990 on the stations Bratislava-letisko and Košice-letisko are presented on Fig. 7.

Figure 6.
Absolute difference in
number of days with hail
in selected stations
between CLINOs
1991–2020 and
1961–1990.

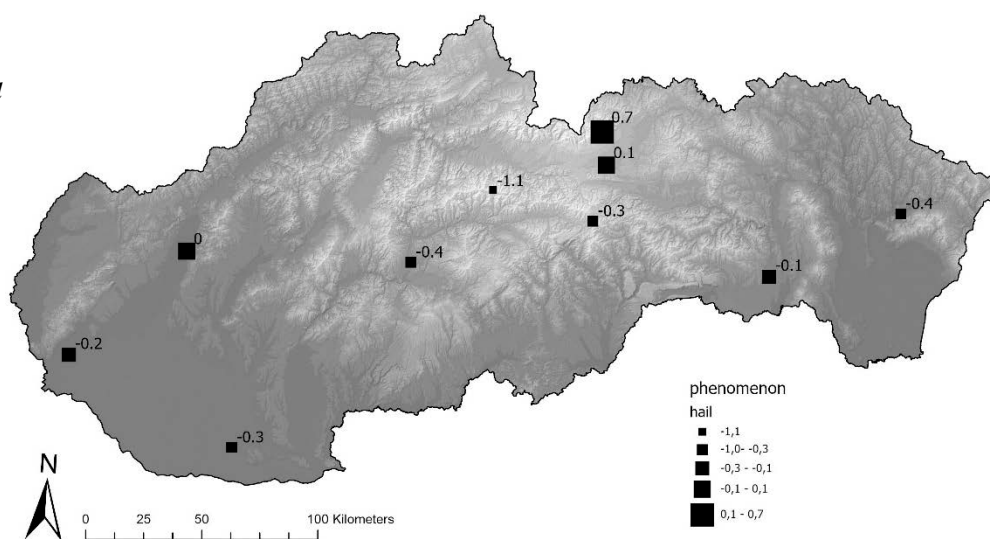
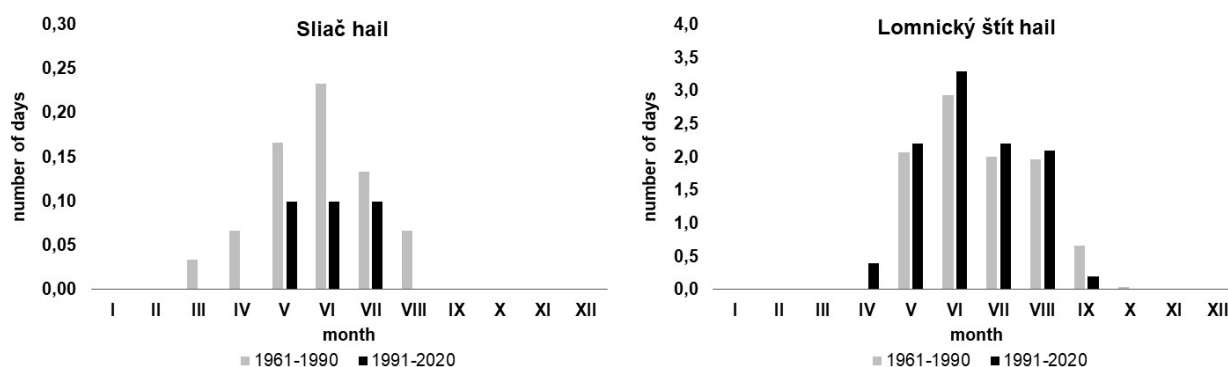


Table 4. Monthly change in number of days with hail between CLINOs 1991–2020 and 1961–1990 for selected stations

indicative	station	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Year
11816	Bratislava-letisko	0.0	0.0	-0.1	0.0	0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2
11826	Piešťany	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
11858	Hurbanovo	0.0	0.0	0.2	-0.2	-0.2	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.3
11903	Sliač	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.4
11916	Chopok	0.0	0.0	0.0	0.2	-0.3	-0.1	-0.2	-0.1	-0.5	0.0	0.0	0.0	-1.1
11930	Lomnický štít	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	0.4	0.2	0.1	-0.5	0.0	0.0	0.0	0.7
11934	Poprad	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	0.3	0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
11938	Telgárt	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	-0.3
11968	Košice-letisko	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1
11993	Kamenica nad Cirochou	0.0	0.0	0.1	-0.1	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.1	0.0	-0.4

Figure 7. The mean monthly number of days with hail in stations Sliač and Lomnický štít for CLINOs 1991–2020 and 1961–1990.



Thunderstorm

Various MP are strictly connected, and their incidence is usually synchronic. That is also an example of strong relationship between convective phenomenon and hail. Throughout our study we observed rising amount of days with thunderstorms at the same stations as it was for hail occurrence during CLINO 1991–2020 (Fig. 8, Tab. 5). The stations with highest increase of thunderstorms are situated in mountainous environment and characterized by higher altitudes, namely Lomnický štít (+5.1 days annually), Telgárt (+4.5 days annually) and Chopok (+3.2 days annually) (Fig. 9). Stations Poprad and Bratislava-letisko noticed increase by less than one day. When we looked at the correlation between altitude of station and rising amount of days with thunderstorm we found linear trend with $R^2=0.68$ and exponential trend $R^2=0.76$. Although it is relatively strong correlation it is necessary to study that relationship more precisely with higher amount of available stations. On

the other hand, stations located in lowland areas noticed decreasing amount of thunderstorms in the new CLINO. Hurbanovo station (−6.1 days) and Piešťany (−7.6 days) observed the biggest drop in this MP. This can be caused by the change in observation regime from 24 hours to 6:30 CET till 21:00 CET in the year 2000 on these stations (NKP SR, 2023). Seasonal and monthly changes in thunderstorm regime are shown in Fig 9. Mountainous stations Lomnický štít and Chopok observed similar increase in number of days with thunderstorm during summer months June, July and August. The steepest increase appeared in July on the both stations where Lomnický štít peak gained +42.2% and Chopok 55.4% more days with thunderstorm. It is in agreement with Lukasová et al., where they found out the highest increase in precipitation in July (+45.5 mm) in comparison of CLINOs 1991–2010 and 1961–1990 on the Skalnaté pleso observatory situated under Lomnický štít. Lowland stations Hurbanovo and Piešťany observed the most significant decrease in May, June and August.

Figure 8.
Absolute difference in number of days with thunderstorm in selected stations between CLINOs 1991–2020 and 1961–1990.

