



**ACTA
FACULTATIS
FORESTALIS
ZVOLEN**

**65/2
2023**

TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE

Vedecký redaktor / Executive editor:
prof. Dr. Mgr. Jaroslav Ďurkovič

Výkonný redaktor / Managing editor:
doc. Ing. Martin Lieskovský, PhD.

Predseda redakčnej rady / Editor in Chief:
prof. Ing. Marek Fabrika, PhD.

Redakčná rada / Editorial board:
prof. h. c. prof. Dr. Ing. Viliam Pichler
doc. Ing. Peter Lešo, PhD.
prof. Ing. Iveta Hajdúchová, PhD.
prof. Ing. Ľubomír Scheer, CSc.
prof. Ing. Valéria Messingerová, CSc.
prof. Ing. Karol Ujházy, PhD.
prof. Ing. Peter Jaloviar, PhD.
prof. Ing. Jaroslav Škvarenina, CSc.

ACTA FACULTATIS FORESTALIS ZVOLEN 65 2/2023

Vydala Technická univerzita, T. G. Masaryka 2117/24, 960 01 Zvolen, IČO 00397440
Vydanie I. – december 2023

Rozsah 135 strán

Náklad 100 výtlačkov

Tlač a grafická úprava: Vydavateľstvo TU vo Zvolene

Rukopis neprešiel jazykovou úpravou.

Vydanie publikácie schválené Edičnou radou TU vo Zvolene dňa 27.2.2023, číslo EP 25/2023

Za vedeckú úroveň tejto publikácie zodpovedajú autori a recenzenti.

Periodikum s periodicitou dvakrát ročne.

Evidenčné číslo 3861/09

© Technická univerzita vo Zvolene

ISSN 0231-5785

Všetky práva vyhradené. Žiadna časť textu ani ilustrácie nemôžu byť použité na ďalšie šírenie akoukoľvek formou bez predchádzajúceho súhlasu autorov alebo vydavateľa.

OBSAH – CONTENTS – INHALT

Jaroslav VÍDO – Paulína NALEVANKOVÁ: INOVATÍVNE VZDELÁVANIE V SÚVISLOSTIACH NOVÝCH VEDECKÝCH POZNATKOV.....	7
Paulína NALEVANKOVÁ – Katarína STŘELCOVÁ – Miriam HANZELOVÁ – Ivan LUKÁČIK – Jaroslav VÍDO: TREE TRANSPIRATION AS AN IMPORTANT COMPONENT OF FOREST ECOSYSTEMS' EVAPOTRANSPIRATION: MONITORING AND EDUCATIONAL USE OF ONLINE DATA TRANSMISSION.....	10
Bernard ŠIŠKA – Matej ŽILINSKÝ – Petr ŠTĚPÁNEK – Zuzana GREŠTIK ORAVCOVÁ: PROJECTIONS OF WATER BALANCE CONDITIONS IN THE FUTURE CLIMATE FOR THE OAK ALTITUDINAL VEGETATION STAGE IN THE WESTERN CARPATHIANS	24
Jaroslav ROŽNOVSKÝ: TEPLOTA VZDUCHU, SRÁŽKY A SUCHO NA ÚZEMÍ ČR AIR TEMPERATURE, PRECIPITATION, AND DROUGHT IN THE CZECH REPUBLIC.....	39
Jaroslav ŠKVARENINA – Lenka BALKOVÁ – Janka LAFFÉRSOVÁ – Ilja VYSKOT: DYNAMIKA DVOCH PELOVÝCH SEZÓN RODU CORYLUS V PREDHORÍ STAROHORSKÝCH VRCHOV: REAKCIA NA ROZDIELNE METEOROLOGICKÉ PODMIENKY PROSTREDIA DYNAMICS OF TWO POLLEN SEASONS OF THE GENUS CORYLUS IN THE FOOTHILLS OF THE STAROHORSKÉ VRCHY MTS.: RESPONSE TO DIFFERENT METEOROLOGICAL CONDITIONS	51
Andrej KVAS – Ladislav ZELINKA – Ilja VYSKOT – Jaroslav VÍDO – Jaroslav ŠKVARENINA: BROWN HARE (LEPUS EUROPAEUS) AS A BIOINDICATOR OF CHANGES IN THE AGRICULTURAL LANDSCAPE IN THE CZECH REPUBLIC	65

Zbyšek ŠUSTEK: VYUŽITIE CHROBÁKOV ČELADE BYSTRUŠKOVITÉ (COLEOPTERA, CARABIDAE) V HODNOTENÍ STAVU A ZMIEN ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA.....	79
Miriam HANZELOVÁ : SNEŽNÉ RIASY A ICH ŠPECIFICKÝ EKOSYSTÉM SNEHOVÝCH POLÍ.....	91
Roman SITKO – Matúš PIVOVAR – Šimon SALOŇ – Roman KADLEČÍK – Miroslav SIVÁK – František CHUDÝ – Lubomír SCHEER – Daniel TUNÁK – Milan MISTRÍK – Zuzana PAROBEKOVÁ – Ivana SARVAŠOVÁ : KLASIFIKÁCIA DREVINOVÉHO ZLOŽENIA Z HYPERSPEKTRÁLNYCH A LiDAR ÚDAJOV POMOCOU METÓD STROJOVÉHO UČENIA.....	104
Peter VALENT – Julián TOMAŠTÍK – Šimon SALOŇ – Marek FABRIKA – Ján TUČEK – Milan KOREŇ – Miroslav KARDOŠ – Róbert SEDMÁK – Ján BAHÝE: ZOSTAVA FIELD-MAP AKO ZDROJ ÚDAJOV PRE RASTOVÝ SIMULÁTOR SIBÝLA.....	123

INOVATÍVNE VZDELÁVANIE V SÚVISLOSTIACH NOVÝCH VEDECKÝCH POZNATKOV

Jaroslav VIDO¹, Paulína NALEVANKOVÁ¹

VIDO, J., NALEVANKOVÁ, P.: Inovatívne vzdelávanie v súvislostiach nových vedeckých poznatkov, Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

ABSTRACT

The Technical University in Zvolen implemented the BioMeteorological Laboratory Online project (011TU Z-4/2021) from 2021 to 2023, aiming to integrate innovative educational methods with an emphasis on the interrelated issues of global changes affecting both terrestrial and aquatic ecosystems. This project sought to deepen students' understanding of complex environmental challenges and to enhance their decision-making skills relevant to natural resource management and environmental governance. It successfully combined online and physical interactive platforms with a robust knowledge base, including seminars and field excursions. The outcomes, detailed in a special issue of *Acta Facultatis Forestalis*, offer a resource-rich compendium of the latest research findings. The articles within provide insights into forest transpiration, climate change projections in the Western Carpathians, and the ecological impacts of societal changes on species distribution, among others.

Keywords: BioMeteorological laboratory on-line, Global Change, Ecosystem Dynamics, Environmental Decision-Making, Interdisciplinary Research

Editoriál

V rokoch 2021 až 2023 bol na pôde Technickej univerzity vo Zvolene riešený vzdelávací projekt 011TU Z-4/2021 s názvom BioMeteorologické laboratórium on-line, ktorý bol zameraný na vybudovanie inováčnej základne pre súvislostné vzdelávanie poslucháčov Technickej univerzity vo Zvolene v problematike komplexu prebiehajúcich globálnych zmien. Nie iba globálna klimatická zmena, no taktiež zmeny v energo-materiálových cykloch terestrických, či aquatických ekosystémov a v neposlednej rade dynamické zmeny socio-ekonomickej sféry vytvárajú veľmi zložitú mozaiku väzieb, vedúce k zložitému rozhodovaciemu procesu v otázkach riadenia prírodných zdrojov a životného prostredia, ktorým absolventi študijných odborov Technickej univerzity vo Zvolene čelia po nástupe na odborné miesta v štátnej správe, podnikoch ale aj v neziskovom sektore. Projekt BioMeteorologické laboratórium on-line si kládol pri svojom riešení za cieľ priblí-

žiť spomenuté komplexné systémy študentovi a to formou, kedy porozumie hĺbke problémov a pokúša sa tieto riešiť pod odborným dohľadom, samozrejme na úrovni aktuálneho poznania. Preto súčasťou riešenia projektu nebola iba realizácia webových a fyzických interaktívnych produktov a technických pomôcok ako metodologickej podpory vzdelávania, ale taktiež vytvorenie poznatkovej komplexnej bázy, ktorej súčasťou boli úspešne zrealizované semináre, odborné cvičenia, exkurzie a taktiež toto špeciálne číslo časopisu *Acta Facultatis Forestralis*, v ktorom sa nachádza veľké množstvo najnovších poznatkov, a v ktorom sa študenti, ale aj širšia odborná verejnosť zaujímajúca sa o v súčasnosti prebiehajúce komplexné zmeny ekosystémov dozvedia nie len o podstate problémov, ale taktiež nájdu aj viacero metodických návodov, ako tieto aspoň čiastočne uchopiť a riešiť.

V prvom príspevku tohto vydania Dr. Nalevanková a kolektív predstavujú metódu merania transpiračného prúdu lesných drevín s možnosťou prenosu dát do internetu. Venujú sa možnosti využitia merania vo vzdelávacom procese, ale taktiež pre vedecké potreby, napríklad pri stanovovaní transpirácie lesných porastov ako významnej časti terestrickej evapotranspirácie, pričom predstavujú aj riešený projekt BioMeteorologického laboratória.

Príspevok prof. Šišku sa komplexne zaoberá problematikou projekcie vývoja klimatickej zmeny v prvom lesnom vegetačnom stupni Západných Karpát.

Rozborom recentných klimatických charakteristík a predikcie tendencií ich vývoja na území Českej republiky pokračuje príspevok Dr. Rožnovského z Českého hydrometeorologického ústavu a Mendelovej univerzity v Brne.

Veľmi zaujímavým príspevkom, patriacim do skupiny aktuálnych prípadových štúdií na podklade premenlivosti poveternostných podmienok je článok prof. Škvareninu pojednávajúci o dynamike peľových sezón ako reakcii na rozdielnosť meteorologických podmienok.

Komplexný vplyv zmien ekológie krajiny a spoločenských zmien vedúcich k zmenám rozšírenia zajaca poľného v oblasti Moravského kraja prináša Dr. Kvas s kolektívom. Na tomto mieste musíme spomenúť, že článok je zároveň poďakovaním za dlhoročnú spoluprácu, pedagogické a vedecké pôsobenie zosnulého kolegu doc. Ing. Ladislava Zelinku, PhD. Databáza dlhoročných údajov, ktoré sám osobne zbieral a uchovával, tvorí základ tohto výnimočného vedeckého príspevku, ktorého vydania sa už autor, žiaľ, nedožil. Česť jeho pamiatke!

Ďalším ekologickým príspevkom je článok Dr. Šusteka z Ústavu zoológie Slovenskej akadémie vied, pojednávajúci o možnostiach využitia štruktúrnych charakteristík populácií chrobákov z čeľade bystruškovitých na bioindikáciu zmien prebiehajúcich v lesných ekosystémoch.

Ekologickou témou pokračuje aj príspevok Dr. Hanzelovej o možnostiach využitia snežných rias vyskytujúcich sa v snehu a pereniálnych snehových poliach vysokých pohorí Slovenska.

Veľmi zaujímavým technologickým príspevkom je článok kolektívu Dr. Sitka o možnostiach využitia diaľkového prieskumu a hyperspektrálnych snímok pri identifikácii drevinového zloženia sledovaných porastov.

Špeciálne vydanie časopisu uzatvára práca Dr. Valenta a kolektívu spoluautorov o možnostiach využitia zostavy Field-Map ako zdroja údajov pre porastový model SIBY-LA vyvinutý na pôde univerzity vo Zvolene.

Všetkým prispievateľom ďakujeme za spoluúčasť na vytvorení predkladaného čísla časopisu *Acta Facultatis Forestralis*. Veríme, že si ponúknuté zaujímavé články nájdu svojich čitateľov a budú tvoriť základ pre rozvažovanie nad komplexnými zmenami, ktorými súčasná krajina vzhľadom na globálne zmeny prechádza.

Podakovanie: Táto práca a vydanie tohto čísla časopisu bolo podporené prostriedkami z projektu KEGA č. 011TU Z-4/2021 s názvom Biometeorologické laboratórium on-line.

Kontaktná adresa:

¹Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen.

Kontaktný email: vido@tuzvo.sk

TREE TRANSPIRATION AS AN IMPORTANT COMPONENT OF FOREST ECOSYSTEMS' EVAPOTRANSPIRATION: MONITORING AND EDUCATIONAL USE OF ONLINE DATA TRANSMISSION

Paulína NALEVANKOVÁ, Katarína STŘELCOVÁ, Miriam HANZELOVÁ, Ivan LUKÁČIK, Jaroslav VIDO

NALEVANKOVÁ P., STŘELCOVÁ K., HANZELOVÁ M., LUKÁČIK I., VIDO J.: Tree transpiration as an important component of forest ecosystems' evapotranspiration: monitoring and educational use of online data transmission, Acta Facultatis Forestralis, Zvolen

ABSTRACT

With this contribution, we aim to present a newly built on-line biometeorological laboratory, that through a web application in a user-friendly way depicts or/and examines the response of physiological processes of plants (biological component of the landscape) and soil moisture characteristics to changes in environmental conditions (abiotic component) and its interactions in-situ in real-time. The project brings modern live streaming of processes taking place in woody plants – sap flow and stem circumference changes – and in the environment, as well as their reactions to changing atmospheric conditions directly to the user's mobile phone and computer. The main advantage of the online educational laboratory is the possibility to display and analyze current data, as well as the ability to work with historical data in a cloud environment without the need to install additional software. This makes the laboratory a unique interactive education tool for students of forestry or ecological disciplines and also for public users. Interactivity, online access, and cloud accessibility enhance the usability of the BioMeteorological laboratory in distance education, which significantly increases the efficiency and accessibility of the educational process, improves the level of awareness of functional relationships between physiological processes in the country and the weather, thus supporting system education.

Keywords: Sap flow, BioMeteorological laboratory, on-line, environmental conditions, education

INTRODUCTION

In most terrestrial ecosystems, evapotranspiration can account for over 50% of the total water loss and belongs to the primary water-loss components of the water cycle (Lu et al., 2003; Zheng et al., 2016). Plant transpiration is considered to be a major component of the terrestrial ecosystem evapotranspiration and represents a significant water loss term of the water balance (Jasechko et al., 2013). Approximately 39% of terrestrial precipitation returns to the atmosphere through transpiration, which accounts for 61% of evapotranspiration, on average. In addition, forest ecosystem transpiration can contribute 50–70% of terrestrial evapotranspiration (Jasechko et al., 2013, Schlesinger & Jasechko,

2014). Based on this information, we can conclude that most of the water evaporating from ecosystems passes through plant organisms, and its volume is regulated by these organisms (Kučera et al., 2016). This volume may vary depending on environmental conditions and plant species. Střelcová & Mindřáš (2000) reported that in the mid-mountain area of Poľana Mt. (850 m a.s.l., Central Slovakia, temperate forest), 35% of precipitation evaporates through transpiration in a mature beech stand, while for a spruce stand, they recorded a value of 30% (325 mm and 279 mm, respectively, out of 930 mm; Figure 1). In the study by Nalevanková et al. 2020, it is noted that in the locality Bienska dolina (450 m a.s.l., 3. oak-beech altitudinal forest zone, Central Slovakia, temperate forest), during months with no precipitation deficit, beech stand transpiration can account for as much as 80% of potential evapotranspiration. Conversely, in the driest months, stand transpiration may only contribute around 20% of potential evapotranspiration.

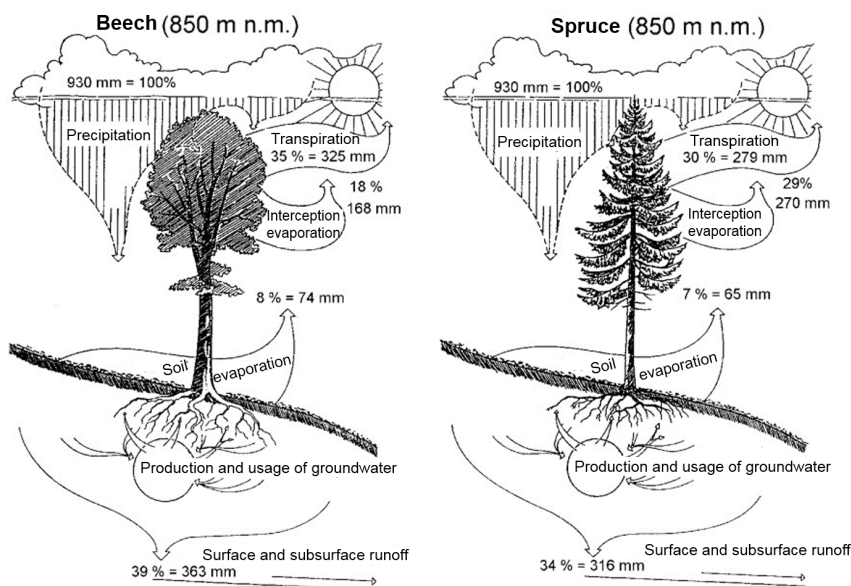


Fig. 1 Water cycle and water balance of a mature beech and spruce forest on the example of the mid-mountain location Poľana - Hukavský grúň (Střelcová & Mindřáš, 2000)

Transpiration can be estimated by utilizing sap flow monitoring. Hence, at a larger time scale (i.e., days and longer), the amount of water flow through the trunk is approximately equal to canopy transpiration (Kaufmann & Kelliher, 1991). In recent decades, several methods for the precise measurement of tree trunk sap flow have been developed and successfully applied in research (Čermák et al., 2004; Köstner et al., 2017). The measurement of sap flow is a highly useful tool to observe and investigate the impact of envi-

ronmental conditions, including extreme events such as drought, on forest water balance and its stress load (Betsch et al., 2011; De Swaef et al., 2015).