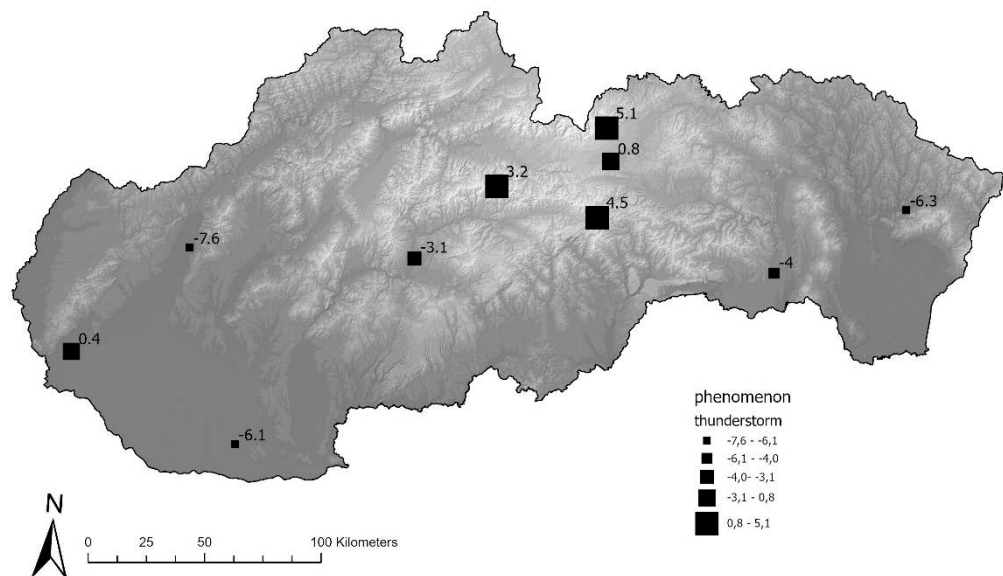
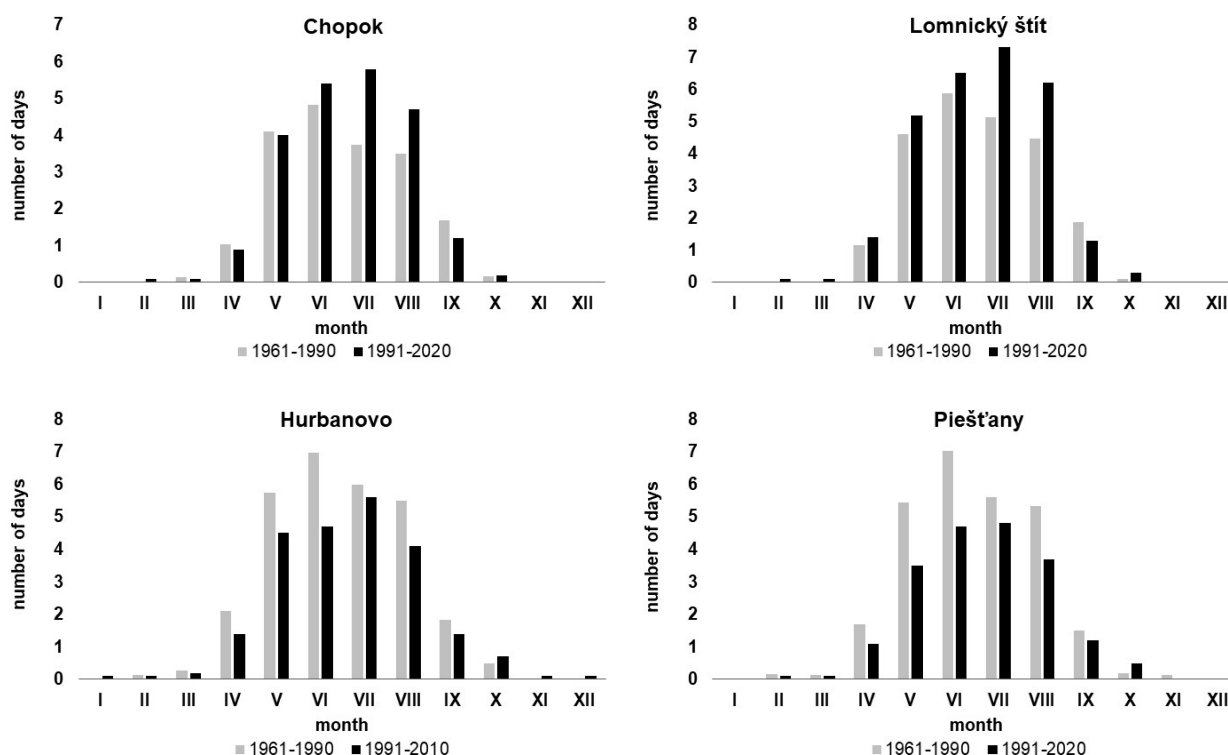


Table 5. *Monthly change in number of days with thunderstorm between CLINOs 1991–2020 and 1961–1990 for selected stations.*

indicative	station	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Year
11816	Bratislava-letisko	0.0	-0.2	0.2	0.0	-0.2	-0.8	1.4	-0.4	0.2	0.3	0.0	-0.2	0.4
11826	Piešťany	0.0	-0.1	0.0	-0.6	-1.9	-2.3	-0.8	-1.6	-0.3	0.3	-0.1	0.0	-7.6
11858	Hurbanovo	0.1	0.0	-0.1	-0.7	-1.2	-2.3	-0.4	-1.4	-0.4	0.2	0.1	0.1	-6.1
11903	Sliač	0.1	-0.2	-0.1	-0.3	-1.5	-1.5	1.1	-0.4	-0.3	0.2	-0.2	-0.1	-3.1
11916	Chopok	0.0	0.1	0.0	-0.1	-0.1	0.6	2.1	1.2	-0.5	0.0	0.0	0.0	3.2
11930	Lomnický štít	0.0	0.1	0.1	0.2	0.6	0.6	2.2	1.7	-0.6	0.2	0.0	0.0	5.1
11934	Poprad	0.0	0.0	0.1	0.1	-0.8	-1.0	1.8	0.9	-0.7	0.3	0.0	0.0	0.8
11938	Telgárt	0.2	0.1	-0.1	0.2	0.2	0.4	1.9	1.5	0.2	0.2	-0.1	0.0	4.5
11968	Košice-letisko	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-1.1	-0.9	-0.1	-1.0	-0.6	-0.2	0.1	0.0	-4.0
11993	Kamenica nad Cirochou	0.0	0.0	-0.3	-1.2	-1.4	-1.7	-0.3	-0.8	-0.6	-0.2	0.1	0.1	-6.3

Figure 9. The mean monthly number of days with thunderstorm in stations Chopok, Lomnický štít, Hurbanovo and Piešťany for CLINOs 1991–2020 and 1961–1990.



CONCLUSION

In this paper we analyzed 4 meteorological phenomena and changes in their frequency during the two last normal periods in the selected group of 10 meteorological stations. From that point of view, the main results of our study for CLINO 1991–2020 can be highlighted by following statements:

- Hail occurrence decreased in all studied stations exclusive of Poprad and Piešťany.
- The highest increase in days with thunderstorm appeared in mountainous stations, Lomnický štít, Chopok and Telgárt especially in summer months (June, July, August),
- Lowland stations Hurbanovo and Piešťany detected decrease in days with thunderstorm mainly in May, June, August.
- Correlation between altitude of station and rising amount of days with thunderstorm found linear trend with coefficient of determination $R^2 = 0.68$.
- The highest increase in relative frequency of fog is on Bratislava-letisko (41.7%) and Poprad (27.8%), the highest increase in absolute numbers is in the mountain stations (Chopok with 28.6 days and Lomnický štít with 25.8 days).
- Number of days with glaze recorded increase in all stations despite of Chopok, the highest relative increase was recorded on Sliač, 184.6% for normal 1991–2020, the highest absolute increase was recorded on Košice-letisko with 10.5 days per year.

All the results mentioned above needs more detailed research with higher amount of stations to prove these statements. Moreover, paper related to this topic are very rare for the territory of Slovakia although meteorological phenomena are really important if we want to look at the changing climate relations to other variables. Therefore we hope, that our paper will be useful for the future investigation of changes in frequency of meteorological phenomena.

REFERENCES

- Allen, J.T.–Karoly, D.J.–Mills, G.A., 2011, A severe thunderstorm climatology for Australia and associated thunderstorm environments. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 61(3), 143.
- Avotniece, Z.–Klavins, M.–Lizuma, L., 2015, Fog climatology in Latvia. *Theoretical and applied climatology*, 122, 97–109.
- Bezrukova, N.A.–Jeck, R.K.–Khalili, M.F.–Minina, L.S.–Naumov, A.Y.–Stulov, E.A., 2006, Some statistics of freezing precipitation and rime for the territory of the former USSR from ground-based weather observations. *Atmospheric research*, 82(1-2), 203–221.
- Changnon, S.A., 1968, *Climatology of hourly occurrences of selected atmospheric phenomena in Illinois (Vol. 93)*. Department of Registration and Education, Illinois State Water Survey.
- Cséplő, A.–Sarkadi, N.–Horváth, Á.–Schmeller, G.–Lemler, T., 2019, Fog climatology in Hungary. *Időjárás - Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 123(2), 241–264.

- Gay, D.A.–Davis, R.E., 1993, *Freezing rain and sleet climatology of the southeastern USA*. *Climate Research*, 3(3), 209–220.
- Kunz, M.–Sander, J.–Kottmeier, C., 2009, *Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany*. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(15), 2283–2297.
- Lukasová, V.–Varšová, S.–Buchholcerová, A.–Onderka, M., Bilčík, D., 2023, *Changes in the high-altitude climate of High Tatra Mts. evaluated by climatic normals from the Skalná Pleso Observatory*. *Meteorologický časopis*, 26, 47–52.
- Łupikasza, E.–Szypuła, B., 2019, *Vertical climatic belts in the Tatra Mountains in the light of current climate change*. *Theoretical Applied Climatology* 136, 249–264, <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2489-2>
- Národný klimatický program SR, zv. 13, *Klimatologické normály za obdobie 1961–1990 na Slovensku*, MŽP SR, Bratislava, 2015, ISBN 978-80-88907-93-0.
- Národný klimatický program Slovenskej republiky, zv. 16/22, *Klimatologické a fenologické normály v období 1991–2020 na Slovensku*, MŽP SR, Bratislava, 2023, ISBN 978-80-99929-35-8
- Vose, R.S.–Applequist, S.–Bourassa, M.A.–Pryor, S.C.–Bart-helmie, R.J.–Blanton, B.–Bromirski, P.D.–Brooks, H.E.–DeGaetano, A.T.–Dole, R.M.–Easterling, D.R.–Jensen, R.E.–Karl, T.R.–Katz, R.W.–Klink, K.–Kruk, M.C.–Kun-kei, K.E.–MacCracken, M.C.–Peterson, T.C.–Shein, K.–Thomas, B.R.–Walsh, J.E.–Wang, X.L.–Wehner, M.F.–Wuebbles, D.J.–Young, R.S., 2014, *Monitoring and understanding changes in extremes: Extratropical storms, winds, and waves*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(3), 377–386.
- World Meteorological Organization, 2017: *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals (WMO/TD-No. 1203)*. Geneva.

INFORMÁCIE INFORMATION

MEDZINÁRODNÁ KALIBRÁCIA BREWEROVÝCH OZÓNOVÝCH SPEKTROFOTOMETROV V GÁNOVCIACH

Na pracovisku Slovenského hydrometeorologického ústavu, v Aerologickom a radiačnom centre (ARC) Gánovce, sa denne pripravujú informácie o stave ozónovej vrstvy a v letnom období aj o slnečnom ultrafialovom (UV) žiarení pre územie Slovenska. Stanica v Gánovciach je jediná svojho druhu na našom území a tieto informácie sa pripravujú na základe meraní celkového atmosférického ozónu a slnečného UV žiarenia, ktoré sa uskutočňujú pomocou Brewerovho ozónového spektrofotometra už 30 rokov.

Brewerov ozónový spektrofotometer (Brewer) bol pôvodne navrhnutý v Environment and Climate Change Canada (ECCC) v sedemdesiatych rokoch minulého storočia za účelom monitorovania celkového atmosférického ozónu. Do globálnej ozónovej siete bol tento moderný

prístroj zavedený v roku 1982 a stal sa štandardným nástrojom na monitorovanie celkového ozónu v programe Globálneho sledovania atmosféry (GlobalAtmosphereWatch, GAW) pri Svetovej meteorologickej organizácii (WMO). Do roku 2021 bolo vyrobených viac než 230 Brewerových prístrojov. Na zabezpečenie kvality ozónových meraní sa udržiava tzv. kalibračný reťazec, t.j. najprv sa referenčné prístroje nezávisle absolútne kalibrujú a potom sa kalibrácia preniesie z referenčného prístroja na pohyblivý - cestovný etalón a následne z tohto etalónu do staníc s Brewerovými prístrojmi. ECCC udržiava svetové referenčné Brewerove spektrofotometre od osemdesiatych rokov 20. storočia na poskytovanie prenosnej kalibrácie. Svetovým ozónometrickým štandardom pre spektrofotometre s jednoduchým monochromátorom sú prístroje typu Mark II so sériovými výrobnými číslami 008, 014 a 015, ktoré tvoria svetovú Brewerovu referenčnú triádu (BrT) a začali svoju činnosť v kanadskom Toronte v roku 1984. V deväťdesiatych ro-



koch bol Brewerov prístroj zmodernizovaný na typ Mark III, ktorý má už dva monochromátory pre zníženie vnútorného prístrojového rozptýleného svetla. V roku 2013 bola vytvorená svetová referenčná triáda double-Brewer (BrT-D) a tvoria ju prístroje so sériovými číslami 145, 187 a 191. Absolútna kalibrácia prístrojov triády Langley metódou sa uskutočňuje na observatóriu v Mauna Loa na Havajských ostrovoch. Tento rok sa však konala pre zvýšenie sopečnú aktivitu na Kanárskych ostrovoch. Podľa doporučenia WMO majú byť ozónové spektrofotometre v medzinárodnej sieti podrobené porovnávacej a kalibračnej procedúre najmenej raz za dva roky.