A detailed study of transpiration, its limitations, and the dynamics in connection to changing environmental conditions is crucial for understanding the impact of vegetation on hydrology its connection to ecological processes and can help improve ecosystem water balance modelling and to predict plant responses to climate change (Davi et al., 2005; MacKay et al., 2012; Jasechko et al., 2013; Köstner et al., 2017). Transpiration is influenced by the synergic effect of environmental factors, vegetation characteristics, and management (thinning, pruning) (Breda & Granier, 1996). The impact of environmental factors can be divided into atmospheric evaporative demands (potential evapotranspiration and vapor pressure deficit) and soil moisture, the lack of which is a limiting factor (MacKay et al., 2012; Eamus et al., 2013, Kirchen et al., 2017; Jiao et al., 2019; Lüttschwager & Jochheim, 2020). The main weather parameters that affect transpiration, together with crop characteristics and water supply, are radiation, air temperature, humidity, and wind speed. A common effect of these parameters can be expressed via the evaporation power of the atmosphere (potential evapotranspiration or reference crop evapotranspiration) (Allen et al., 1998).

Various climate scenarios predict, among others, a substantial change in precipitation distribution and in average temperatures, which can cause more prolonged and severe summer drought (Rowell & Jones, 2006; IPCC, 2018). A warmer atmosphere means increased evaporation demands and is accompanied by a lack of water supply, leading to an intensification of water-related plant stress (Centritto et al., 2011; Williams et al., 2013).

Physiological processes are sensitive indicators of plant stress, particularly under extreme environmental conditions (Centritto et al., 2011), because water deficit substantially limits their physiological activity (Chirino, Bellot, & Sánchez, 2011) and phytomass formation. The current plant water status reflecting the environmental conditions and expressed by transpiration or stem size variations denotes the current plant state, its stress load, and the impact of external environmental factors (Betsch et al., 2011; De Swaef, De Schepper, Vandegehuchte, & Steppe, 2015).

The project of online BioMeteorological laboratory focuses on the relationships in the soil-water-plant-atmosphere system. The main theme is the process of transpiration influenced by the synergistic action of internal but mainly external factors. Modern methods of physiological and meteorological monitoring and data transferring bring us the possibility to observe or/and examine the response of physiological processes of plants (a biological component of the landscape) and soil moisture characteristics to changes in environmental conditions (an abiotic component) and its interactions in-situ in real time 24 hours a day, 7 days a week.

METHODS

The measurements for the needs of the Biometeorological Laboratory are carried out in the “Arborétum Borová hora (ABH)” arboretum, which is an organizational part of the Technical University in Zvolen. ABH is located in the Middle Hron basin and extends on the southwestern spurs of the Zvolenská upland (Zvolenská pahorkatina) (Figure 2). The territory has the character of a hilly area with an altitude range from 291 m to 377 m.

Climatically ABH belongs to a warm area - a warm, slightly humid district with a cold winter (Lapin et al., 2002). Figure 3 shows the 1961–1990 reference period’s monthly averages (normals) of mean air temperature and precipitation totals for the area, calculated based on data from a nearby station belonging to a network of professional meteorological stations of the Slovak Hydrometeorological Institute. The long-term mean annual air temperature and annual sum of precipitation are 7.9 °C and 651 mm, respectively.



Fig. 2 Location of the Arboretum Borová hora, central Slovakia (Middle Europe)

In the first year of the measurements, we chose the mature *Betula Pendula* and *Malus domestica* as the sample trees. The determining factor for the choice was the short distance from the already-built meteorological station and fenced placement under supervision. Later, we added sap flow measurements on *Malus domestica* and measurements of meteorological parameters, soil water content, and temperature in the locality Margecany (East Slovakia). In the next years of the laboratory’s operation, we plan to extend the measurements to other individuals and different types of trees with various requirements for environmental conditions and reactions to extreme events.

Sap flow is measured on tree trunks by Sap Flow System EMS 81 developed by Environmental Measuring Systems, Ltd. (Brno, Czech Republic, Figure 4, Figure 5). The

system uses a tissue heat balance method (THB, Kučera et al., 1977; Čermák et al., 2004) based on volume heating of the stem segment to measure the values of volumetric sap flow. The output is sap flow in kilograms of water per a specific period and per centimeter of stem circumference (Tatarinov et al., 2004). To obtain sap flow per the entire stem/tree, the raw values of sap flow ($\text{kg h}^{-1} \text{cm}^{-1}$) are recalculated according to the corresponding circumference of the individual sample trees ($\text{kg h}^{-1} \text{tree}^{-1}$).

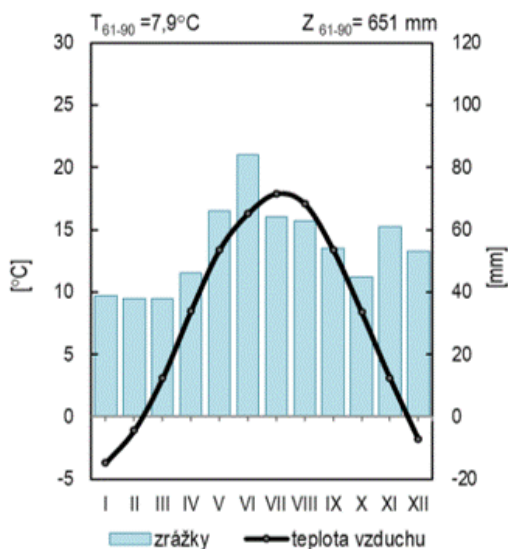


Fig. 3 Monthly averages (normals) of mean air temperature (blue bars, °C, T – annual average) and precipitation totals (line, mm, Z – annual sum) for Arborétum Borová hora, calculated based on reference period 1961–1990 data ([www.tuzvo.sk/Biometeorologický monitoring/ Arborétum Borová hora \(Zvolen\) \[353 m n. m.\]](http://www.tuzvo.sk/Biometeorologický_monitoring/Arborétum_Borová_hora_(Zvolen)_[353_m_n._m.]))

The sap flow is measured at 5-minute intervals and stored as hourly averages in datalogger and cloud storage space and is visualized on the Internet. Data storage and transmission are ensured by means of a datalogger and GPRS modem of a nearby meteorological station (Figure 6).

Used Sap Flow System EMS 81 with dendrometer DR26E is designed for trees with a stem diameter of 12 cm and more. The great advantage of the system is that the underlying theory of the system is clear with the absence of uncertain empirical parameters and without the need for field calibration (http://www.emsbrno.cz/p.axd/en/Sap.flow.system.EMS81.SDI_t_12.html; Tatarinov et al., 2005). The system consists of the SF 8X (SDI) controlling module, sap flow sensor SF 81, and a set of stainless steel electrodes. The controlling unit of the system maintains a pre-set (constant) temperature difference (used value 1 K) between a defined spatial sector of sapwood and reference probes (with an accu-

racy better than 1%) by electronic control using the variable electric heating power of the controller as the primary signal to quantify sap flux via the heat capacity of water (Köstner et al., 2017). The sapwood section is internally heated with alternating current (average power consumption 0.3–0.4 W by temperature difference 1 K) by three stainless steel plate electrodes 25 mm wide, 1 mm thick, and 60, 70 or 80 mm long. Three electrodes in series are inserted at a distance of 2 centimetres into the sapwood, passing through the xylem tissues. The fourth is the reference electrode placed 10 cm below. The central electrode is placed in a radial direction relative to the tree trunk, as shown in Figure 4. Thermosensor needles are then inserted into the geometric center of these electrodes to gauge temperature variances between the upper and lower electrodes. (Čermák et al., 2004; Köstner et al., 2017; Nalevanková et al., 2020). This method of volume heating provides a relatively stable temperature field, even when confronted with varying affected factors such as wood heat conductivity, sap flow radial profile, and temperature gradients. However, it's worth noting that this technique does demand relatively higher power consumption (Tatarinov et al., 2005). The method eliminates errors in measuring the dynamics of sap flow due to the principle of maintaining a constant temperature for the heated area (no time is required to reach a steady-state) (Kučera et al., 1977; Tatarinov et al., 2005).

The equation that describes the heat balance of the xylem is as follows:

$$P = Q_r dT c_w + dT z \quad (1)$$

where P is the power of heat input (W), Q_r is the amount of water passing through the heated volume (kg s^{-1}), dT is the temperature difference within the measuring point (K), c_w is the specific heat of water ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), and z is the coefficient heat losses from the measuring point (W K^{-1}).

Water passing through the measuring point is calculated from the power input and temperature rise of water passing through the heated space. The sap flow ($\text{kg s}^{-1} \text{cm}^{-1}$) calculation (Equation 2) is derived from Equation 1.

$$P = Q_r dT c_w + dT z \quad (2)$$

here d represents the effective width of the measuring point (5.5 cm), and z/c_w expresses heat losses from the sensor, which is set when Q is equal to zero (Kučera et al., 1977; Kučera, 2020, Nalevanková et al., 2020).

Each Sap Flow System is complemented by the dendrometer DRL26E (Environmental Measuring System, Ltd., Brno, Czech Republic). Dendrometers DRL26E with non-invasive fixing record seasonal circumference increment, but also reversible micro changes in stem circumference, which reflect the tree's water status or stress and are closely related to the transpiration process (Figure 5).

Meteorological variables are measured within an open area in Arborétum Borová hora by an automatic meteorological station (Figure 6) situating near the tree with sap flow measurements. The station is equipped with an air temperature (AT, °C; 0,5 m and 2 m above ground) and relative humidity (RH, %; 0,5 m and 2 m above ground) sensor and a global radiation (RS, W m⁻²; 10 m above ground) sensor (2x EMS33S and EMS11S; Environmental Measuring System, Ltd., Brno, Czech Republic). Wind speed (u, m s⁻¹) and direction is monitored using a ultrasonic anemometer Atmos 22 (Meter Group, Inc. Pullman, WA, USA) at a height of 10 m (2 meters in Margecany), and precipitation (P, mm) is measured using a rain gauge Pronamic Pro (Pronamic ApS, Skjern, Denmark) at a height of 1 m above ground. Soil temperature in two depths (0,15 and 0,3 m) is measured via RTDx2/S sensor manufactured by Environmental Measuring System Ltd. (Brno, Czech Republic). In addition, derived parameters such as vapor pressure deficit (Pa), potential evapotranspiration (PET, mm), dew point (°C), water balance PET 30D (mm), and fire index are listed. In the locality Margecany, the soil temperature and soil water content are measured at a depth of 20 cm.



Fig. 5 Installed Sap flow System in combination with measurement of tree trunk circumference changes and increment

The data is stored in 10-minute intervals in the N2N datalogger and is transferred to the cloud storage using a GPRS modem. All measured and derived data are visualized on the Technical University in Zvolen website (Biometeorologický monitoring) and are available to students and the general public 24 hours a day, 7 days a week

(http://www.emsbrno.cz/p.axd/sk/Arbor%C3%A9tum.Borov%C3%A1.hora._o_Zvolen_p_w_353.m_n_u_m_u_y_TUZVO.html). The measured data of selected physiological processes and accompanying environmental parameters are also displayed on the website www.biolab.sk. The site is currently under development, the content is constantly being added and improved. In addition to current data, it provides visitors with general as well as scientific information about the displayed parameters. It expands the reader's knowledge base about interactions in the soil-plant-atmosphere system.

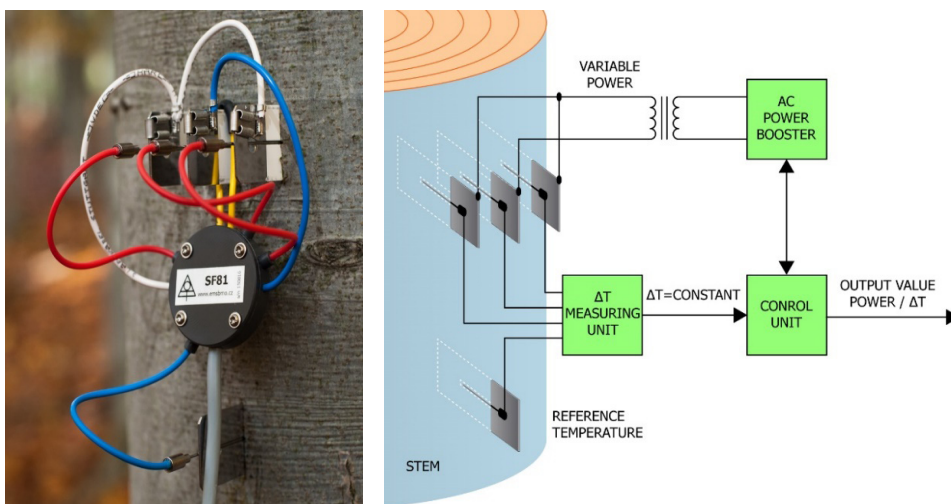


Fig. 4 Installed Sap flow System in combination with measurement of tree trunk circumference changes and increment



Fig. 6 Meteorological station situated in Arborétum Borová hora

RESULTS

As was mentioned above, all the measured and derived data are visualized on the website of Technical University in Zvolen (the section Biometeorologický monitoring (Bioclimatological monitoring) and www.biolab.sk and are available to students and the general public 24 hours a day, 7 days a week. With the web application users can combine various variables in graphs (sap flow, stem circumference changes, meteorological variables), choose an interval of visualization (day, week, month, year, ...) or the specific period, can check the recent or daily values, can see the quick overview, etc. (Figure 7, 8, 9). The application allows downloading the data from the archive in several formats for further processing (.dcv, .csv, .xlsx).

The next step will be to improve the visual interface and complete a separate application that will integrate all available measurements with online transmission in a user-friendly and user-attractive way and to increase the app's usability. The online Laboratory and the measurements in ABH allow students and other users not only to observe and evaluate the data by remote access but thanks to the location in ABH also to see the installation, measurements and get an interpretation directly in the field (Figure 10).

From a technical point of view, it is a unique real-time and evidence-based educational tool for foresters and ecologists, and from a didactic point of view, this laboratory increases the level of education in context, deepening students' understanding of functional relationships in ecosystems and thus provides support for more specialized subjects in higher years of study.

We plan to extend the measurements to other individuals and different types of trees with various requirements for environmental conditions and reactions to extreme events. At the same time, we plan to add soil water potential measurements to the presented monitoring system in ABH to show a soil water regime because water availability is the limiting factor of physiological processes.

The BioMeteorological Laboratory enables continuous analysis of interconnections in the soil-water-plant-atmosphere system. This has a major impact on the ability of students of forestry or ecological disciplines to effectively diagnose the causal relationship between weather, habitat conditions, and vegetation - woody plants.

Education based on relationships results in graduates being able to see deeper relationships and interactions after entering practice, and thus know-how to work effectively and implement appropriate management measures (landscaping, cultivation interventions, forest land reclamation, or increasing soil fertility, irrigation planning, etc.) in order to increase the resilience potential of ecosystems and overall ecological stability on the basis of scientifically validated facts. These skills can also be applied by stakeholders in practice.

The Online BioMeteorological Laboratory will be a modern and freely available tool for the support of interdisciplinary education, which will use the latest trends and technology, and thus will attract a wide range of not only students but also a diverse public.

Practical output is also free public access to current data and a clear graphical representation of the real dynamics of changes in soil moisture regime, which will be beneficial for the detection of periods with soil water deficit and drought episodes. Drought stress and the impact of other extreme events will also be demonstrable on the physiological response of selected samples. The significance of this output will be rather regional and usable, for example, for gardeners, farmers, or other land managers.

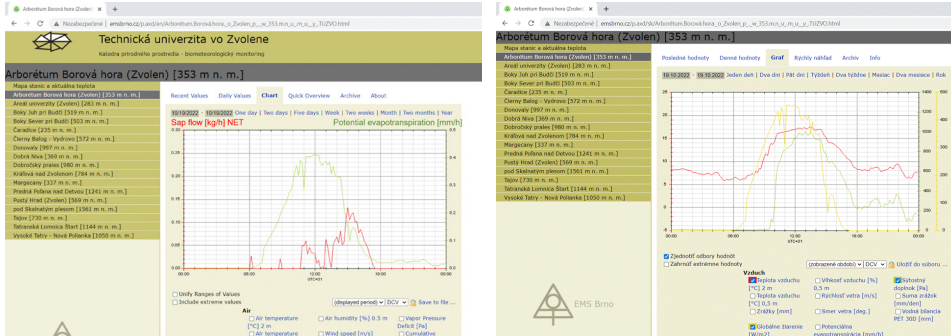


Fig. 7 Visualization of measured and derived values in graphs on the Biometeorological monitoring website; examples in English and Slovak version

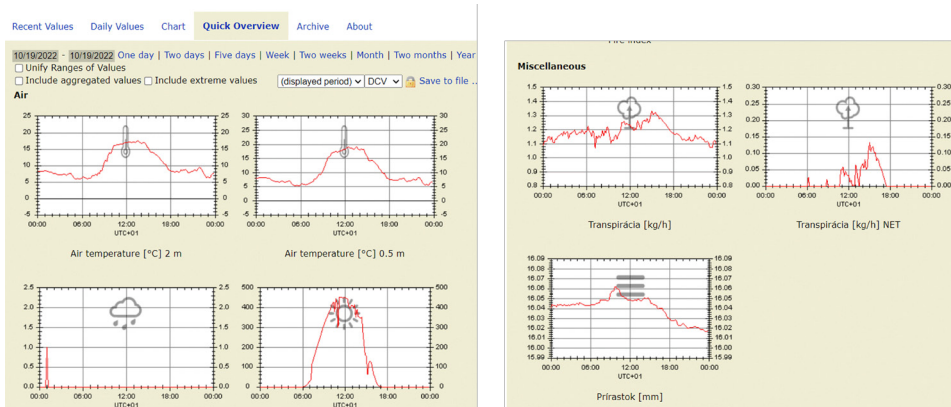


Fig. 8 Function “Quick Overview”

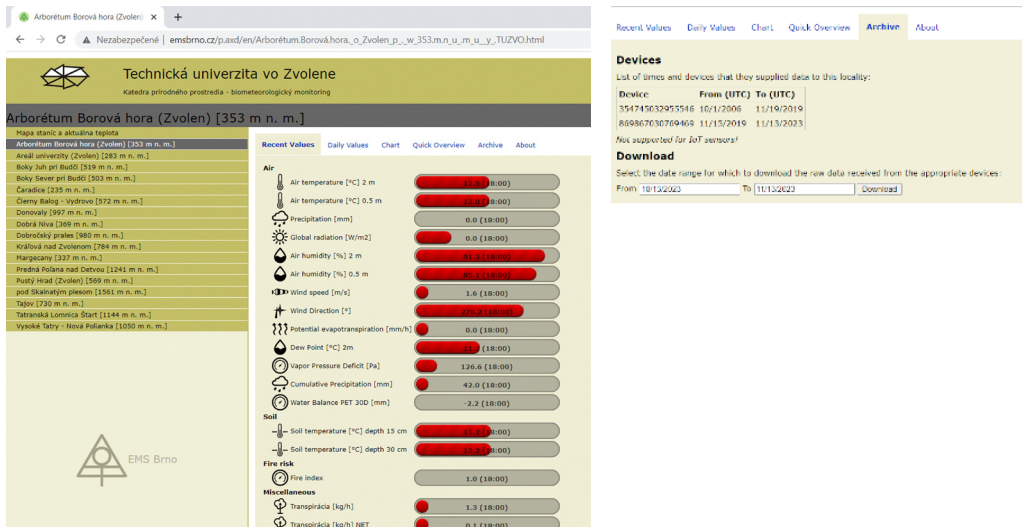


Fig. 9 Function “Recent values“ and “Archive“



Fig. 10 Practical education of university students in Arboretum Borová hora

CONCLUSIONS

In-situ measurements of tree sap flow enable the analysis of derived forest transpiration and also the water state of the entire ecosystem. The process of water transport (by sap flow) and transpiration through vegetation organisms are strongly influenced by the synergistic effect of numerous external factors, some of which are predicted to alter due to climate change.