Existujú aj ďalšie Brewerovské triády. Triáda Arosa bola vytvorená a je prevádzkovaná Švajčiarskym federálnym úradom pre meteorológiu a klimatológiu (Meteo Swiss). Založili ju v roku 1998 a bola druhou triádou Brewerov na svete (zložená z dvoch prístrojov Mark II a jedného Mark III). Umiestnená je v Davose, vo Physikalisch-Meteorologisches Observatorium (Svetové radiačné centrum v Davose, PMOD). Ďalšia európska triáda RBCC-E bola vytvorená Štátnou meteorologickou agentúrou Španielska (AEMET) v roku 2003. Tvoria ju tri prístroje Mark III. V Španielsku sa nachádza Regionálne európske centrum pre kalibráciu Brewerových spektrofotometrov (RBCC-E).

Z praktického i ekonomického hľadiska sa kalibrácie s cestovným štandardom naraz zúčastňuje viacero prístrojov. Pre nás ich doteraz vykonáva kanadská firma International OzoneServices (IOS), referenčným prístrojom č. 017. Na konci júna tohto roku sa na našom pracovisku uskutočnila v poradí už 14. takáto spoločná kalibrácia Brewerových prístrojov za účasti odborníkov a vedcov zo španielskeho Tenerife, kanadského Toronta a prevádzkovateľov prístrojov

z Maďarska, Poľska a z nášho pracoviska v Gánovciach. Na našej stanici prevádzkujeme dva prístroje – Brewer č. 097 s jednoduchým monochromátorom (Mark IV) a Brewer č. 225 s dvojnásobným monochromátorom (Mark III). Počas kalibrácie sa uskutočnil seminár zástupcov národných radiačných centier zo strednej Európy. Alberto Redondas zo španielskej meteorologickej služby (RBCC), ktorý je zároveň členom Medzinárodnej ozónovej komisie (International OzoneCommission, IOC), informoval o možnostiach kalibračného centra španielskej meteorologickej služby pre Európu, ktoré sídli v observatóriu Izaña na ostrove Tenerife. Zároveň španielski kolegovia vo svojej prednáške oboznámili účastníkov kalibrácie s činnosťou a možnosťami európskej databázy EuBrewnet, ktorú prevádzkujú.

Aj výsledky poslednej spoločnej kalibrácie ukázali, že udržiavanie kvality meraní celkového atmosférického ozónu a UV slnečného žiarenia je veľmi náročné. Ale vďaka pravidelnej kalibrácii prístrojov poskytuje naša stanica v Gánovciach spoľahlivé údaje pre svetové databázy, mapové centrá i aktuálne každodenné informácie o stave ozónovej vrstvy a intenzite UV slnečného žiarenia pre verejnosť.

Mgr. Oliver Mišaga, ARC Gánovce

FAIRNESS LETNÁ ŠKOLA V BELGICKU - ANALÝZA ÚDAJOV MESTSKEJ MIKROKLÍMY

Počas prvého júlového týždňa (2. – 8. 7. 2023) sa na katedre fyziky a astronómie prírodovedeckej fakulty v Gante (Belgicko) konala letná škola výskumnej siete COST Action. COST Action je interdisciplinárna výskumná sieť, ktorá spája výskumníkov a inovátorov, aby sa venovali téme

Obrázok 1. Spoločná fotografia organizátorov a účastníkov na streche budovy fakulty, kde sa nachádza aj meteorologická záhrada.



podľa vlastného výberu. Akcie COST zvyčajne tvoria výskumníci z akademickej obce, verejných inštitúcií a iných relevantných organizácií alebo zainteresovaných strán. Európska spolupráca v oblasti vedy a techniky (COST) je financujúca organizácia na vytváranie výskumných sietí s názvom COST Actions. Tieto siete ponúkajú otvorený priestor pre spoluprácu medzi vedcami z celej Európy (i mimo nej), a tým dávajú impulz pre pokrok vo výskume a inovácii. Je otvorený pre všetky oblasti vedy a techniky, vrátane nových i vznikajúcich oblastí. Akcie COST ponúkajú inkluzívne, celoeurópske prostredie pre jednotlivcov všetkých úrovní seniority, aby mohli rozvíjať svoje profesionálne výskumné siete a zvyšovať svoju kariéru.

Hlavnou témou letnej školy bola „Analýza údajov mestskej mikroklimy“. Cieľom bolo podporiť účastníkov pri spracovaní a analýze vlastných súborov údajov o mestskej mikroklimě. Uprednostnili teda účastníkov, ktorí priniesli vlastný mestský dátový súbor. Všetky dobre preštudované mestské súbory údajov, ktoré ešte neboli skontrolované kvalitou, vrátane medzier, boli vítané. Súbor údajov, s ktorým som pracovala, pochádzal z automatických staníc. Spracovala som hodinové údaje teploty vzduchu. Mala som k dispozícii 2 mestské a 2 mimomestské stanice pre územie Bratislavy a jej okolie. Práca začala pripojením sa k vlastnému Disku (Google Drive) s notebookom Colab. Najprv sme museli dať údaje do správneho tvaru, aby načítanie údajov prebiehalo bezproblémovo.

Po menších úpravách sme načítali svoj súbor údajov na predpripravený skript v Google Colab. Google Colab je nástroj na písanie a zdieľanie kódu Python s možnosťou zarámovať kód do textu (známy ako Jupyter Notebook). Nasledovala časť kontroly kvality našich údajov. Zvolili sme jednotlivé kritériá, podľa ktorých by sme mohli zaradiť chýbajúce údaje do jednotlivých skupín. *Malý počet* (< 40) chýbajúcich hodnôt → chýbajúce pozorovania; *Veľký počet* (>=40) chýbajúcich hodnôt → medzera.

Vykonalí sme lineárnu interpoláciu, techniku ERA5 a hybridnú metódu. ERA5 je piata generácia reanalýzy ECMWF pre globálnu klímu a počasie za posledných 8 desaťročí. Údaje sú dostupné od roku 1940. Získali sme modelové dáta pre jednotlivé súradnice. Potom sme pokračovali v modelovaní dát pomocou modelu ERA5. Chýbajúce údaje sme vyskúšali vyplňaním pomocou modelu. Úplne na konci sme vyskúšali výpočet štatistiky, napr. priemery, zlomky krajinnej pokrývky okolo staníc. Vytvorili sme štandardné vlastnosti, napr. ročný cyklus, denný cyklus, mestský ostrov tepla.

Letná škola zahŕňala praktickú prácu v nasledujúcich témach: kontrola kvality a vyplnenie medzier z mestských meteorologických údajov; mapovanie prostredia v okolí našich staníc; od pozorovania po analýzu mestských tepelných ostrovov; porovnávanie mestských pozorovaní s údajmi z mestských klimatických modelov. Letná škola sa zameriava na praktické cvičenia s vlastným súborom údajov. Súčasťou programu boli aj prednášky, mestská klimatická prechádzka v meste Gent a exkurzia do Kráľovského meteorologického inštitútu Belgicka v Bruseli. Tam nám ukázali, ako funguje predpoveď počasia na území Belgicka.

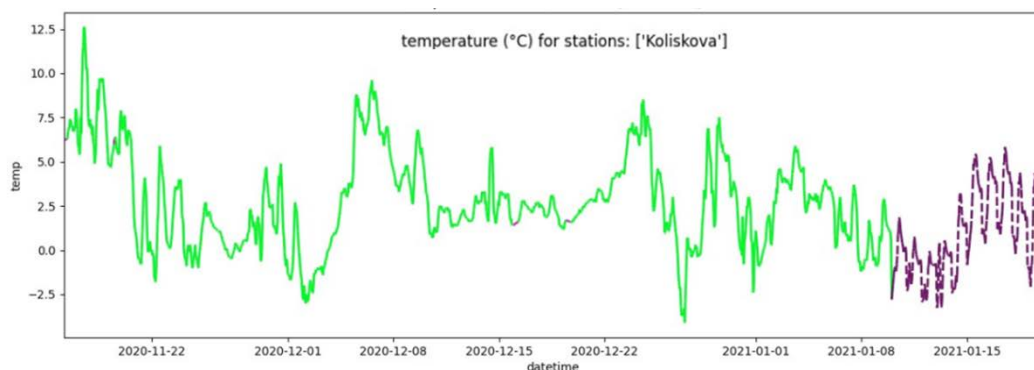
Uskutočnili sa veľmi zaujímavé prednášky a užitočné praktické lekcie o spracovaní a analýze údajov mikroklimatických súborov. Bolo veľmi inšpiratívne vidieť a dozvedieť sa, ako sa k mestskej klíme pristupuje z rôznych perspektív, ktoré zdieľali všetci účastníci. V neposlednom rade patrí veľká vďaka organizátorom za úžasnú prácu, láskavosť a trpezlivosť a účastníkom za úžasnú atmosféru. Toto podujatie bolo veľkým prínosom pri práci s meteorologickými a klimatologickými údajmi, lebo my ako Klimatologická služba tiež pracujeme s obrovským množstvom údajov a často sa stretávame s chýbajúcimi údajmi kvôli výpadkom.

Kristína Szabóová
SHMÚ, Bratislava

Obrázok 2. Ukážka skriptu (nahrávanie vlastných údajov).

```
[ ] your_dataset.fairness_coordinates_for_alaro_25_csv_creator(outputfolder = '....', #folder to save your metadata
filename = '.....csv', #filename ('YOUR_NAME metadata.csv' for example )
#Define the extend of the spatial model plot that will be prepared for you.
#If None, a tight-fit will be use.
lat_min= None, # minimum latitude of the extend
lon_min = None, # minimum longitude of the extend
lat_max = None, # maximum latitude of the extend
lon_max = None) # maximum longitude of the extend
```

Obrázok 3. Doplnenie chýbajúcich medzier v údajoch (fialová čiara) pomocou modelu ERA5.



CURRENT PROBLEMS IN HYDROLOGY - KONFERENCIA S MEDZINÁRODNOU ÚČASŤOU

Pri príležitosti 70. výročia založenia Ústavu hydrológie SAV, v. v. i. a 70. výročia založenia SAV zorganizoval Ústav hydrológie SAV, v. v. i. v spolupráci so Slovenským výborom pre hydrológiu, pod záštitou ministra ŽP SR a predsedu SAV prof. RNDr. Pavla Šajgalíka, DrSc. medzinárodnú konferenciu Current problems in hydrology – Aktuálne problémy hydrológie. Konferencia sa konala v priestoroch kongresového centra SAV v Smoleniciach v dňoch 27. až 29. 9. 2023. Konferencie sa zúčastnilo viac ako sedemdesiat registrovaných účastníkov z ôsmich inštitúcií z akademického a výskumného prostredia, ale aj z oblasti operatívnej hydrológie. Odborný program konferencie pozostával z viac ako dvadsať prednášok od významných hydrológov, aj PhD študentov. Slovenský hydrometeorologický ústav na podujatí zastupoval jeho generálny riaditeľ RNDr. Martin Benko, PhD, riaditeľka Úseku hydrológie Ing. Jana Pórová, PhD., vedúca Odboru hydrologické predpovede a výstrahy Ing. Danica Lešková, PhD. a viacerí pracovníci Úseku hydrologickej služby a Odboru hydrologické predpovede a výstrahy.

Počas druhého dňa konferencie boli v dopoludňajšom bloku prezentácií prednesené témy z prostredia operatívnej a aplikovanej hydrológie. Prvá z nich sa zaoberala problematikou príravných povodní, pod názvom „Metóda operatívnej detekcie príravných povodní využitím meteorologických radarov ako podkladu pre vydávanie hydrologických výstrah“ (M. Bírová, P. Smrtník, L. Méri a V. Wendová). Včasná predpoveď a varovanie pred rýchlou povodňou sa v našich podmienkach stáva čoraz prioritnejšou témou a podlieha neustálemu vývoju. Druhým prezentovaným príspevkom bol „Hydrologický predpovedný systém SHMÚ“ (D. Lešková a H. Hlaváčiková). Jeho obsahom bola rekapitulácia tvorby nového zázemia pre činnosť hydrologických modelov na Odbore hydrologické predpovede a výstrahy. Ďalšia prednesená prezentácia sa venovala Európskemu predpovednému varovnému systému EFAS, ktorého je SHMÚ súčasťou, a to prostredníctvom aktívnej participácie v jednom z operačných centier, s názvom „Novinky v Európskom povodňovom varovnom systéme EFAS“ (M. Halaj, H. Hlaváčiková a M. Mikuličková). V poradí štvrtá prezentácia v rámci dopoludňajšieho bloku mala názov „Problémy pri výbere nového referenčného obdobia“ (L. Blaškovičová, K. Jeneiová, K. Kotriková, E. Lovássová, K. Melová a S. Liová). Poukázala na zložitosť výberu vhodného referenčného obdobia v podmienkach meniacej sa klímy. Posledná prezentácia v rámci dopoludnia bola na tému eliminácie neistôt v hydrologických modeloch v podmienkach SHMÚ – „Analyses of precipitation input data for the hydrological forecasting system of SHMU“ (H. Hlaváčiková). Téma bola spracovaná aj formou posteru a umiestnená v posterovej sekcii počas trvania konferencie. V tejto sekcii bol vystavený aj poster venujúci sa analýze povodňovej situácie v máji 2021 v povodí Hrona – „Case study: Assessment of radar-based and ground precipitation data during the flood situation in may 2021 in the upper Hron river basin in Slovakia“ (H. Hlaváčiková, K. Hrušková).