The online BioMeteorological Laboratory makes it possible to detect, display, and analyze the relationships between environmental weather conditions, soil moisture, and the physiological response of selected (measured) trees in real time.

Interactivity, online, and cloud accessibility enable a high degree of use of the biometeorological laboratory in higher and especially distance education, which fundamentally increases the efficiency and accessibility of the educational process, and also improves the level of awareness of functional relationships of the interconnectedness of physiological processes and the weather, thus supporting systemic education.

REFERENCES

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop. Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements—FAO Irrigation and Drainage Paper 56*; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 1998.
- BETSCH, P.; BONAL, D.; BREDA, N.; Montpied, P.; Peiffer, M.; Tuzet, A.; Granier, A. Drought effects on water relations in beech: The contribution of exchangeable water reservoirs. *Agric. For. Meteorol.* 2011, *151*, 531–543, doi:10.1016/j.agrformet.2010.12.008.
- Biometeorologický monitoring available on the http://www.emsbrno.cz/p.axd/sk/Arbor%C3%A9tum.Borov%C3%A1.hora_o_Zvolen_p_w_353.m_n_u_m_u_y_TUZVO.html
- BREDA, N.; GRANIER, A. Intra and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Ann. Sci. For.* 1996, *53*, 521–536, doi:10.1051/forest.
- CENTRITTO, M.; TOGNETTI, R.; LEITGEB, E.; STŘELCOVÁ, K.; COHEN, S. Chapter 3 Above Ground Processes: Anticipating Climate Change Influences. In *Forest Management and the Water Cycle: An Ecosystem-Based Approach*; Bredemeier, M., Cohen, S., Godbold, D.L., Lode, E., Pichler, V., Schleppei, P., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2011, Volume 212, pp. 263–289. ISBN 978-90-481-9833-7.
- Čermák, J.; Kučera, J.; Nadezhdina, N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees* 2004, *18*, 529–546, doi:10.1007/s00468-004-0339-6.
- DAVI, H.; DUFRÊNE, E.; GRANIER, A.; LE DANTEC, V.; BARBAROUX, C.; FRANÇOIS, C.; BRÉDA, N. Modelling carbon and water cycles in a beech forest. Part II: Validation of the main processes from organ to stand scale. *Ecol. Modell.* 2005, *185*, 387–405, doi:10.1016/j.ecolmodel.2005.01.003.
- DE SWAEF, T.; DE SCHEPPER, V.; VANDEGEHUCHTE, M.W.; STEPPE, K. Stem diameter variations as a versatile research tool in ecophysiology. *Tree Physiol.* 2015, *35*, 1047–1061, doi:10.1093/treephys/tpv080.
- EAMUS, D.; BOULAIN, N.; CLEVERLY, J.; BRESHEARS, D.D. Global change-type drought-induced tree mortality: Vapor pressure deficit is more important than temperature per se in causing decline in tree health. *Ecol. Evol.* 2013, *3*, 2711–2729, doi:10.1002/ece3.664.
- IPCC 2018. Global warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. In *Summary for Policymakers*; Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C.,

- Pidcock, R., et al., Ed.; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 2019; p. 32.
- JASECHKO, S.; SHARP, Z.D.; GIBSON, J.J.; BIRKS, S.J.; YI, Y.; FAWCETT, P.J. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 2013, *496*, 347–350, doi:10.1038/nature11983.
- JIAO, L.; LU, N.; FANG, W.; LI, Z.; WANG, J.; JIN, Z. Determining the independent impact of soil water on forest transpiration: A case study of a black locust plantation in the Loess Plateau, China. *J. Hydrol.* 2019, *572*, 671–681, doi:10.1016/j.jhydrol.2019.03.045.
- KAUFMANN, M.R.; KELLIHER, F.M. Measuring transpiration rates. In *Techniques and Approaches in Forest Tree Ecophysiology*; Lassoie, J.P.; Hinckley, T.M., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1991; pp. 117–140.
- KIRCHEN, G.; CALVARUSO, C.; GRANIER, A.; REDON, P.O.; VAN DER HEIJDEN, G.; BRÉDA, N.; TURPAULT, M.P. Local soil type variability controls the water budget and stand productivity in a beech forest. *For. Ecol. Manag.* 2017, *390*, 89–103, doi:10.1016/j.foreco.2016.12.024.
- KÖSTNER, B.; FALGE, E.; ALSHEIMER, M. Sap Flow Measurements. *Struct. Role Submerg. Macrophytes Lakes* 2017, 99–112, doi:10.1007/978-3-319-49389-3_5.
- KUČERA, J.; ČERMÁK, J.; PENKA, M. Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. *Biol. Plant* 1977, *19*, 413–420.
- KUČERA, J.; BRITO, P.; JIMÉNEZ, M.S.; URBAN, J. Direct Penman–Monteith parameterization for estimating stomatal conductance and modeling sap flow. *Trees* 2016, doi:10.1007/s00468-016-1513-3.
- KUČERA, J. Environmental Measuring Systems Sap Flow System EMS 81. User's Manual. 2nd Issue. Available online: http://www.emsbrno.cz/r.axd/pdf_v_EMS81_usermanual_u_pdf.jpg?ver= (accessed on 29 November 2020).
- LAPIN, M.; FAŠKO, P.; MELO, M.; ŠŤASTNÝ, P.; TOMLAIN, J. Klimatické oblasti [Climatic Regions]. In *Atlas Krajiny Slovenskej Republiky [Landscape Atlas of the Slovak Republic]*; Miklos, L., Ed.; Ministry of Environment of the Slovak Republic: Bratislava, Czechoslovakia, 2002; p. 334.
- LU, J.; SUN, G.; McNULTY, S.G.; AMATYA, D.M. Modeling actual evapotranspiration from forested watersheds across the southeastern United States. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 2003, *39*, 886–896, doi:10.1111/j.1752-1688.2003.tb04413.x.
- LÜTTSCHWAGER, D.; JOCHHEIM, H. Drought primarily reduces canopy transpiration of exposed beech trees and decreases the share of water uptake from deeper soil layers. *Forests* 2020, *11*, doi:10.3390/F11050537.
- MACKAY, S.L.; ARAIN, M.A.; KHOMIK, M.; BRODEUR, J.J.; SCHUMACHER, J.; HARTMANN, H.; PEICHL, M. The impact of induced drought on transpiration and growth in a temperate pine plantation forest. *Hydrol. Process.* 2012, *26*, 1779–1791, doi:10.1002/hyp.9315.
- NALEVANKOVÁ, P.; SITKOVÁ, Z.; KUČERA, J.; STŘELCOVÁ, K. Impact of water deficit on seasonal and diurnal Dynamics of European beech transpiration and time-lag effect between stand transpiration and environmental drivers. *Water* 2020, *12*(12), 3437, <https://doi.org/10.3390/w12123437>.
- ROWELL, D.P.; JONES, R.G. Causes and uncertainty of future summer drying over Europe. *Clim. Dyn.* 2006, *27*, 281–299, doi:10.1007/s00382-006-0125-9.
- SCHLESINGER, W.H.; JASECHKO, S. Transpiration in the global water cycle. *Agric. For. Meteorol.* 2014, *189–190*, 115–117, doi:10.1016/j.agrformet.2014.01.011.
- STŘELCOVÁ, K.; MINĎÁŠ, J. Transpirácia buka lesného vo vzťahu k meniacim sa podmienkam prostredia. Vedecké štúdie 2000, Technická Univerzita vo Zvolene.
- TATARINOV, F.A.; KUČERA, J.; CIENCIALA, E. The analysis of physical background of tree sap flow measurement based on thermal methods. *Meas. Sci. Technol.* 2005, *16*, 1157–1169, doi:10.1088/0957-0233/16/5/016.
- WILLIAMS, A.P.; ALLEN, C.D.; MACALADY, A.K.; GRIFFIN, D.; WOODHOUSE, C.A.; MEKO, D.M.; SWETNAM, T.W.; RAUSCHER, S.A.; SEAGER, R.; GRISSINO-MAYER, H.D.; ET AL. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nat. Clim. Chang.* 2013, *3*, 292–297, doi:10.1038/nclimate1693.
- ZHENG, H.; YU, G.; WANG, Q.; ZHU, X.; HE, H.; WANG, Y.; ZHANG, J.; LI, Y.; ZHAO, L.; ZHAO, F.; ET AL. Spatial variation in annual actual evapotranspiration of terrestrial ecosystems in China: Results from eddy covariance measurements. *J. Geogr. Sci.* 2016, *26*, 1391–1411, doi:10.1007/s11442-016-1334-8.

ACKNOWLEDGEMENTS

This article was funded by the KEGA project funded by the Cultural and Educational Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic No. 011TU Z-4/2021, by VEGA 1/0392/22 and 1/0285/23 research projects funded by the Science Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic and by the Slovak Research and Development Agency under contract No. APVV-21-0224 and APVV-18-0390.

Contact address:

NALEVANKOVÁ Paulína¹, STŘELCOVÁ Katarína¹, HANZELOVÁ Miriam¹, LUKÁČIK Ivan², VIDO Jaroslav¹

¹ Department of Natural Environment, Faculty of Forestry, Technical University in Zvolen, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovakia

² Arborétum Borová hora, Technical University in Zvolen, Borovianska cesta 2171/66, 960 01 Zvolen, Slovakia

Corresponding author: Paulína Nalevanková, Technical University in Zvolen, T.G.Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovakia, xnalevankova @tuzvo.sk

PROJECTIONS OF WATER BALANCE CONDITIONS IN THE FUTURE CLIMATE FOR THE OAK ALTITUDINAL VEGETATION STAGE IN THE WESTERN CARPATHIANS

Bernard ŠIŠKA¹, Matej ŽILINSKÝ¹, Petr ŠTĚPÁNEK², Zuzana GREŠTIK ORAVCOVÁ^{3*}

ŠIŠKA, B., ŽILINSKÝ, M., ŠTĚPÁNEK, P., GREŠTIK ORAVCOVÁ Z.: Projections of water balance conditions in the future climate for the oak altitudinal vegetation stage in the Western Carpathians. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

ABSTRACT

There are given projections of air temperature, rainfall, evapotranspiration, and climatic water balance conditions for oak altitudinal vegetation stage in Western Carpathians in the paper. Projections of future conditions are based on GCM EC EARTH and according to emission scenario RCP 8.5 and temperature rise by 4°C up to 2100. Two geomorphological zones with the different influence of continental climate of the zone are evaluate: Danubian Lowland and Eastern Slovakian Lowland. Due to relatively low altitudes the climate of the oak altitudinal vegetation stage belongs to the warmest and driest within the Western Carpathians. Air temperature, precipitation, potential evapotranspiration, and climatic water balance were analysed in four time slices: a) 1981 – 2010, b) 2011 – 2040, c) 2041 – 2070 and d) 2071 – 2100. Spatial distribution of climate elements in changing condition for selected regions was provided using the Inverse Distance Weight interpolation in QGIS software. Synergic effects of intensive agriculture, global warming and a distribution of precipitation impacts resulted in fact that the ecosystems of this zone are potentially the most vulnerable one due to increasing water shortage in the area.

Keywords: CWB, Pannonian biogeographical region, climate change impact

1. Introduction

Atmospheric parameters according to outputs from GCM (IPCC, 2013) can impact not only on changes of temperature and humidity relations, distribution of rainfall, wintering conditions, but also consequently on plant and animal phenology, biomass and yield productions, incidences of diseases, pests and weeds as well as changes of physical and chemical soils properties in condition of Pannonian biogeographical region (ŠPÁNIK *et al.* 2004, ŠIŠKA *et al.* 2009, ŠKVARENINA *et al.* 2009). The resilience of many ecosystems

is likely to exceed this century. The rate of extinction of species will increase due to habitat fragmentation, migration restrictions and the ability of organisms to adapt (IPCC, 2013). To model the future development of environmental stability, it is necessary to define the impact of man on ecosystems. Currently, three-dimensional climate models of general atmospheric circulation (GCM) are used, which simulate the development of atmospheric events depending on the expected activities of mankind. The consequences of climate change can then be assessed according to climate change scenarios (RIAHI *et al.*, 2009).

Changing climatic conditions have strong effects on agriculture and forestry as well as on other economic sectors in Western Carpathians. Global environmental changes often reduce the resilience and ability of healthy ecosystems to provide a wide range of goods and services (POTSCHIN-YOUNGA *et al.*, 2016). Maintenance of ecosystem services brings synergistic benefits that have a positive effect on human living standards. In 2019, the Catalog of Ecosystem Services was also prepared for Slovakia, which provides a pilot evaluation of important ecosystem services for the territory of Slovakia (MEDERLY *et al.*, 2019).

Oak altitudinal vegetation stage of Western Carpathians is spread on lowland of Pannonian biogeographical region in the range of 100 – 550 m a.s.l. Most of this area was transformed on arable land in past. The increasing of precipitation variability and decreasing of soil water content during vegetation period in this region was found by also by older generation model outputs (ŠKVARENINA *et al.* 2004, ŠIŠKA *et al.* 2008, ŠIŠKA *et al.* 2009, ŠKVARENINA *et al.* 2009). Increase of reference crop evapotranspiration, actual evapotranspiration and crop water requirement was calculated according to the different climate change and emission scenarios (SRESA2, SRESB2). Water requirements for irrigated crops grown in this region can increase by 20–155 % more irrigation water was simulated for different time horizons according to the climate change scenarios (ŽILINSKÝ *et al.*, 2019).

Changes in climate are one of the main threats to global and regional agriculture, biodiversity and forestry. In Western Carpathians a significant increase of mean annual temperature by 2 °C was recorded during the period of 1881 – 2016. Overall precipitation has increased by 0.8 % in average, but, on the other side a significant decrease of 10 % has been registered in oak altitudinal vegetation stage. Thus, the increase in air temperature and decrease in precipitation caused significant reduction in relative air humidity and the rise of potential evapotranspiration by 5% (ME SR, 2017).

According to the SRES A2 the mean air temperature is projected to be 3.8°C higher in 2071 - 2100 as compared with average air temperature in the period between 1961 – 1990, in southwest of Slovakia, and according to the B2 scenario by 3.1°C higher for the same reference period in Carpathian region (MELO *et al.*, 2009). This increase in average temperature is highest during summer period (4.8 °C) and lowest in spring (3.1 - 2.5 °C) in the same period. According to the scenarios, the changes in precipitations are not

significant during seasons in the region. However, the trend is decreasing in summer, and increasing during winter (MELO *et al.*, 2009). Annual precipitation is expected to decrease by 4.0 – 8.2% in summer and to increase by +4.5 – 9.0% in winter (BARTHOLY *et al.*, 2009). The increase of air temperature and the shortage of precipitations create conditions for drought occurrence especially on the lowlands of Slovakia (MELO *et al.*, 2009).

Climatic water balance is frequently used for evaluation of drought conditions in the territory of Western Carpathians (ŠIŠKA *et TAKÁČ* 2009, HLÁSNY *et BALÁŽ*, 2008, ŠIŠKA *et ŠPÁNIK* 2008). New generation of GCM as well as looking for affective adaptation measures evoke for new model simulation especially in region which look as the most vulnerable. Thus, landscape planning taking into account the future climatic conditions will be part of adaptation in sense of water efficiency (RIEDIGER *et al.* 2016).

2. Materials & Methods

2.1 Climatic data and processing

There were selected 9 regular meteorological stations representing Danubian and East Slovakian lowlands in Pannonian biogeographical region in this case study (Table 1). Meteorological data on daily basis were applied to compare measured and simulated datasets. Daily air temperatures, the global radiation and precipitation were processed by ProClimDB software for the period of 1951-2010 (ŠTĚPÁNEK, 2007).

Table 1.: Meteorological station representing lowland in Pannonian biogeographical region

Tabuľka 1.: Meteorologické stanice reprezentujúce nížiny v Panónskom biogeografickom regióne.

Name of Station	Latitude	Longitude	Lowland
Bratislava–Airport	48.17	17.21	Danubian
Jaslovské Bohunice	48.49	17.66	Danubian
Nitra	48.28	18.14	Danubian
Žiharec	48.29	18.46	Danubian
Hurbanovo	47.87	18.19	Danubian
Milhostov	48.66	21.72	East Slovakian
Somotor	48.42	21.82	East Slovakian
Michalovce	48.74	21.94	East Slovakian
Orechová	48.71	22.22	East Slovakian

For an assessment of climate change were used GCM/RCM outputs and the RCP 8.5 scenario, which were set within the European part of the CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) program. EURO-CORDEX is European branch of international initiative which is supported by World Research Climate Programme. We

used RCM clm4.8.17 in EUR-11 high-resolution (with the grid scale 12.5 x 12.5 km) (JACOB *et al.* 2020). We analysed annual temperature, rainfall, potential evapotranspiration, and climatic water balance by 2100 in four time segments: a) 1981 – 2010, b) 2011 – 2040, c) 2041 – 2070 and d) 2071 – 2100.

Potential evapotranspiration was calculated in daily steps using FAO Penman-Monteith equation (ALLEN *et al.* 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

where R_n is net radiation at the surface [$\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$], G is soil heat flux density at the soil surface [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$], T mean daily or hourly air temperature at 2 m [$^{\circ}\text{C}$], u_2 wind speed at 2 m [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], e_s max. saturation vapor pressure [kPa], e_a mean actual vapor pressure [kPa], Δ slope of the saturation vapor pressure-temperature curve [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] and psychrometric constant [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Climate water balance was calculated by equation:

$$CWB = P - ET_0 \quad (2)$$

where P is precipitation [mm] and ET_0 is potential evapotranspiration [mm].

2.2 Graphic processing of climate outputs

The outputs were processed by the QGIS software using the Inverse Distance Weight (IDW) interpolation for selected regions of Western Carpathians. It provided us with an overview of the spatial distribution of climate elements and changing conditions for the development of ecosystems by 2100 in the areas of interest. The results are showed on maps of Danubian Lowland and Eastern Slovakian Lowland.

3. Results

According to outputs of the ECC model, the annual mean temperature had an upward trend in Danubian Lowland by 2100 (Fig. 1). The total growth of temperature in the area was 3.1 $^{\circ}\text{C}$, the annual mean temperature (ECC model) for period 1981 – 2010 was 9.3 $^{\circ}\text{C}$, for 2011 – 2040 it was 10.1 $^{\circ}\text{C}$. The model expected an increase in annual average temperature to 11.0 $^{\circ}\text{C}$ and to 12.4 $^{\circ}\text{C}$ in 2071 – 2100. The spatial distribution of the mean air temperature for different periods is shown in figure 2 (a – d).

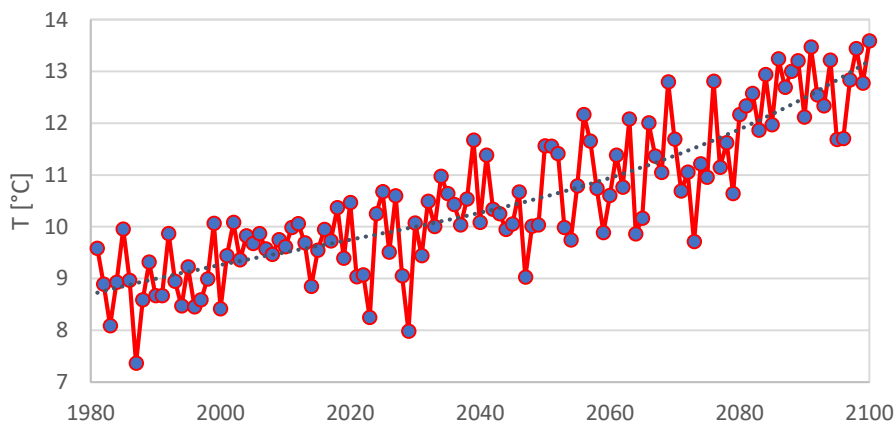


Figure 1.: Mean annual temperature according to ECC model in Danubian Lowland for the period 1981 – 2100.

Obrázok 1.: Vývoj priemernej ročnej teploty vzduchu podľa modelu ECC v Podunajskej nížine v rokoch 1981 – 2100.

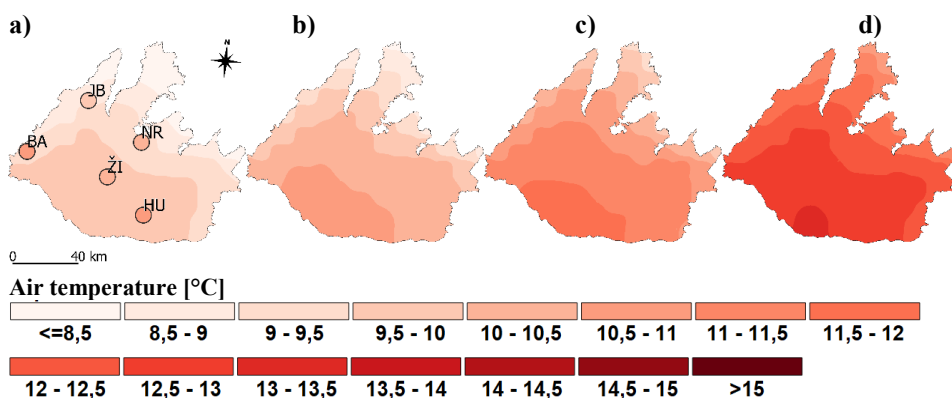


Figure 2.: Spatial distribution of the mean annual air temperature in the Danubian Lowland according to the RCP 8.5 scenario based on the outputs from the ECC model for the period: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 – 2100.

Obrázok 2.: Priestorová distribúcia priemernej ročnej teploty vzduchu v Podunajskej nížine podľa scenára RCP 8.5 na základe výsledkov ECC modelu pre obdobia: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 – 2100.

In the same manner, we analyzed spatial distribution of mean annual precipitation in Danubian Lowland. The average precipitation was 578 mm for the period of years 1981 – 2010. For the years 2011 - 2040, the increase in the average annual totals of atmospheric precipitation generated by the ECC model to 624 mm was calculated. The weighted average

of the total atmospheric precipitation on the grids of the ECC model in the Danubian Lowland decreased slightly to 621 mm during the years 2041 - 2070. In the last evaluated period 2071 - 2100, we calculated the increase to 656 mm. The spatial distribution is shown in the Fig. 4 (a - d).

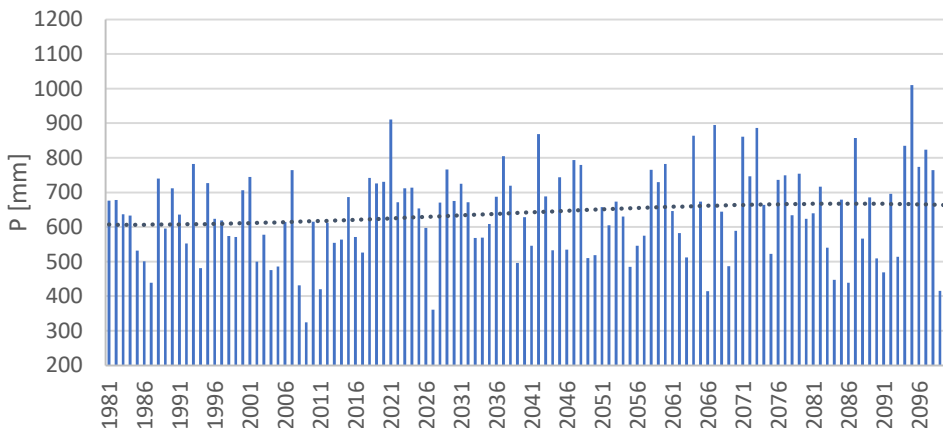


Figure 3.: Mean annual precipitation according to ECC model in Danubian Lowland for the period 1981-2100.

Obrázok 3.: Priemerný ročný úhrn zrážok a jeho vývoj do r. 2100 na základe modelu ECC v Podunajskej nížine.

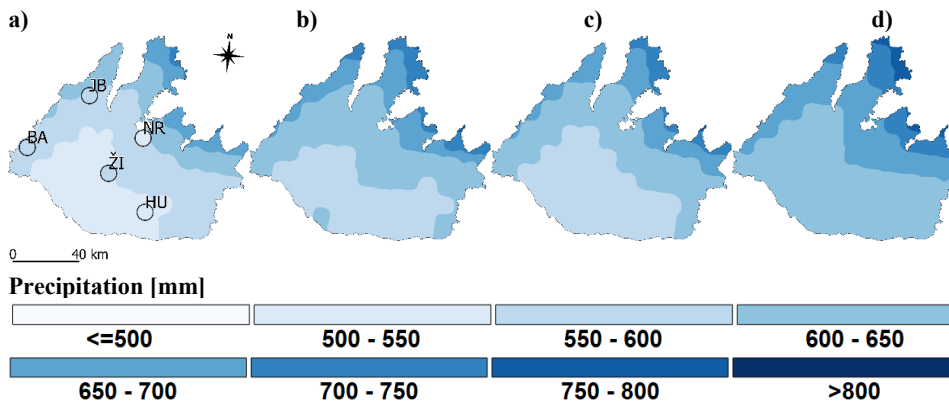


Figure 4.: Spatial distribution of the mean annual precipitation in the Danubian Lowland according to the RCP 8.5 scenario based on the outputs from the ECC model for the period: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 – 2100.

Obrázok 4.: Priestorová distribúcia priemerných ročných úhrnov zrážok v Podunajskej nížine podľa scenára RCP 8.5 na základe výsledkov ECC modelu pre obdobia: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 – 2100.

In Danubian Lowland, the annual potential evapotranspiration ET_0 was 864 mm in the period 1981-2010, during the following period 2011-2040 was almost identical to 865 mm, in 2041-2070 it increased to 889 mm and in the last period 2071-2100 to the level 936 mm.

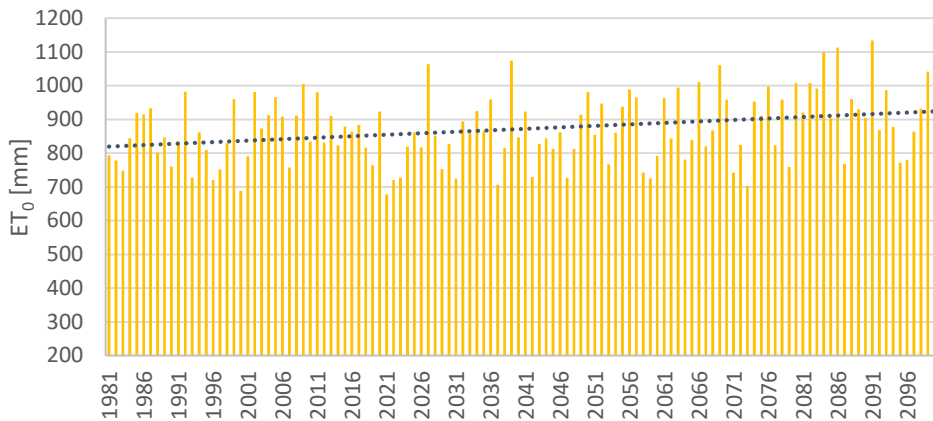


Figure 5.: Mean annual potential evapotranspiration according to ECC model in Danubian Lowland for the period 1981 – 2100.

Obrázok 5.: Priemerná ročná evapotranspirácia a jej vývoj podľa modelu ECC v Podunajskej nížine v období 1981 – 2100.

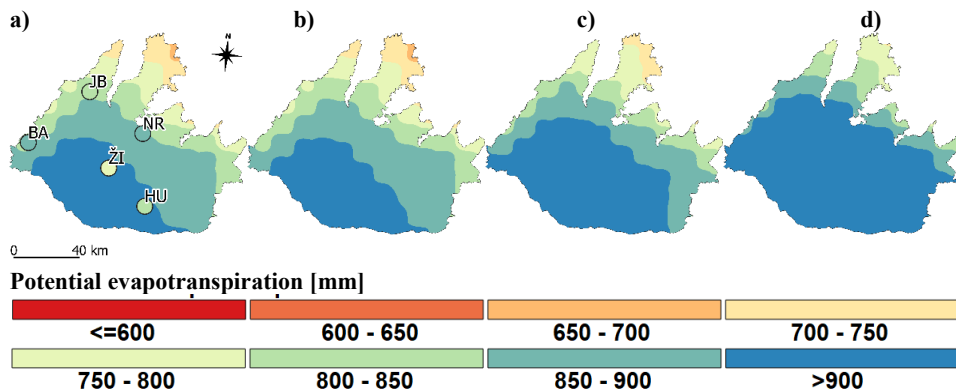


Figure 6.: Spatial distribution of the mean annual potential evapotranspiration in the Danubian Lowland according to the RCP 8.5 scenario based on the outputs from the ECC model for the period: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 – 2100.

Obrázok 6.: Priestorová distribúcia priemernej ročnej evapotranspirácie v Podunajskej nížine podľa scenára RCP 8.5 na základe výsledkov modelu ECC pre obdobia: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 – 2100.

Thus, the total annual climate water balance was counted for whole area of Danubian Lowland as different between precipitation and potential evapotranspiration based on the ECC model outputs data. In the reference period 1981 – 2010, the total CWB was -286 mm, for period 2011 – 2040 was -241 mm, for period 2041 – 2070 was -267 mm and for 2071 – 2100 was -281 mm.

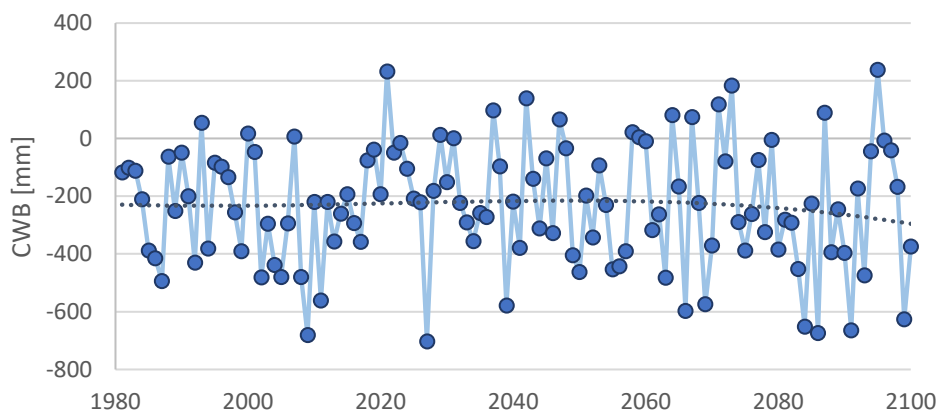


Figure 7.: Mean annual climate water balance (CWB) according to ECC model in Danubian Lowland for the period 1981 – 2100.

Obrázok 7.: Priemerná ročná hodnota klimatickej vodnej bilancie podľa ECC modelu v Podunajskej nížine v období 1981 – 2100.

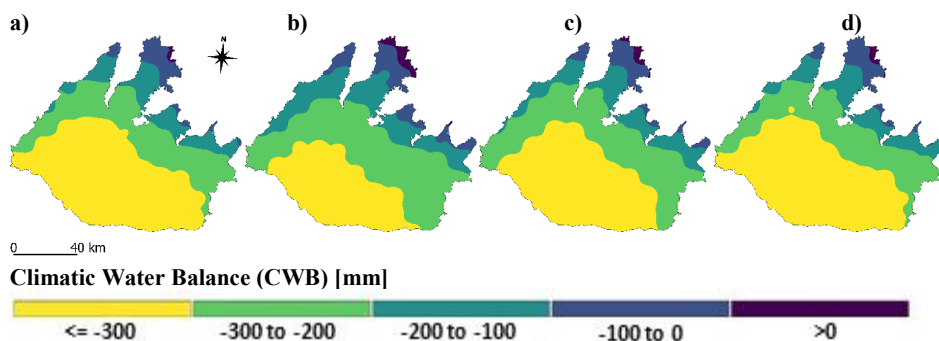


Figure 8.: Spatial distribution of the mean annual CWB in the Danubian Lowland according to the RCP 8.5 scenario based on the outputs from the ECC model for the period: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 – 2070, d) 2071 – 2100.

Obrázok 8.: Priestorová distribúcia priemernej ročnej klimatickej vodnej bilancie v Podunajskej nížine podľa scenára RCP 8.5 na základe výsledkov ECC modelu pre obdobia: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 – 2070, d) 2071 – 2100.

The annual temperature in Eastern Slovakian Lowland was lower in comparison to Danubian Lowland according to the ECC model. In the period 1981 - 2010, the ECC model assumed an average air temperature of all VSN grids at 8.7 ° C. For the years 2011 - 2040, the average temperature was 9.5 ° C, followed by an increase to 10.4 ° C in 2041 - 2070 and an increase in the last evaluated period 2071 - 2100 to 11, 7 ° C.

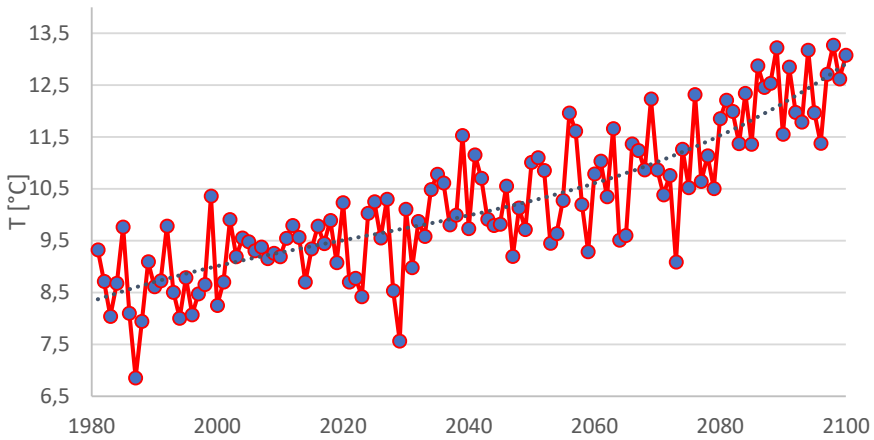


Figure 9.: Mean annual temperature according to ECC model in Eastern Slovakian Lowland for the period 1981 – 2100.

Obrázok 9.: Priemerná ročná teplota vzduchu podľa ECC modelu vo Východoslovenskej nížine v období 1981 – 2100.

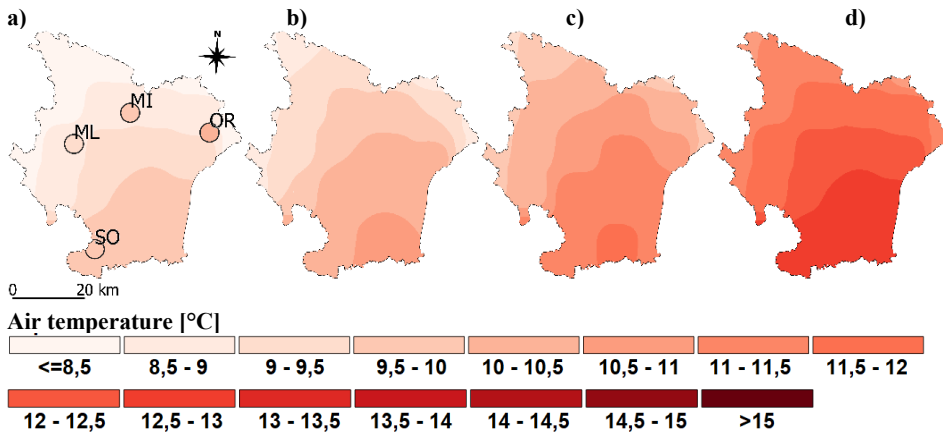


Figure 10.: Spatial distribution of the mean annual air temperature in the Eastern Slovakian according to the RCP 8.5 scenario based on the outputs from the ECC model for the period: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 – 2100.