Martin Halaj, SHMÚ, Banská Bystrica

A BRIEF COMMENTARY OF HOW THE RECENT 2022 TONGA–HUNGA HA'APAI VOLCANO ERUPTION, THE 1908 TUNGUSKA METEORITE EVENT, AND 1961 TSAR BOMB TEST AFFECTED AIR PRESSURE IN SLOVAKIA

This brief commentary aims to describe the observed subtle air pressure anomalies triggered by three events: the 2022 eruption of the Tonga-Hunga volcano, the Tunguska (Siberia) meteorite explosion of 1908, and the Tsar Bomb nuclear test of 1961. Microbarometric traces of anomalous air pressure signals observed at the geophysical observatory in Hurbanovo, providing evidence for the Tunguska event and the Tsar Bomb test, are presented for the first time. In addition, a detailed analysis of the recent Tonga-Hunga eruption is presented as well. The Tonga-Hunga Ha'apai volcano is situated in the South Pacific Tonga archipelago. Its eruption on January 15–16, 2022, was an extraordinary event that released an energy equivalent to the explosion of 59–63 megatons of TNT (Villalonga et al., 2023). The volcano eruption had a global impact on atmospheric pressure, leading to subtle pressure anomalies circulating the globe multiple times (Liu et al., 2023; Villalonga et al., 2023; Buric et al., 2022; Amores et al., 2022). The explosive eruption released significant energy, generating Lamb waves that efficiently transmit energy over long distances with minimal losses, exhibiting purely horizontal motion throughout the troposphere, with minimal sensitivity to Earth's rotation, and traveling close to the speed of sound. For an isothermal troposphere, the phase velocity of the Lamb waves is affected by the air temperature (Amore et al., 2022).

The data we used to analyze pressure anomalies triggered by the Tonga-Hunga eruption were extracted from the databases of the Slovak Hydrometeorological Institute. A total of 44 automatic meteorological stations across Slovakia were used, covering the period from January 15 to 16, 2022, with a sampling interval of 1 minute. Additionally, historical microbarographic records displaying pressure waves from the Tunguska and Tsar Bomb events were obtained from the archives of the Earth Science Institute, Slovak Academy of Sciences.

Nevertheless, the Tonga-Hunga eruption of January 15, 2022, is not the first occurrence of detecting atmospheric pressure anomalies following a significant distant explosion, as our archival research shows. Several other series of pressure anomalies have been observed in the central European region in the past (e.g. the Krakatoa volcano eruption of 1883, the Tunguska meteorite impact on June 30, 1908, and the detonation of the ~50–58-megatons thermonuclear 'Tsar' Bomb over the Novaya Zemlya region of the former Soviet Union on October 30, 1961). The Tunguska event, an approximately 12-megaton explosion near the Podkamennaya Tunguska River in Yeniseysk Governorate (now Krasnoyarsk Krai), Russia, occurred on the morning of June 30, 1908 (Farkas, 1962; Wexler & Hass, 1962). Our archival research shows that on the morning of June 30, 1908, the unique Sprung-Fuess' balance rolling-weight mercury (micro)barograph, which was installed at the geophysical and meteorological observatory in Hurbanovo (formerly Ögyalla/Stará Ľala; Babin et al., 2022),

reliably registered the primary pressure wave induced by the Tunguska Event (Whipple, 1934). The air pressure anomalies observed at the Hurbanovo station are depicted in Fig. 1. As indicated on the barograph chart, the wave amplitude reached almost 0.4 Torr (~ 0.5 hPa). In general, the wave parameters align with reports from other observatories using barographic measurements in the Central European region at that time (Süiring, 1930; Škreb, 1931; Whipple, 1934). The antipodal wave was observed at the Potsdam observatory in Germany on the morning of July 1, 1908 (Süiring, 1930). However, this second wave is not evident on the barograms from Hurbanovo and Zagreb (Škreb, 1931). After the massive Tsar Bomb explosion in the end of October 1961, three marked transitions of the pressure waves through Hurbanovo were detected thanks to the above-mentioned Sprung-Fuess' instrument (Fig. 2), with the primary wave-induced pressure anomaly reaching almost 1.2 Torr (1.6 hPa). In contrast to the nearest observation in Budapest, Hungary (Schenzl, 1884), there was no recorded signal from the colossal Krakatoa volcano eruption in 1883 due to the absence of barographic measurements at that time. The first barograph on the territory of present-day Slovakia was employed in March 1891 (Babin et al., 2022).

Identification of pressure anomalies in Hunga-Tonga eruption

We have analyzed subtle disturbances in air pressure induced by the Tonga–Hunga eruption through a comprehensive examination of air pressure series observed at 44 automatic weather stations in Slovakia. Spectral filtering was applied to remove the synoptic signal obtained from pressure time series, facilitating the isolation of local maxima (peaks) in the traces of pressure anomalies. Subsequently, the propagation of two pressure pulses was tracked and analyzed. The first impulse was associated with a positive pressure deviation, while the pressure deviation of the second pulse was negative. The average wave speed of the first pulse was approximately 304.52 m/s, below the speed of sound (331 m/s at 273 K). The wave speed varied from 302.6 m/s to 306.76 m/s, a variation that can be explained by gradients in the physical properties of the lower troposphere and orographic effects. The continuous wavelet transform was utilized to extract the traces of the pressure signal. Power spectra and their 95% confidence levels were computed from the original time series of atmospheric pressure with the Morlet waveform serving as the mother wavelet. The time series of air pressure anomalies presented in Fig. 3 are a result of high-pass filtering of the original time series with a cut-off frequency of 0.3 Hz. This involved zeroing the wavelet coefficients for frequencies above 0.3 Hz and subsequently reconstructing the signal from wavelet coefficients using the inverse wavelet transform. The timing of each atmospheric wavefront is illustrated in Fig. 3.

Figure 1. A section of the microbarographic record measured with the Sprung-Fuess barograph in Hurbanovo on June 30, 1908. The pressure anomaly from the Tunguska meteorite explosion is clearly noticeable at $\sim 6:00$ Local Mean Time (marked with a circle), i.e. at 5:47 Central European Time. One horizontal division corresponds to 10 minutes, one vertical division corresponds to air pressure of 0.1 Torr. The highlighted point value of 52.8 corresponds to the absolute pressure of 752.8 Torr.



Figure 2. The Tsar Bomb pressure anomalies (marked with arrows) detected at the Hurbanovo station, with the upper left panel showing data for 29–30 October 1961, the lower panel for 31 October 1961 and 1st November 1961. The passages of pressure waves are highlighted by arrows. One horizontal division corresponds to 10 minutes, one vertical division corresponds to air pressure of 0.1 Torr.

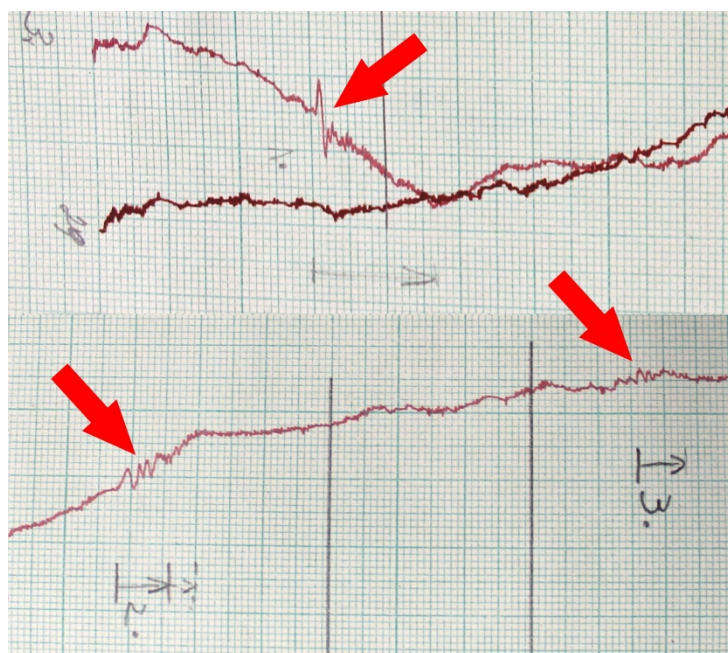
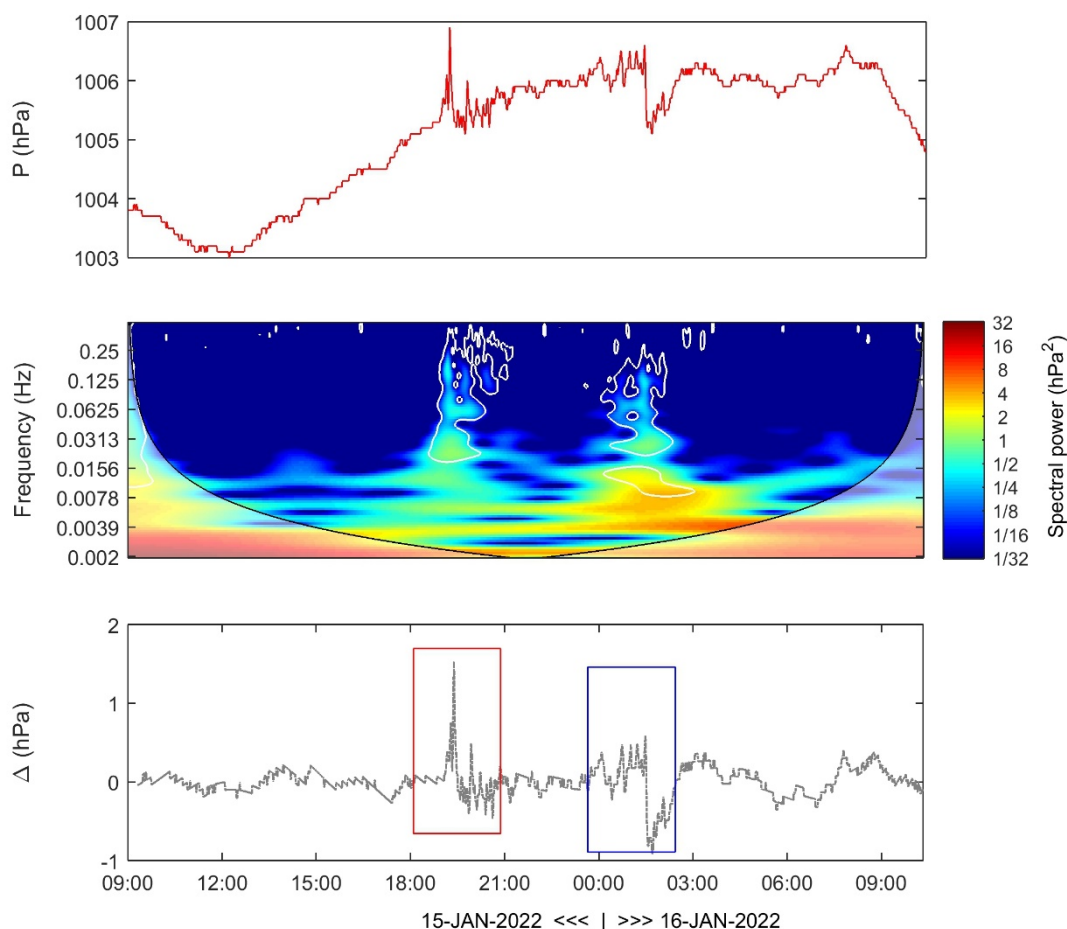


Figure 3. The raw signal of atmospheric pressure measured at the automatic meteorological station in Hurbanovo is shown in the upper panel. The middle panel displays wavelet power spectra. The lower panel presents the reconstructed pressure signal after applying a band-pass filter. Statistically significant regions of wavelet power are outlined by white contours. Notably, the 95% confidence level, depicted as white contours in the wavelet scalogram in Fig. 3, aligns with the passage of pressure anomalies.

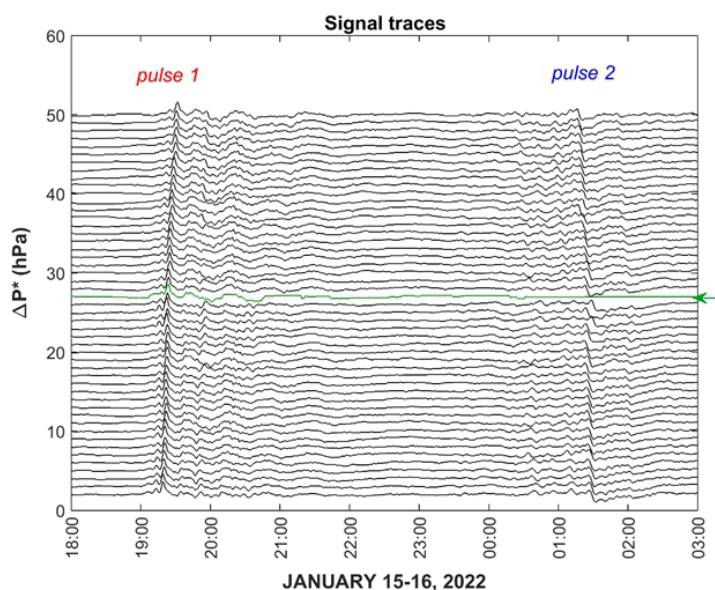


Wave speed

The shortest orthodromic distance between each individual meteorological station and the Hunga-Tonga volcano was determined following the procedure outlined in Burić et al. (2022). The antipodal point was observed by satellite observations in Northern Africa (Amores et al., 2022). The average wave speed of the first pulse was calculated using the shortest distance and the time elapsed from the eruption to the registration at the meteorological stations in Slovakia ($v = s/t$). The average orthodromic distance calculated between the Hunga-Tonga volcano and the 44 meteorological stations is 16.617 km.