Obrázok 10.: Priestorová distribúcia priemernej teploty vzduchu vo Východoslovenskej nížine podľa scenára RCP 8.5 na základe výsledkov ECC modelu pre obdobia: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 – 2100.

The annual mean precipitation according to the ECC model outputs was 594 mm in Eastern Slovakian Lowland. For the period 2011 - 2040, the ECC model recorded an increase to 659 mm. The annual mean precipitation was also calculated for the period 2041 - 2070 with a slight decrease to the level of 644 mm. In the last evaluated period from 2071 to 2100, the average total increased to 676 mm.

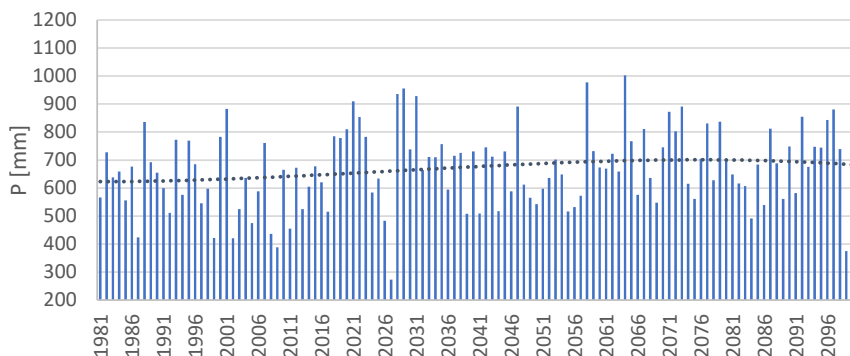


Figure 11.: Mean annual precipitation according to ECC model in Eastern Slovakian Lowland for the period 1981 – 2100.

Obrázok 11.: Priemerný ročný úhrn zrážok podľa ECC modelu vo Východoslovenskej nížine v období 1981 – 2100.

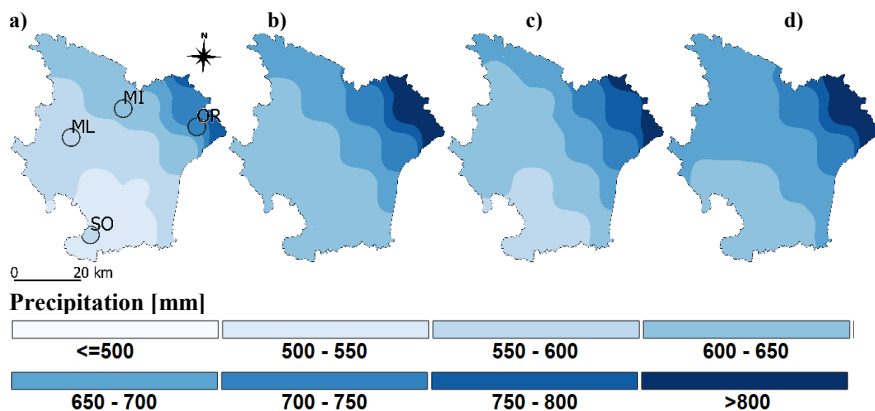


Figure 12.: Spatial distribution of the mean annual precipitation in the Eastern Slovakian Lowland according to the RCP 8.5 scenario based on the outputs from the ECC model for the period: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 – 2100.

Obrázok 12.: Priestorová distribúcia priemerných ročných úhrnov zrážok vo Východoslovenskej nížine podľa scenára RCP 8.5 na základe výsledkov ECC modelu pre obdobia: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 – 2100.

We calculate annual potential evapotranspiration based on the ECC model outputs. The annual spatial mean of ET_0 in the Eastern Slovakian lowland was 858 mm for the period 1981 - 2010, during the following period 2011 - 2040 it slightly decreased to 836 mm, in 2041 - 2070 it increased to 862 mm, and in the last period 2071 - 2100 increased to 898 mm.

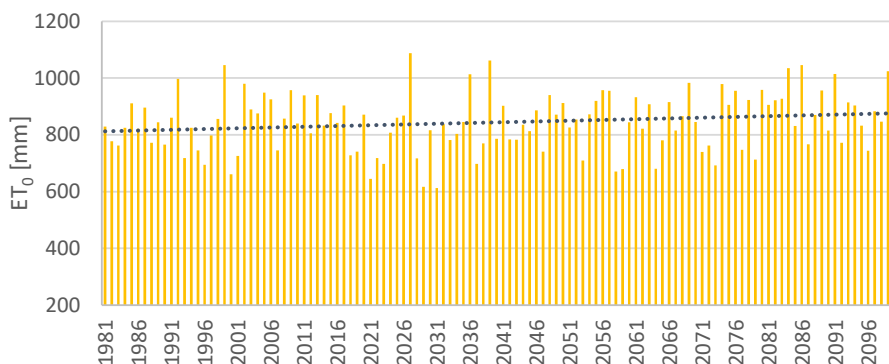


Figure 13.: Mean annual potential evapotranspiration according to ECC model in Eastern Slovakian Lowland for the period 1981 - 2100.

Obrázok 13.: Priemerná ročná evapotranspirácia podľa ECC modelu vo Východoslovenskej nížine v období 1981 - 2100.

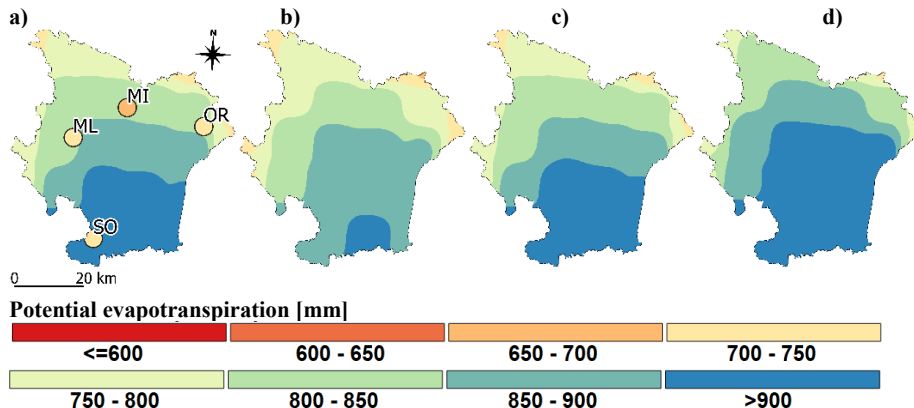


Figure 14.: Spatial distribution of the mean annual potential evapotranspiration in the Eastern Slovakian Lowland according to the RCP 8.5 scenario based on the outputs from the ECC model for the period: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 - 2100.

Obrázok 14.: Priestorová distribúcia priemernej ročnej evapotranspirácie vo Východoslovenskej nížine podľa scenára RCP 8.5 na základe výsledkov modelu ECC pre obdobia: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 - 2070, d) 2071 - 2100.

The total annual climate water balance was counted even for Eastern Slovakian. Based on the ECC model outputs data, the annual CWB for period 1981 – 2010 was -263 mm. For period 2011 – 2040, we calculated increase of CWB to -173 mm. In comparison to Danubian Lowland, the totals of CWB calculated in Eastern Slovakian Lowland are higher, for example for period 2041 – 2070 CWB was calculated at -214 mm and for 2071 – 2100 was -218 mm in Eastern Slovakian Lowland.

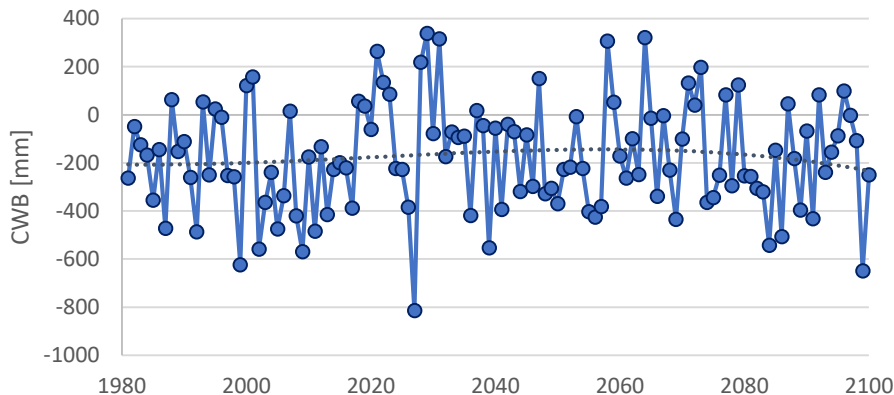


Figure 15.: Mean annual climate water balance (CWB) according to ECC model in Eastern Slovakian Lowland for the period 1981 – 2100.

Obrázok 15.: Priemerná ročná hodnota klimatickej vodnej bilancie podľa ECC modelu vo Východoslovenskej nížine v období 1981 – 2100.

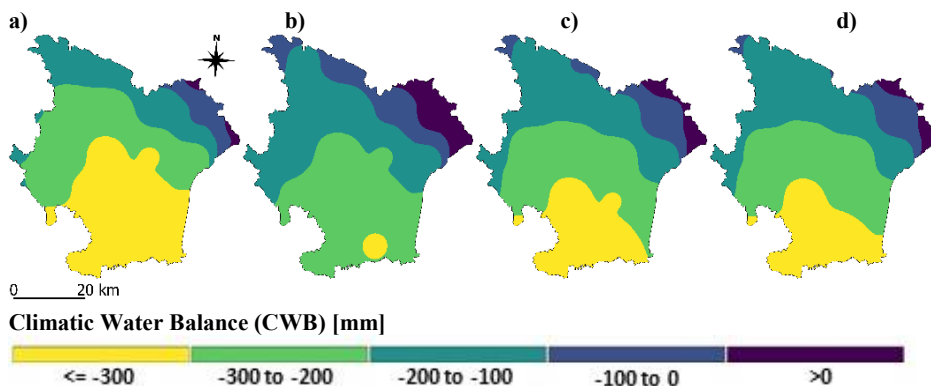


Figure 16.: Spatial distribution of the mean annual CWB in the Eastern Slovakian Lowland according to the RCP 8.5 scenario based on the outputs from the ECC model for the period: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 – 2070, d) 2071 – 2100.

Obrázok 16.: Priestorová distribúcia priemernej ročnej klimatickej vodnej bilancie vo Východoslovenskej nížine podľa scenára RCP 8.5 na základe výsledkov ECC modelu pre obdobia: a) 1981 - 2010, b) 2011 - 2040, c) 2041 – 2070, d) 2071 – 2100.

4. Conclusion

In this paper, we analyzed climate parameters based on the climate change scenario RCP 8.5 provided by RCM ec-earth and GCM clm4.8.17 for Danubian and Eastern Slovak Lowland. The results show a growing trend in the air temperature in both areas of oak altitudinal vegetation stage. The mean temperature in the Danubian Lowland can increase by 3.1 °C up to time horizon 2100. The warmest areas have moved from the south of the lowland to northeastern parts of the lowland, the same trend was counted even for Eastern Slovak Lowland where the mean temperature was by 3°C higher in 2071 – 2100 in comparison to the reference period (1981 – 2010). The annual mean precipitation was by 13.5% higher in 2071 – 2100 compared to the reference period in the Danubian Lowland and by 13.8% in the Eastern Slovak Lowland. We calculated the mean evapotranspiration by 9.3% higher at the end of the century compared to the reference period in the Danubian Lowland and by 4.7% in the Eastern Slovak Lowland. Thus, the annual Climatic Water Balance, based on the model data, shows a declining trend to the end of evaluated periods (by 2100) in both areas.

Comparing CWB values in present paper and CWB values from published papers using previous generation of climate change scenarios (ŠÍŠKA *et* TAKÁČ 2009) climatic conditions in oak altitudinal vegetation stage, new results look more friendly. But, there were found very high local differences.

The continental condition of the eastern part of Pannonian biogeographical region make this region more vulnerable as resulted from comparison of two lowlands in oak altitudinal vegetation stage. Synergic effects of intensive agriculture, global warming and a distribution of precipitation impacts resulted in fact that the ecosystems of this zone will be potentially the most vulnerable one due to increasing water shortage in the area. Adaptive measure will need take into account complex of factors to manage country in future climatic conditions (VAN VUUREN *et* CARTER, 2013).

Funding: *This research was supported by the Science Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic VEGA No 1/0392/22 and by the Slovak Research and Development Agency under contract no. APVV-21-0224 and Cultural Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic 011TU Z-4/2021.*

REFERENCES

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L., RAES, D., SMITH, M. (1998): Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. In *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organisation.
- BARTHOLY, J., PONGRÁČZ, R., GELYBÓ, G., KERN, A. (2009): What Climate Can We Expect in Central/Eastern Europe by 2071–2100? In Štřelcová, K., Matyas, C., Kleidon, A. *et al.* (eds) *Bioclimatology and Natural Hazards*. Dordrecht: Springer, 3-14.

- HLÁSNY, T., BALÁŽ, P. (2008): The climatic water balance of Slovakia based on the FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. In *Geografický časopis SAV Bratislava*. 2008, 60: 15-30.
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- JACOB, D., TEICHMANN, C., SOBOLOWSKI, S., KATRAGKOU, E., ANDERS, I., BELDA, M., BENESTAD, R., BOBERG, F., BUONOMO, E., CARDOSO, R.M. et al. (2020): Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Reg Environ Change* 20, 51 (2020).
- ME SR (2017) The Seventh National Communication of the Slovak Republic on Climate Change. Ministry of the Environment of the Slovak Republic, Bratislava, pp 1-228 http://www.minzp.sk/files/oblasti/politika-zmeny-klimy/7nc_svk.pdf Accessed 28 June 2018
- MEDERLY, P., ČERNECKÝ, J. (2019): *Katalóg ekosystémových služieb Slovenska*. Banská Bystrica: ŠOP SR, UKF Nitra, ÚKE SAV, 2019. ISBN: 978-80-8184-067-8, 215 p.
- MELO, M., LAPIN, M., DAMBORSKÁ, I. (2009): Methods for the design of climate change scenario. In *Slovakia for the 21st century*. Bulletin of Geography Physical Geography Series vol. 1: 77-90.
- POTSCHIN-YOUNGA, M., HAINES-YOUNGA, R., FISH, K., TERNER, R. (2016): *Routledge handbook of ecosystem services*. New York: Routledge, Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 978-1138025080, 630 p.
- RIAH, K., RAO, S., KREY, V., CHO, C., CHIRKOV, V., FISHE, G., KINDERMANN, G., NAKICENOCIC, N., RAFAJ, P. (2011): RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. In *Climatic Change*. 2011, 109: 33-57.
- RIEDIGER, J., BRECKLING, B., SVOBODA, N., SCHRÖDER, W. (2016): Modelling regional variability of irrigation requirements due to climate change in Northern Germany. In *Science of the Total Environment*. 2016, 54: 329-340.
- ŠIŠKA, B., ŠPÁNIK, F. (2008): Agroclimatic regionalization of Slovak territory in condition of changing climate. In *Meteorologický časopis*. 2008, 11: 61-64.
- ŠIŠKA, B., ŠPÁNIK, F. (2008): Agroclimatic regionalization of Slovak territory in conditions of changing climate. In *Meteorologický časopis*. 2008, 11 (1-2): 61-64.
- ŠIŠKA, B., TAKÁČ J. (2009): Drought analyses of agricultural regions as influenced by climatic conditions in the Slovak Republic. In *Időjárás*. 2009, 113 (1-2): 135-143.
- ŠKVARENINA, J., KRIZOVÁ, E., TOMLAIN, J. (2004): Impact of the climate change on the water balance of altitudinal vegetation stages in Slovakia. In *Ekológia (Bratislava)*. 2004, 23: 13-29.
- ŠKVARENINA, J., TOMLAIN, J., HRVOĽ, J., ŠKVARENINOVÁ, J., NEJEDLÍK, P. (2009): Progress in dryness and wetness parameters in altitudinal vegetation stages of West Carpathians: Time-series analysis 1951-2007. In *Időjárás*. 2009, 113: 47-54.
- ŠPÁNIK, F., ŠIŠKA, B., ANTAL, J., TOMLAIN, J., ŠKVARENINA, J., REPA, Š. (2004): *Biometeorológia*. Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita, 2004. ISBN 80-8069-315-3, 227 p.
- ŠTĚPÁNEK, P. (2007): ProClimDB—software for processing climatological datasets. Czech Hydrometeorological Institute regional office Brno.
- VAN VUUREN, D.P., CARTER, T.R. (2013): Climate and socio-economic scenarios for climate change research and assessment: reconciling the new with old. In *Climate Change* vol. 122: 415-429.
- ŽILINSKÝ M., TAKÁČ J., ŠIŠKA B. (2019): Adaptation Strategies to Reduce the Impact of Climate Change on Yield Loss in Northern Carpathians, Slovakia. In Leal Filho W, Trbic G, Filipovic D. (eds) *Climate Change Adaptation in Eastern Europe. Climate Change Management*. Dordrecht: Springer.

Author Affiliations:

prof. RNDr. Bernard Šiška, PhD
¹Slovenská bioklimatologická spoločnosť pri SAV
 Jurigovo nám. 3, 841 05 Bratislava
 bbeetless@gmail.com

Ing. Matej Žilinský, PhD.
¹Slovenská bioklimatologická spoločnosť pri SAV
 Jurigovo nám. 3, 841 05 Bratislava

Ing. Petr Štěpánek, PhD.
²Global Change Research Institute,
Czech Academy of Sciences
Department of climate modelling and scenarios development
Kroftova 43, 616 67 Brno, Czech Republic
stepanek.p@czechglobe.cz

Ing. Zuzana Greštiak Oravcová, PhD.
³Technical University in Zvolen
Faculty of Forestry
Department of Natural Environment
T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen
grestiakoravcov@is.tuzvo.sk
*Corresponding author

PROGNÓZY VODNEJ BILANCIE V PODMIENKACH BUDÚCEJ KLÍMY PRE DUBOVÝ VEGETAČNÝ STUPEŇ ZÁPADNÝCH KARPÁT

ZHRNUTIE

V článku sú prezentované prognózy vývoja teploty vzduchu, zrážok, evapotranspirácie a klimatickej vodnej bilancie pre dubový vegetačný stupeň Západných Karpát na základe scenára vývoja emisií RCP 8.5 a s predpokladaným nárastom teploty o 4°C do roku 2100. Hodnotené boli dva rôzne geomorfologické celky, ktoré sa vyznačujú odlišným vplyvom kontinentálnej klímy: Podunajská nížina a Východoslovenská nížina. Vzhľadom k pomerne nízkej nadmorskej výške je klíma dubového vegetačného stupňa najteplejšia a najsuchšia v regióne Západných Karpát. Teplota vzduchu, zrážky, potenciálna evapotranspirácia a klimatická vodná bilancia boli hodnotené v štyroch časových úsekoch: a, 1981 – 2010, b, 2011 – 2040, c, 2041 – 2070 a d, 2071 – 2100. Priestorová distribúcia klimatických prvkov v meniacich sa podmienkach bola pre vybrané regióny vyhodnotená interpoláciou IDW (Inverse Distance Weight) pomocou softvéru QGIS.