The initial indication of a pressure pulse was identified around 19:20 UTC, approximately 15 hours after the eruption. The average wave speeds were computed for each of the 44 weather stations in Slovakia, resulting in an overall average of 304.95 m/s across the stations. The initial peak in air pressure, reflecting an increase of approximately 1 hPa/min, was recorded on January 15 at around 19:19 UTC.

Figure 4. Traces of pressure anomalies at the investigated sites. To enhance visual clarity, the traces are stacked into a single plot with a 1 hPa offset. The green arrow indicates a station with a pressure sensor malfunctioning during the second pulse, so the station was not able to detect the passage of the second wave.



This initial peak originated from the southward-propagating segment of the wave following the stronger eruption on January 15 at 04:15 UTC.

The first phase of the Hunga Tonga eruption was marked by a positive pressure deviation, while the second pulse exhibited a negative pressure deviation. The average wave speed of the first pulse was approximately 304.52 m/s, just below the speed of sound (331 m/s at 273 K). The wave speed fluctuated within the range of 302.6 m/s to 306.76 m/s, a variation attributable to gradients in the physical properties of the lower troposphere (mainly air temperature) (Amores et al., 2022). Further analysis of the synoptic meteorological situation during and preceding the arrival of the first pulse is needed.

References

- Amores A.–Monserat S. et al., 2022, Numerical simulation of atmospheric Lamb waves generated by the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption. *Geophysical Research Letters*, 49(6), e2022GL098240. DOI: 10.1029/2022GL098240.
- Babin, L.–Faško, P.–Henzel, D.–Lieskovský, T.–Pecho, J.–Výberčí, D., 2022, Collecting metadata of the 150-years long Hurbanovo atmospheric pressure series. *Meteorologický časopis*, 25, 119–130 [in Slovak].
- Burić, D.–Mihajlović, J.–Ducić, V., 2022, Anomalies of air pressure in Serbia as a result of the eruption of the volcano Hunga Tonga–Hunga Ha'apai in mid-January 2022. *Geosci. Lett.*, 9, 40. DOI: 10.1186/s40562-022-00248-5
- Farkas E., 1962, Transit of Pressure Waves through New Zealand from the Soviet 50 Megaton Bomb Explosion. *Nature*, 193(4817). DOI: 10.1038/193765a0
- Liu, H.-L.–Wang, W.–Huba, J.D.–Lauritzen, P.H.–Vitt, F., 2023, Atmospheric and ionospheric responses to Hunga-Tonga volcano eruption simulated by WACCM-X. *Geophysical Research Letters*, 50. DOI: 10.1029/2023GL103682
- Schenzl, G., 1884, Wirkung des Ausbruches des Vulkanes Krakatoa auf den Luftdruck in Budapest. *Mathematische und Naturwissenschaftliche Berichte aus Ungarn*, 2, 358–364 [in German].
- Süßing, R., 1930, Luftdruckwellen und leuchtende Nachtwolken infolge eines Meteorfalles. *Meteorologische Zeitschrift*, 47, 490–492 [in German].
- Škreb, S., 1931, Luftdruckwellen vom sibirischen Meteor. *Meteorologische Zeitschrift*, 48, 148 [in German].
- Villalonga, J.–Amores, À.–Monserat, S. et al., 2023, Observational study of the heterogeneous global meteotsunami generated after the Hunga Tonga–Hunga Ha'apai Volcano eruption. *Sci Rep*, 13, 8649. DOI: 10.1038/s41598-023-35800-6
- Wexler, H.–Hass, W.A., 1962, Global atmospheric pressure effects of the October 30, 1961, exImpacts of the Distant 2022 Tonga–Hunga Ha'apai Volcano Eruption, 1908 Tunguska Event, and 1961 Tsar Bomb Explosion on Local Air Pressure Anomalies. *Journal of Geophysical Research*, 67(10). DOI: 10.1029/jz067i010p03875
- Whipple, F.J.W., 1934, On phenomena related to the Great Siberian meteor. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 60, 505–522. DOI: 10.1002/qj.49706025709

Milan Onderka, Jozef Pecho, SHMÚ, Bratislava
Dalibor Výberčí, Kmeťovo

POKYNY PRE AUTOROV

Meteorologický časopis akceptuje príspevky napísané v anglickom, slovenskom a českom jazyku. Príspevky napísané v slovenskom a českom jazyku musia byť zaslané spolu s anglickou verziou názvu, abstraktu a anglických popisiek k obrázkom a tabuľkám. Autori môžu zaslať svoj príspevok priamo šéfredaktorovi časopisu na adresu milan.onderka@shmu.sk alebo technickej redaktorky na adresu katarina.pukancikova@shmu.sk. Meteorologický časopis neposkytuje autorom službu jazykovej korekcie. Odporúčame všetkým autorom publikujúcim v anglickom jazyku, aby si nechali skontrolovať príspevok rodeným hovorcom. Zaslané príspevky nesmú byť už publikované iným vydavateľom a ani nesmú byť v recenznom konaní v inom časopise. Obrázky musia byť očíslované tak ako vystupujú v texte. Obrázky musia byť zaslané v jednom z nasledovných grafických formátov: TIFF, JPEG alebo EPS. Minimálne požadované rozlíšenie obrázkov je 350 dpi. Tabuľky musia byť v editovateľnej forme.

AUTHOR'S INSTRUCTIONS

Manuscripts must be written either in English (American or British usage is accepted, but not a mixture of both), Slovak and Czech. Manuscripts written in the Slovak and Czech languages must have the title, abstract and figure/table captures written also in English. Authors are requested to send their manuscripts to the Editor-in-Chief (milan.onderka@shmu.sk) or the Assistant Editor (katarina.pukancikova@shmu.sk). The journal does not provide language correction services. All manuscripts written in English should be checked by a native speaker prior to submission. Submitted manuscripts should not have been published previously elsewhere nor be under consideration for publication elsewhere. Illustrations must be numbered according to their sequence in the text. Electronic artwork (images) must be submitted in one of the following formats: TIFF, JPEG, or EPS, with a minimal resolution of 350 dpi. Tables must be submitted as editable text.