Scenáre predpokladajú v porovnaní s referenčným obdobím 1980-2010 nárast teplôt do r. 2100 o 3,1°C v Podunajskej nížine a o 3°C vo Východoslovenskej nížine. Z priestorového hľadiska sa na základe scenárov budú najteplejšie oblasti rozširovať z južných častí smerom na severo-východ. Priemerný ročný úhrn môže v oboch nížinách narásť do r. 2100 o viac než 13%. Nárast potenciálnej evapotranspirácie sa predpokladá o 9,3% v Podunajskej nížine a o 4,7% vo Východoslovenskej nížine. Synergický efekt intenzívneho poľnohospodárstva, globálneho otepľovania a distribúcie zrážok spôsobuje nárast nedostatku vody a zaraďuje obe oblasti k potenciálne najzraniteľnejším. Predpokladané rozšírenie najteplejších oblastí smerom na severo-východ v oboch nížinách naznačuje vysokú zraniteľnosť práve týchto častí Podunajskej a Východoslovenskej nížiny reprezentujúcich dubový vegetačný stupeň. Vo Východoslovenskej nížine môže byť zmena výraznejšia v dôsledku výraznejšieho vplyvu kontinentálnej klímy.

TEPLOTA VZDUCHU, SRÁŽKY A SUCHO NA ÚZEMÍ ČR

AIR TEMPERATURE, PRECIPITATION, AND DROUGHT IN THE CZECH REPUBLIC

Jaroslav ROŽNOVSKÝ

ROŽNOVSKÝ, J.: Projections of water balance conditions in the future climate for the oak altitudinal vegetation stage in the Western Carpathians. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

SOUHRN

Changes in climatic elements are always assessed for a specific period. The evaluation of air temperature and precipitation dynamics has been processed for the period from 1961 to 3030. By the year 2020, the fourth normal period, the period from 1991 to 2020, was completed. Until now, the third normal period, which includes the years from 1961 to 1990, has been most commonly used. We used data from the Czech Hydrometeorological Institute's stations on the territory of the Czech Republic from the technical series for the period from 1961 to 2020 to analyze the relationship between air temperature and precipitation. We found that air temperature is increasing, statistically significantly, both in the fourth normal period and in annual periods. The highest temperature increase is observed during the summer period. However, in relation to statistically significant increases in air temperature, real evapotranspiration is also increasing. As supported by statistical analyses, annual precipitation totals in our area are neither decreasing nor increasing but exhibit increasing dynamics. The increasing air temperature, along with constant precipitation, results in more frequent occurrences of drought in our region.

Klíčová slova: změna klimatu, normálová období, evapotranspirace, vláhová bilance

Keywords: climate change, climatological normal, evapotranspiration, moisture balance

I. Úvod

Introduction

V posledních několika letech jsou projevy změny klimatu naší společností daleko více vnímány, než tomu bylo dříve. Pojem změna klimatu slyšíme stále častěji, je to určitě dáno tím, že se velké části naší společnosti dotkly výskyty sucha (ROŽNOVSKÝ, 1998). Probíhající změna klimatu je nejčastěji dokládána zvyšováním teploty vzduchu,

hovoříme o tzv. globálním oteplování (ROŽNOVSKÝ, 2019). Možné dopady změn našeho podnebí jsou studovány v širokých souvislostech již od devadesátých let minulého století, jak dokládají mnohé rozsáhlé studie (ROŽNOVSKÝ et al. 1998

V souvislosti s trendy je bohatě studována problematika možné změny klimatu. Jsou posuzovány vlivy možné změny na chod a dynamiku jednotlivých klimatických prvků, jak uvádějí PITTOCK et al. (1991). Možné dopady změny klimatu na zemědělství jsou analyzovány v práci BRÁZDIL A ROŽNOVSKÝ et al., (1995).

Z literárních podkladů pro hodnocené území je zřejmé, že ačkoliv lineární trendy u průměrných teplot (ROŽNOVSKÝ a STŘEŠTÍK, 2021) a úhrnů srážek vykazují tendenci potvrzující domněnku o postupné aridizaci našeho území (LITSCHMANN A ROŽNOVSKÝ 1993, ROŽNOVSKÝ 2019,). Pozornost je nutno věnovat zvláště zvyšujícímu se počtu dnů s vláhovou bilancí pod 20 %.

Pokud chceme hodnotit množství vody v krajině, musíme začít od hodnocení našeho podnebí. To je typické svou proměnlivostí, která je dána geografickou polohou a reliéfem našeho území. Jsme součástí mírného klimatického pásu, ovšem v oblasti přechodného klimatu středoevropského. Významnou roli sehrávají cirkulační a geografické poměry. V Atlasu podnebí Československa (1958) a Podnebí ČSSR - Tabulky (Kolektiv 1961) jsou uvedeny výstupy zpracování za období 1901 až 1950. Mapy klimatických prvků v Atlasu podnebí Česka (TOLASZ et al., 2007) byly vypracovány z meteorologických údajů za období 1961 až 2000. Vidíme, že desetiletí 1951 až 1960 zpracováno není. Proto většina studií změny klimatu využívá období od roku 1961. Od 80. let 20. století je pozorován významný nárůst teplot vzduchu, a to ve všech sezónách s výjimkou podzimu (STŘEŠTÍK et al., 2014).

Charakteristika sucha je však dosud méně přesně vyjádřena s tím, že pojem sucho je mnohdy brán z různých pohledů. Nejčastěji se setkáváme označením sucha atmosférického, agronomického, meteorologického, klimatologického, fyziologického, hydrologického, ale také např. nahodilého. Suchost podnebí - aridita, v pojetí klimatologie vyjadřuje výrazně převažující výpar nad množstvím spadlých srážek. V klimatologii je období sucha vztahováno na část roku, kdy jsou takřka pravidelně velmi malé srážkové úhrny nebo se vůbec nevyskytují. Po tomto období nastupuje období deštů. Jako suché období je často v klimatologické literatuře označováno období bezsrážkové. Tímto míníme vždy určitý počet po sobě jdoucích dnů (nejčastěji nejméně 5 dnů), kdy nebyly na stanici naměřeny srážky, případně byly srážky velmi malé (0,0 mm, výjimečně 1 mm) jak uvádí ROŽNOVSKÝ (1987).

Agroklimatologické vymezení sucha pro Československo pomocí ukazatele zavlažení, vyjádřeného rozdílem potenciální evapotranspirace a srážek za letní měsíce (VI až VIII) uvádí KURPELOVÁ et al. (1975). Ve shodě s definicí mnoha autorů, např. Seeman et al. (1979), MICHALOPOULOU A PAPAIOANNOU (1991), KOTT (1993) vyjadřuje ROŽNOVSKÝ (1982) sucho agronomické jako nedostatek vody v půdě vyvolaný suchem

meteorologickým, nejčastěji chápaným jako nedostatkem srážek, které se nevyskytují vůbec anebo jen v malých úhrnech. Z tohoto pohledu je nutné věnovat velkou pozornost variabilitě srážkových úhrnů a jejich trendu. Rozbory této problematiky uvádějí např. GROISMAN A EASTERLING (1994).

II. Metodika

Methods

Obsah článku představuje shrnutí dosavadních poznatků a analýzu úhrnů srážek na území ČR. Využita byla data dostupná na portálu Českého hydrometeorologického ústavu. Data byla zpracována běžnými statistickými metodami včetně stanovení trendu. Výchozím materiálem byly hodnoty teploty vzduchu z klimatologických stanic Českého hydrometeorologického ústavu a jejich zpracování do tzv. technické řady zahrnující 268 stanic na území ČR. Pro tuto studii jsme vyhodnotili průměrnou teplotu vzduchu a úhrny srážek z klimatologických stanic na území ČR za období 1961 až 2020. U teploty bylo srovnáno třetí normálové období 1961 až 1990 a čtvrté normálové období 1991 až 2020.

III. Výsledky

Results

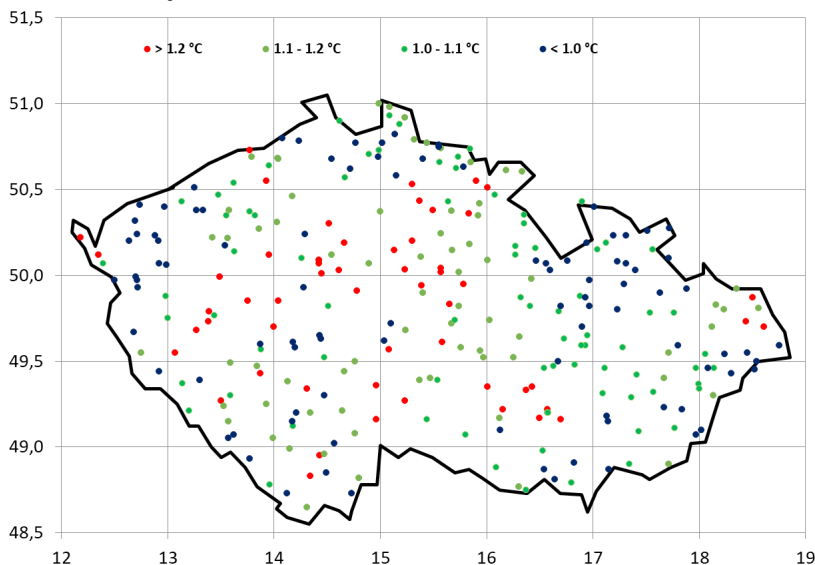
Dlouhodobá průměrná roční teplota vzduchu se za období 1961 až 2020 se na území ČR pohybovala od pod mínus 2 °C (vrcholové polohy) až k 10 °C na jižní Moravě. Ovšem je nutné uvést, že teplejší než jižní Morava je centrální část Prahy, kde vlivem tepelného ostrova přesahuje roční průměr hodnotu 10 °C. Z analýzy průměrných ročních a měsíčních teplot vzduchu za období 1961 až 2020 vyplývá, že teploty vzduchu na našem území mají statisticky prokazatelný trend růstu.

Vzhledem k uzavření 4. normálového období rokem 2020, je toto období podrobeno různým statistickým analýzám. V rámci hodnocení průměrné roční teploty vzduchu (°C) za normálové období 1991 až 2020 a normálové období 1961 až 190 na území ČR byla zpracována mapa změny teploty vzduchu (Obr. 1). Tato jednoznačně dokumentuje zvýšení průměrných teplot vzduchu na našem území ve 4. normálovém období. Rozložení zvýšení však není na našem území rovnoměrné, což je v našem členitém terénu logické. Nejvyšší zvýšení průměrné roční teploty vzduchu, a to o více jak 1,2 °C je četnější na území Čech a překvapivě ho nenacházíme na jižní Moravě. Nejčastější nárůst jev rozsahu 1,0 až 1,2 °C.

Pokud srovnáme vzestup teploty vzduchu v jarním období, můžeme v podstatě konstatovat, že se výrazně od ročního neliší (Obr. 2) Opět platí, že rozložení vzestupu teploty vzduchu je nerovnoměrné, ale můžeme uvést, že převážné množství stanic

s nejvyšším nárůstem je na území Čech. Na Moravě nárůsty nad 1,3 °C se nevyskytují. Až na výjimky je celé území Moravy v rozpětí 1,1 až 1,3 °C. Východ Moravy, zvláště Beskydy v rozpětí 0,9 až 1,1 °C.

Na letním vzestupu teploty vzduchu se podílí nárůst extrémních teplot vzduchu. Dochází ke zvýšení počtu tropických dnů, tedy denních maximálních teplot 30 °C a výše. Jejich počet v posledních letech překračuje dvojnásobek výskytů oproti průměrům za období 1961 až 2000. Zde je nutné zdůraznit, že je velký rozdíl mezi extrémy teploty vzduchu ve volné krajině a ve městech.

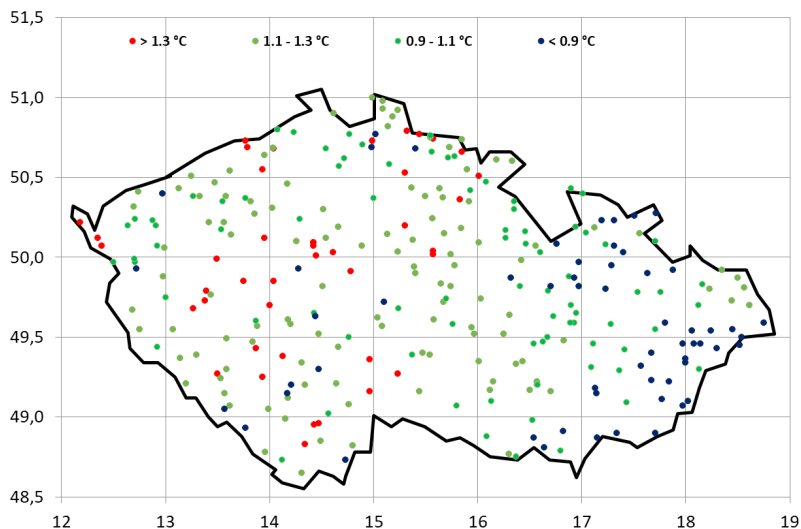


Obr. 1 Rozdíl průměrné roční teploty vzduchu (°C) za normálové období 1991 až 2020 a normálové období 1961 až 1990 na území ČR

Fig. 1 Difference in average annual air temperature (°C) for the normal period 1991 to 2020 and the normal period 1961 to 1990 in the territory of the Czech Republic.

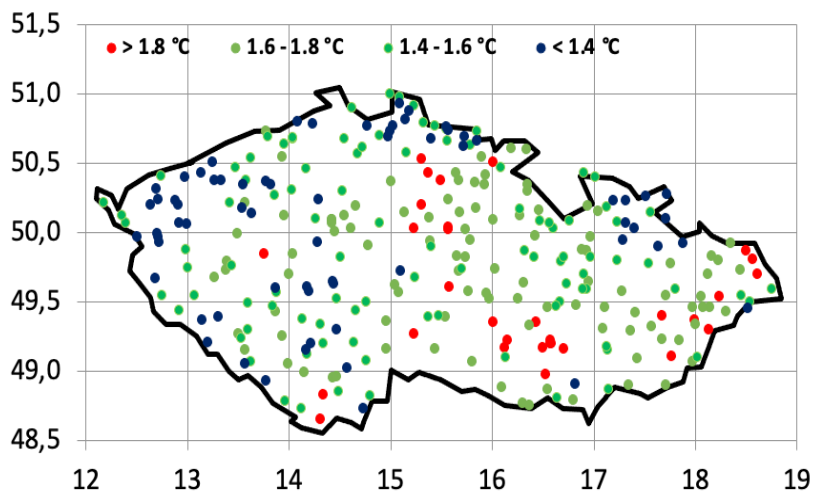
Z hlediska nárůstu teploty vzduchu nacházíme nejvyšší hodnoty v letním období (Obr. 3). Nejvyšší nárůst teploty vzduchu, a to nad 1,8 °C, se vyskytuje ve východních Čechách, v jižní části střední Moravy a severovýchodě Slezska. Převážně je nárůst mezi 1,6 až 1,8 °C, a to převážně na Moravě, v Čechách více ve východní části. Zvýšení teploty vzduchu v letním období, které je v našich podmínkách nejteplejší částí roku, je příčinou zvýšeného výskytu sucha, které se ve vysoké četnosti projevilo v posledním desetiletí.

Podzim představuje nejnižší zvýšení teploty vzduchu (Obr. 4), a to většinu v nejvyšších polohách do 0,4 °C, po nejvyšší hodnoty přes 0,7 °C, rozptýleně na celém území, převážně ve východních Čechách. Z tohoto pohledu lze podzim označit za nejstabilnější teplotní období roku.



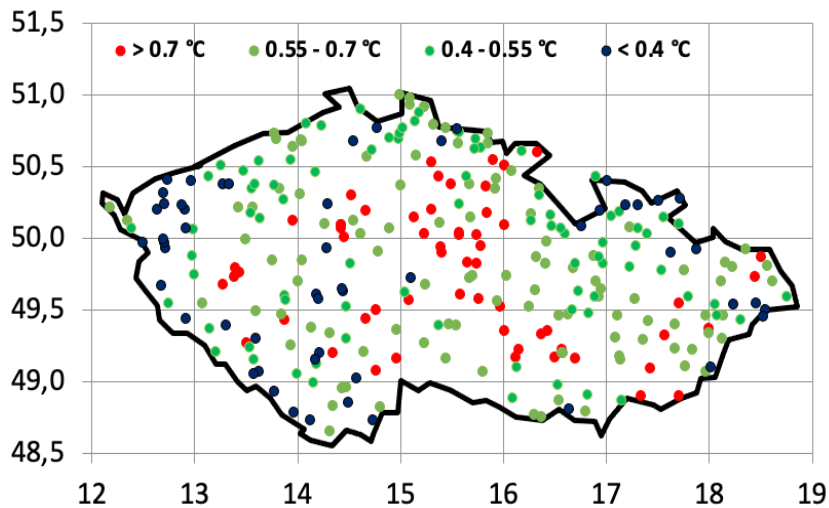
Obr. 2 Rozdíl průměrné jarní teploty vzduchu (°C) za normálové období 1991 až 2020 a normálové období 1961 až 1990 na území ČR

Fig. 2 Difference in average spring air temperature (°C) for the normal period 1991 to 2020 and the normal period 1961 to 1990 in the territory of the Czech Republic.



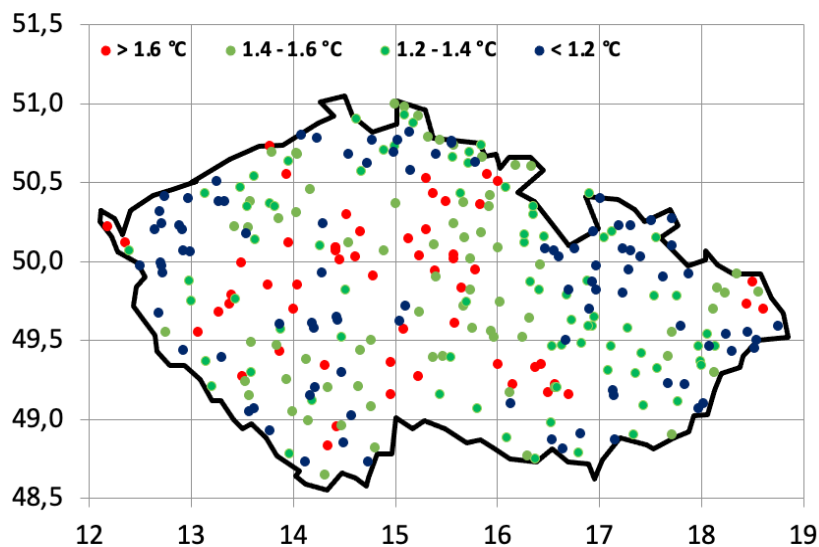
Obr. 3 Průběh průměrné teploty vzduchu (°C) v létě za období 1961 až 2020 a průměrná teplota normálových období v Čechách a na Moravě + 1,5 °C

Fig. 3 The course of average air temperature (°C) in summer for the period 1961 to 2020 and the average temperature of normal periods in Bohemia and Moravia + 1.5 °C.



Obr. 4 Průběh průměrné teploty vzduchu (°C) na podzim za období 1961 až 2020 a průměrná teplota normálových období v Čechách a na Moravě

Fig. 4 The course of average air temperature (°C) in autumn for the period 1961 to 2020 and the average temperature of normal periods in Bohemia and Moravia.



Obr. 5 Průběh průměrné teploty vzduchu (°C) v zimě za období 1961 až 2020 a průměrná teplota normálových období v Čechách a na Moravě + 1,1

Fig. 5 The course of average air temperature (°C) in winter for the period 1961 to 2020 and the average temperature of normal periods in Bohemia and Moravia + 1.1°C.

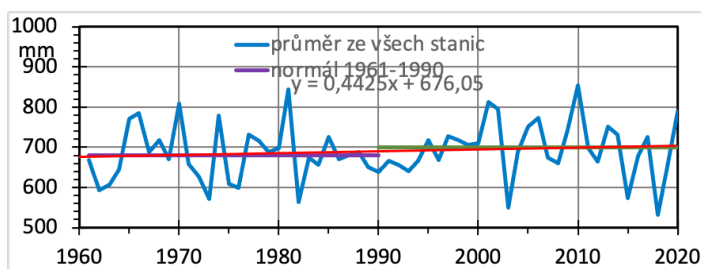
Prokazatelné oteplování, statistickými analýzami potvrzené, se projevuje i v zimním období, takže dochází k přerušení období vegetačního klidu a nástupu vegetace.

Na několika stanicích středních Čech a jihu Moravy v průměru zimní teploty za období 1991 až 2020 neklesají pod nulu. Jak vidíme na Obr. 5, je zvýšení teploty podstatě vyšší než na podzim. Opět je vidět rozdíl mezi hodnotami v Čechách a na Moravě, kde je daleko méně stanic s nejvyšším nárůstem, a to o více jak 1,6 °C. Nejvyšší hodnoty zvýšení zimní teploty nacházíme nejvíce v horských oblastech. Je nutné zdůraznit, že přes nárůst průměrných teplot vzduchu jsou stále hrozbou výskyty nejen extrémně vysoké teploty vzduchu, ale také extrémně nízkých teplot v průběhu zimy.

A. Srážky na území ČR Precipitation in the Czech Republic

Průměrné roční úhrny srážek dokládají svou dynamikou proměnlivost našeho podnebí. Jak vidíme na Obr. 6, rozdíly v ročních úhrnech srážek za období 1961 až 2020 jsou vysoké. V podstatě nevykazují nějakou periodicitu. V průměru za celé naše území velmi slabě rostou, statisticky neprůkazně. Ovšem podle proložení přímkou je za 60 let zvýšení o 24 mm. Pokud jde o srovnání obou normálů, tak zvýšení vidíme ve 4. normálu, a to o 18 mm proti 3.

Přesto, že geografické podmínky Čech a Moravy se liší, průběh ročních úhrnů samostatně za Čechy a Moravu se v trendu velmi podobá, rozdíl je v jednotkách mm (Obr. 6). Velké rozdíly v ročních úhrnech najdeme jen v několika letech (např. r. 1973 nebo 1976, ale také v roce 2020) i přes 100 mm. Rozdíly normálů nejsou velké.

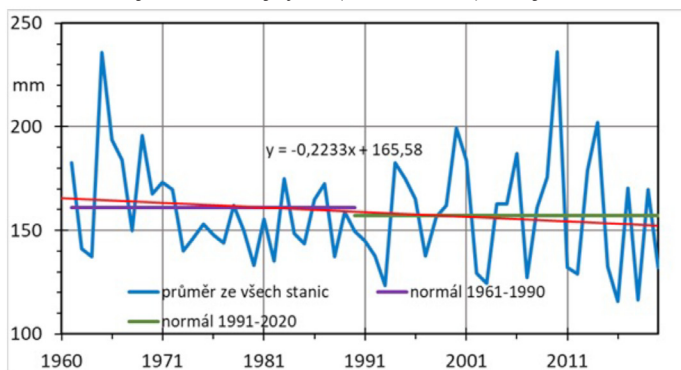


Obr. 6 Roční úhrny srážek (mm) v letech 1961 až 2020 na území České republiky a průměrné hodnoty za normálová období 1961 až 1990 a 1991 až 2020

Fig. 6 Annual precipitation totals (mm) in the years 1961 to 2020 in the territory of the Czech Republic and average values for the normal periods 1961 to 1990 and 1991 to 2020.

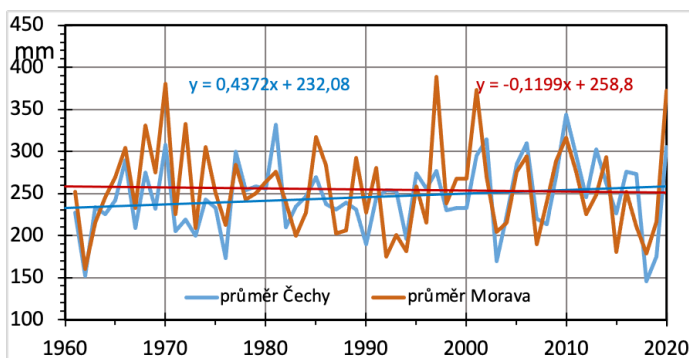
Hodnocení srážek za jednotlivá roční období přináší další doklady o jejich dynamice. V jarním období (Obr. 7) na první pohled zaujme extrémně vysoký úhrn shodný v roce

1965 a 2010 na Moravě. Ale ve většině let se jarní úhrny mezi oběma územími významně neliší. Co je důležité zdůraznit, že také ve většině roků jsou úhrny kolem 150 mm. Oproti trendu u ročních úhrnů vidíme, že v jarním období dlouhodobý trend vykazuje pokles o 23 mm. Na jaře je ve 4. normálu oproti 3. pokles o 4 mm. Vzhledem k posouzení hodnocení k oběma normálům je významné, že průběh rozdílů je velmi podobný, minimálními rozdílů. Mírné zvýšení letních úhrnů dokládá vyšší hodnota 4. normálu, a to o 9 mm. Ovšem v tomto období jsou také nejvyšší (2018 a 2010) a nejnižší letní úhrny



Obr. 7 Úhrny srážek (mm) za jaro v letech 1961 až 2020 na území České republiky a průměrné hodnoty za normálová období 1961 až 1990 a 1991 až 2020.

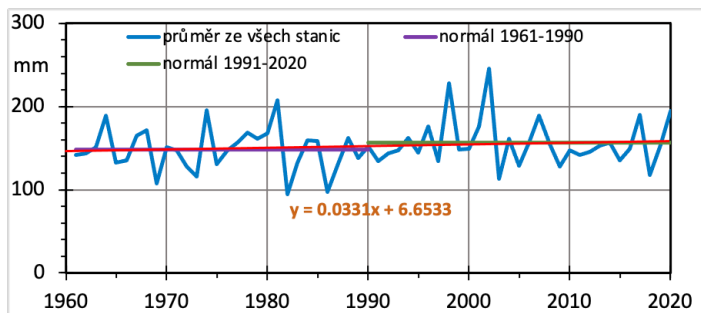
Fig. 7 Spring precipitation totals (mm) in the years 1961 to 2020 in the territory of the Czech Republic and average values for the normal periods 1961 to 1990 and 1991 to 2020.



Obr. 8 Úhrny srážek (mm) za léto v letech 1961 až 2020 na území České republiky a průměrné hodnoty za normálová období 1961 až 1990 a 1991 až 2020.

Fig. 8 Summer precipitation totals (mm) in the years 1961 to 2020 in the territory of the Czech Republic and average values for the normal periods 1961 to 1990 and 1991 to 2020.

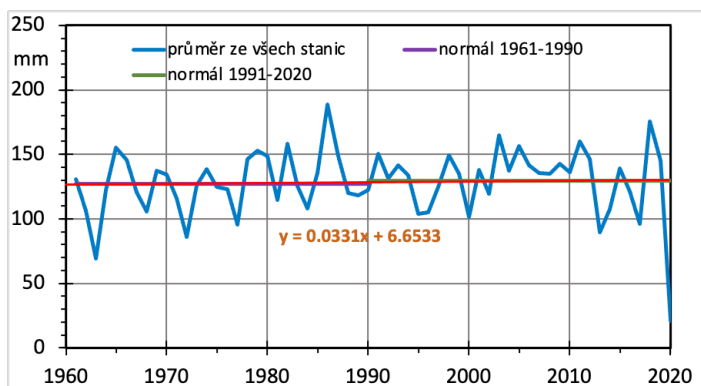
Letní úhrny se ve většině letních období pohybují kolem 250 mm (Obr. 8). Na srážky nejbohatší rok 2010 v létě nejvyšší úhrn nevykazuje. Rozdílné jsou trendy, v Čechách je nárůst o 23 mm, naopak na Moravě je trend klesající o 10 mm. Nejvyšší kladné rozdíly oproti normálům vykazují roky 1970 a opět rok 2010. Záporné naopak roky 1962 a 2018.



Obr. 9 Úhrny srážek (mm) za podzim v letech 1961 až 2020 na území České republiky a průměrné hodnoty za normálová období 1961 až 1990 a 1991 až 2020.

Fig. 9 Autumn precipitation totals (mm) in the years 1961 to 2020 in the territory of the Czech Republic and average values for the normal periods 1961 to 1990 and 1991 to 2020.

Trend srážkových úhrnů za podzim (Obr. 9) vykazuje vzestup o 4 mm. Podzimní 3. normál s hodnotou 147,9 mm je o 9 mm nižší než normál 4. Většina roků má podzimní úhrn mezi 120 až 130 mm.



Obr. 10 Úhrny srážek (mm) za zimu v letech 1961 až 2020 na území České republiky a průměrné hodnoty za normálová období 1961 až 1990 a 1991 až 2020.

Fig. 10 Winter precipitation totals (mm) in the years 1961 to 2020 in the territory of the Czech Republic and average values for the normal periods 1961 to 1990 and 1991 to 2020.

Pro podzimní úhrny Čech a Moravy platí, že oba mají tendenci zvyšování úhrnů s tím, že pro Čechy je to o 4 mm, pro Moravu 19 mm. Průměrný podzimní úhrn je kolem 150 mm, nejvyšší hodnotu pro Čechy vykazuje rok 2002, pro Moravu ještě vyšším úhrnem rok 2020.

Velmi zajímavé je srovnání rozdílů zimních úhrnů (Obr. 10) v jednotlivých letech k normálům. Za období 1961 až 2020 zimní srážky nevykazují změnu. V zimě úhrny srážek až na několik let nevykazují vysokou dynamiku. V obou normálových obdobích

vyšší srážky v Čechách, dá se říci s náznakem rostoucího trendu, na Moravě s náznakem poklesu. Od v podstatě vyrovnaných hodnot se liší extrémně vysoké úhrny v roce 1986 a překvapivě v roce 2018, ale jen v Čechách. Nejnižší zimní úhrn je v roce 2020, zvláště na Moravě.

B. Sucho

Drought

Roční průměrné srážky 550 mm v našich podmínkách tvoří zhruba hranici mezi podnebním aridním a humidním. Odhadem má v České republice 65 % území průměrné roční srážky 600 až 800 mm, 18 % území je s průměrnými ročními srážkami < 600 mm a 17 % území s průměrnými ročními srážkami > 800 mm. K absolutně nejsušším oblastem patří v Čechách oblast Žatce, Loun, Mostu, Chomutova, Kadaně a Kralup s průměrným úhrnem srážek 420 – 500 mm za rok, na Moravě Dolnomoravský a Dyjskosvratecký úval s 500 – 550 avšak s vysokými letními teplotami vzduchu. Roční úhrny srážek kolísají v jednotlivých letech až o ± 40 % kolem dlouhodobého průměru.

S ohledem na časoprostorovou proměnlivost výskytu srážek se zde nejčastěji projevuje výskyt bezsrážkových období, která vyvolávají sucho. Z hlediska zemědělského jde o významný výnosotvorný faktor, protože se projevuje převážně ve vegetačním období. Výskyt sucha bude mít odlišný účinek podle doby výskytu, délky trvání a intenzity ROŽNOVSKÝ (1995). Období sucha vykazují shodně velkou variabilitu v průběhu vegetační doby. Nejdelsí souvislé období bez srážek může překročit 30 dnů. Z hlediska pěstování zemědělských plodin jsou škodlivější výskyty sucha v jarním období. Stabilizačním faktorem by měly být závlahy.

Při dostatečně vysokých teplotách tak budou výnosy zemědělských plodin ovlivněny především dostatkem srážek ve vegetačním období včetně jejich rovnoměrného rozložení. Působení zvýšených teplot by mohly zčásti eliminovat vyšší srážky, jak vychází z některých scénářů. Obtížné je ovšem posoudit jejich rozdělení v roce. Z literárních podkladů pro hodnocené území je zřejmé, že lineární trendy u průměrných teplot a úhrnů srážek vykazují tendenci potvrzující domněnku o postupné aridizaci našeho území. Ukazuje se však, že tyto trendy nejsou na běžně používaných hladinách významnosti signifikantní. Výsledky z období 1961 až 1995 naznačují, že trend srážkových úhrnů vykazuje pokles. V normálovém období 1961 až 1990 výskyt sucha představoval i více než 20 % dnů vegetačního období. Totéž platí i pro období 1991 až 1996. Složitější je průběh vláhových poměrů od roku 1997, kdy se vyskytla období s mimořádně vysokými srážkami. Nárůst suchých období je nutné očekávat v případě předpokládaného oteplování.

Vezmeme-li však v úvahu predikovanou změnu klimatu, musíme počítat s nárůstem sucha, protože vláhová bilance vegetačního období bude nižší o několik desítek mm

vody. Pozornost je však nutno věnovat zvyšujícímu se počtu dnů s vláhovou bilancí pod 20 %. Určitou roli sehrává i predikovaný nárůst globálního záření. Tato oblast vyžaduje další podrobnou analýzu. Podle výsledků simulací by však vyšší srážky znamenaly také zvýšení pravděpodobnosti výskytu denních úhrnů srážek nad 10 mm, tedy nárůst erozně nebezpečných dešťů, zejména v květnu, červnu a v září.

IV. Závěr

Summary

Při stanovení dopadů možné změny klimatu musíme pamatovat na komplexní pohled, protože změna klimatu neznamena jen zvýšení teploty vzduchu, ale ovlivní i další procesy v přírodě, zvláště hydrocyklus. Vzhledem k prokazatelně rostoucí teplotě vzduchu, a tím evapotranspirace, jsou pro vláhové poměry naší krajiny rozhodující srážky. Jak je doloženo statistickou analýzou, srážky v období 1961 až 2020 z hlediska ročních úhrnů nevykazují statisticky prokazatelnou změnu. Zůstávají v ročních úhrnech v podstatě stejné. Tím je vysvětleno, proč na našem území jsou častější výskyty sucha. A logicky nastupuje otázka, zda naše krajina nebude mít nedostatek vody. Její možné vysychání naznačují scénáře vývoje klimatu Země.

Proto je nutné podrobně studovat dílčí krajinné procesy, ale vnímat je jako celek. Současné poznatky ukazují, že vyvozování závěrů jen z dílčích analýz není zcela vhodný postup. Musíme si uvědomit, že voda má nezastupitelnou úlohu ve všech krajinných procesech. Její nedostatek tak ovlivní složení ekosystémů, ale také zemědělskou produkci, hospodářské technologie, a zvláště zásobování obyvatel vodou. Z hlediska environmentální bezpečnosti je nedostatek uváděn jako jedno z rizik, kterému musíme věnovat pozornost.

Problematika udržení vody v krajině, tedy její retence je jedním z důležitých témat jednak výzkumu, ale také praxe. Zásahy v naší krajině musíme provádět tak, abychom v ní udrželi co nejvíce vody, a to jak povrchové, tak podzemní. Pokračující změna klimatu může snížit množství a dostupnost vody v naší krajině. Proto by se měl do budoucna výzkum problematiky dopadů možné změny klimatu zaměřit na komplexní posouzení změn v naší krajině.

V. Literatura

List of references

- BRÁZDIL, R., ROŽNOVSKÝ, J. Impacts of a Potential Climate Change on Agriculture of the Czech Republic - Country Study of Climate Change for the Czech Republic, Element 2. Národní klimatický program ČR, svazek 21, Praha, Český hydrometeorologický ústav, 1995, pp. 139
- KOLEKTIV AUTORŮ (1958): Atlas podnebí Československé republiky. Ústřední správegeodézie a kartografie, Praha.

- KOLEKTIV: Podnebí ČSSR - Tabulky. HMÚ Praha 1961, 379 s.
- KOTT, I. Vláhová bilance na území České republiky v letech 1974-1990. Sborník prací ČHMÚ, 1992 svazek 42, 125 s.
- KURPELOVÁ M., COUFAL L., ČULÍK, J. (1975): Agroklimatické podmienky ČSSR. Bratislava, Příroda, 270 s.
- LITSCHMANN, T., ROŽNOVSKÝ, J. Proměnlivost měsíčních a ročních úhrnů srážek v normálovém období 1961 až 1990. In.: Klimatické změny a lesní hospodářství. Brno, Československá bioklimatologická společnost 1993, s. 28-34.
- MICHALOPOULOU H., PAPAIOANNOU, G. Reference crop evapotranspiration over Greece. Agricultural water and management, 1991 vol. 20, s. 209-221.
- NOSEK, M. Metody v klimatologii. Praha, Academia 1972, 434 s.
- ROŽNOVSKÝ, J. Dynamics of occurrence of dry periods in the region of south Moravia and possible reduction of the effect of drought in agriculture. Acta univ. agric. et silvic. Mendel.Brun.(Brno), 1998, XLVI, No. 3, 63-68.
- ROŽNOVSKÝ, J. a J. STŘEŠTÍK. Dynamika a trendy hodnot klimatologických ukazatelů sucha. In: *Salaš, P. (ed): „Rostliny v suchých oblastech a klimatická změna“*. Lednice 23.- 24. 10. 2019 Zahradnictví: Vědecká příloha. Praha: Profi Press, 2019, XVIII(11), 248 - 256. ISSN 1213-7596
- ROŽNOVSKÝ, J. a J. STŘEŠTÍK: Změny teploty vzduchu za posledních 30 let na území České republiky. Úroda 12, roč. LXIX, 2021, vědecká příloha, s. 75 – 80. ISSN 0139-6013.
- ROŽNOVSKÝ, J.: Agroklimatické podmínky a fenologická hodnocení v pohledu možných klimatických změn. Bratislava, Slovenská bioklimatologická společnost 1993, Štúdia XI., s.52 - 55.
- ROŽNOVSKÝ, J.: Důsledky změn klimatu a antropických vlivů v zemědělství. In: Možné důsledky globální změny podnebí v zemědělství, lesnictví a zdravotnictví a doporučení vhodných opatření. Praha, Česká bioklimatologická společnost 1995, 34-42 s.
- ROŽNOVSKÝ, J.: Proměnlivost a zabezpečení srážkových úhrnů. In: Ochrana a využívání vodních zdrojů v zemědělství a lesnictví. Brno, Vysoká škola zemědělská 1987, s. 126-135.
- ROŽNOVSKÝ, Jaroslav, Filip CHUCHMA a Rostislav FIALA. Základní vláhová bilance, ukazatel sucha na území České republiky. *ACTA HYDROLOGICA SLOVACA*. 2018, **19**(2), 171-178.
- ROŽNOVSKÝ, J.. Water Balance and Phase of Hydrocycle Dynamics. In: ZELENAKOVA, Martina, Jitka FIALOVÁ a Abdelazim M. NEGM, ed. *Assessment and Protection of Water Resources in the Czech Republic*. Springer Water, 2019, s. 403-414. ISBN 978-3-030-18362-2.
- SEEMANN, J., CHIRKOV, Y., I., LOMAS, J., PRIMAULT, B. Agrometeorology. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag 1979, 324 s.
- SOUKHOVOLSKY V, KOVALEV A, TARASOVA O, MODLINGER R, KŘENOVÁ Z, MEZEI P, ŠKVARENINA J, ROŽNOVSKÝ J, KOROLYOVA N, MAJDÁK A, JAKUŠ R. Wind Damage and Temperature Effect on Tree Mortality Caused by *Ips typographus* L.: Phase Transition Model. *Forests*. 2022; 13(2):180. <https://doi.org/10.3390/f13020180>
- TOLASZ, R., et al. (2007): Atlas podnebí Česka. Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého v Olomouci, 255 s. ISBN 978-80-86690-26-1 (CHMI), 978-80-244-1626-7 (UP).

Poděkování

Článek je součástí výstupů z řešení projektu Technologické agentury ČR, č. projektu SS02030040, PERUN a Národní agentury pro zemědělský výzkum, QK1920280 „Inovace bonitačního systému zemědělských půd (BPEJ) pro potřeby státní správy“.

Kontakt:

RNDr. Ing. Jaroslav Rožnovský, CSc.

Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, Kroftova 43, 616 67 Brno

Ústav šlechtění a množení zahradnických rostlin, zahradnická fakulta Mendelovy univerzity v Brně, Valtická 337, 691 44 Lednice

mobil: 724 185 617,

jaroslav.roznovsky@chmi.cz

DYNAMIKA DVOCH PEĽOVÝCH SEZÓN RODU *CORYLUS* V PREDHORÍ STAROHORSKÝCH VRCHOV: REAKCIA NA ROZDIELNE METEOROLOGICKÉ PODMIENKY PROSTREDIA

DYNAMICS OF TWO POLLEN SEASONS OF THE GENUS *CORYLUS* IN THE FOOTHILLS OF THE STAROHORSKÉ VRCHY MTS.: RESPONSE TO DIFFERENT METEOROLOGICAL CONDITIONS

Jaroslav ŠKVARENINA¹⁾, Lenka BALKOVÁ²⁾, Janka LAFFÉRISOVÁ³⁾, Iľja VYSKOT⁴⁾

ŠKVARENINA, J., BALKOVÁ, L., LAFFÉRISOVÁ, J., VYSKOT, I.: Dynamika dvoch peľových sezón rodu *Corylus* v predhorí Starohorských vrchov: reakcia na rozdielne meteorologické podmienky prostredia

Dynamics of two pollen seasons of the genus *Corylus* in the foothills of the Starohorské vrchy Mts.: response to different meteorological conditions. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

ABSTRAKT

Mestská vegetácia a komunálne lesy, parky a záhrady poskytujú obyvateľom nespočetný rad prospešných benefitov v podobe zlepšovania podmienok životného prostredia. Negatívnu stránkou bohatého zastúpenia vegetácie v prostredí mesta môžu byť polinózy vyvolané niektorými zástupcami urbánnej vegetácie medzi ktoré patrí aj lieska. V predloženej práci sme sa zamerali na vyhodnotenie peľových sezón rodu lieska (*Corylus*) v klimaticky výrazne odlišných rokoch 2018 a 2020 na území Banskej Bystrice. V roku 2020 bol štart hlavnej peľovej sezóny už 4. februára, avšak v roku 2018 začala hlavná peľová sezóna až o mesiac neskôr a to 2. marca. Stanovili sme základné aerobiologické charakteristiky ako ročný peľový index (API), sezónny peľový index (SPI) pomocou metódy 95%, jednotlivých sezón rodu *Corylus*. SPI dosiahol maximálnu hodnotu v roku 2018 (3725 PZ.m-3), v roku 2020 bolo najdlhšie trvanie hlavnej peľovej sezóny (44 dni) a maximálna peľová koncentrácia bola 682 PZ.m-3 (5. marca 2020). Hlavným cieľom bolo preskúmať vplyv vybraných meteorologických prvkov (slnečný svit, teplota a relatívna vlhkosť vzduchu, zrážky, rýchlosť vetra, suma aktívnych teplôt a i.) na koncentráciu peľových zŕn liesky počas periódy ich kulminácie. Ako štatistický najvýznamnejšie sa prejavili sumy aktívnych teplôt nad 0 °C a 5 °C a tiež maximálne teploty vzduchu, resp. aj minimálne teploty vzduchu. Poznatky o sezónnej dynamike peľových zŕn majú široké uplatnenie napríklad v alergológii, ale taktiež pri manažmente arboristiky v komunálnom lesníctve.

Kľúčové slová: peľové zrná, palynológia, alergény, meteorologické prvky, peľové indexy, peľové sezóny

1. ÚVOD

Mestské (urbánne) lesníctvo sa zameriava na starostlivosť a manažment jednotlivých stromov a populácií stromov v meste za účelom zlepšenia mestského prostredia. Lesy a vegetácia, ktoré boli zahrnuté do mestského prostredia, preukazujú priaznivé účinky pre obyvateľov, ktorí tam žijú. Plochy vegetácie zmiernujú účinky mestského tepelného ostrova prostredníctvom evapotranspirácie a zatienia ulíc a budov. Lesy a vegetácia, podporujú pozitívnu psychiku, zotavenie sa zo stresu a zlepšujú koncentráciu a produktivitu a tiež poskytuje celý rad ekosystémových služieb.

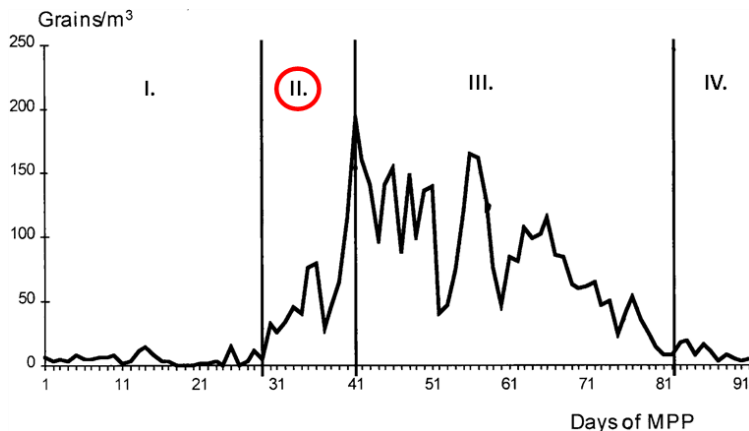
Na druhej strane stromy a vegetácia môžu byť príčinami polinóz značnej časti obyvateľstva. Ako uvádzajú napríklad Križo (2004), Škvareninová *et al.* (2011). Polinózy v súčasnom období patria medzi najčastejšie alergické ochorenia, ktorými trpí takmer tretina populácie v Európe (Galán *et al.* 2016). Pre správnu diagnostiku polinóz, vhodné načasovanie preventívnej liečby či úpravu denného režimu pacienta sú veľmi dôležité informácie o výskyte peľových alergénov v ovzduší, ktoré monitorujú stanice peľovej informačnej služby (Ščevková a Mičieta 2016; Lafférová *et al.* 2008).

Zmenami klímy dochádza k predlžovaniu peľovej sezóny o niekoľko dní, čo značne zhoršuje stav peľovým alergikom (D'Amato *et al.* 2013). Práve na základe výskumu, sledovania a skúmania peľových zŕn a ich výskyte v jednotlivých rokoch, vzhľadom na zmenu meteorologických parametrov, vieme dopomôcť k vytvoreniu peľových kalendárov s cieľom zefektívnenia liečby alergikom a taktiež upozornenia na zvýšenie množstva daného alergénu v ovzduší počas určitej fázy roka (Balková 2023).

Cieľom predkladanej práce je stanovenie základných aerobiologických charakteristík dvoch palinologicky odlišných rokov 2018 a 2020, a taktiež zhodnotenie vplyvu vybraných meteorologických prvkov na množstvo peľových zŕn alergénu *Corylus* vo vyššie spomenutých rokoch.

2. MATERIÁL A METÓDY

Údaje peľovej služby pre rod liesky – *Corylus*, sme získali zo stanice v Banskej Bystrici, Regionálneho úradu verejného zdravotníctva so sídlom v Banskej Bystrici, kde sa aeropalynologický monitoring realizuje pomocou volumetrického rotačného peľového lapača Burkard. Tento je umiestnený na streche pavilónu infektológie, na Starej Fakultnej nemocnici s Poliklinikou v Banskej Bystrici (nadmorská výška 375 m; N 48° 44' 28", E 19° 9' 53"). Meteorologické údaje sme získali zo Slovenského hydrometeorologického ústavu, stanica Banská Bystrica, Zelená 5 (nadmorská výška 427 m; N 48° 44' 1", E 19° 7' 1") Lafférová (2023).



Obr. 1 Príklad priebehu krivky hlavnej peľovej sezóny (MPS/MPP) podľa Valencia-Barrera *et al.* (2002). V červenom krúžku je označená perióda kulminácie (II.), t. j. obdobie v ktorom sa dosiahne najvyššia hodnota koncentrácie peľových zrn.

Fig. 1 Example of the main pollen season (MPS/MPP) curve according to Valencia-Barrera *et al.* (2002). The red circle indicates the peak period (II), i.e. the period in which the highest pollen grain concentration is reached.

Aerobiologické dáta sme spracovali nasledovne:

API (Annual pollen index) Ročný peľový index je súčet priemerných denných koncentrácií peľových zrn (vyjadrený ako peľové zrná na meter kubický (PZ.m⁻³), v angličtine: Grains. m⁻³), počas celého roka a používa sa ako synonymum ročného počtu peľu, resp. v niektorých krajinách alebo prácach je ročný peľový index (API) označovaný aj ako ročný peľový integrál (API_{in}).

SPI (Seasonal pollen index) Sezónny peľový index, ktorý je definovaný ako ročný súčet priemerných denných koncentrácií počas hlavnej peľovej sezóny. Hlavnú peľovú sezónu sme stanovili podľa tzv. 95 % metódy (Emberlin *et al.* 2007, Jato *et al.* 2006, Šaulienė *et al.* 2014): tak, že deň v ktorom kumulatívny počet peľových zrn v období od 1. januára do 30. júna dosiahol hodnotu $\geq 2,5\%$ sa určil ako dátum začiatku peľovej sezóny, a ako koniec sezóny bol označený deň, keď kumulatívny počet peľu dosiahol hodnotu $\geq 97,5\%$ ročného počtu peľových zrn t. j. obdobie v ktorom sa vyskytuje v ovzduší 95 % celkového ročného množstva peľu (Nilsson a Persson 1981; Puc a Kasprzyk 2013). Dátumy začiatku a konca sezóny môžu byť vyjadrené aj ako počet dní od 1. januára daného roka (DOY – Day of year).

MPS (Main pollen season, resp. MPP - Main pollen period) Hlavná peľová sezóna, ktorá vymedzuje obdobie v ktorom sa vyskytuje najviac peľu t. j. v našom prípade ide o obdobie v ktorom sa zaznamenáva 95 % celkového ročného počtu peľových zrn. Obr. 1 zobrazuje krivku koncentrácie peľu v hlavnej peľovej sezóne (MPS). Podľa práce Valencia-Barrera *et al.* (2002) sa MPS sa delí na štyri periódy: obdobie MPS pred

rastúcim inflexným bodom (I.), obdobie medzi týmto inflexným bodom a maximálnou zaznamenanou hodnotou koncentrácie peľu, tzv. perióda kulminácie (II.), obdobie medzi maximálnou hodnotou a klesajúcim inflexným bodom (III.) a zvyšné obdobie MPS do ukončenia sezóny (IV.).

Perióda kulminácie predstavuje pre alergikov obdobie najvyššej fyziologickej záťaže (Valencia-Barrera et al. 2002, Bastl et al. 2018, Laaidi et al. 2003). Taktiež ide o obdobie intenzívnej produkcie peľových zŕn zo samčích pohlavných orgánov rastlín, ktoré je len minimálne ovplyvnené staršími usadenými peľovými zrnami (sekundárna kontaminácia), napr. ich sfukovaním zo striech a iných objektov. Koncentráciu peľových zŕn liesky vo vzťahu k priebehu vybraných meteorologických prvkov (slnečný svit, teplota a relatívna vlhkosť vzduchu, zrážky, rýchlosť vetra, suma aktívnych teplôt a i.) počas periódy kulminácie sme hodnotili podľa Šmelka (1987), Studentovým testom významnosti korelačných koeficientov.

3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

3.1 Vyhodnotenie priebehu peľových sezón

Na podklade údajov peľovej služby zo stanice v Banskej Bystrici boli aerobiologické údaje spracované a boli urobené výpočty ročného peľového indexu a sezónneho peľového indexu. Použili sme metódu 95%, a na základe toho určili dátum začiatku a dátum konca peľovej sezóny. Výsledky z daných výpočtov možno vidieť v nižšie uvedenej tabuľke č.1.

Tab. 1 Základné aerobiologické charakteristiky peľových sezón rodu *Corylus* v rokoch 2018 a 2020 pre stanicu Banská Bystrica (peľové zrná na meter kubický (PZ.m⁻³))

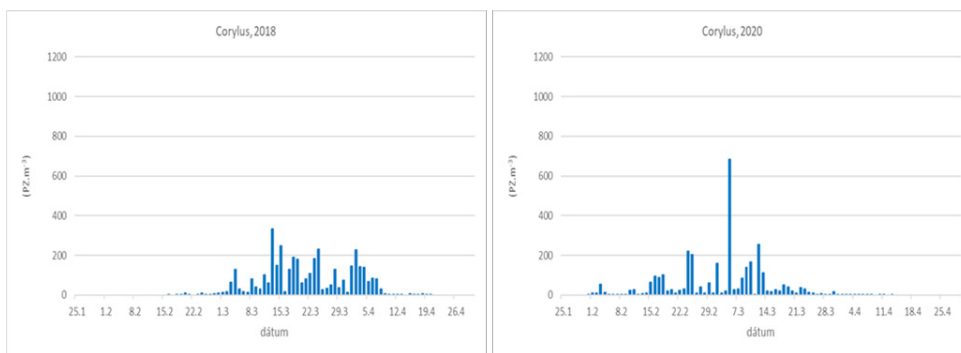
Table 1 Basic aerobiological characteristics of the *Corylus* pollen seasons in 2018 and 2020 for the Banská Bystrica station (pollen grains per cubic metre (Grains. m⁻³))

		2018	2020
Ročný peľový index (API)	PZ-m ⁻³	3856	3187
začiatok	dátum	16.02.	31.01.
koniec	dátum	20.04.	13.04.
trvanie	dni	64	74
Sezónny peľový index (SPI)	PZ-m ⁻³	3725	3018
začiatok	dátum	02.03.	04.02.
koniec	dátum	07.04.	23.03.
trvanie	dni	37	44
Dátum max. koncent. /hodnota	dátum / PZ.m ⁻³	13.03./334	05.03./682

Z daných výsledkov (tab. 1) je možné sledovať rozdiely medzi množstvom peľových

zrn z celého roka (API), a množstvom peľových zrn nameraných počas hlavnej peľovej sezóny. Najväčší rozdiel v množstve peľových zrn možno sledovať v roku 2020, kedy je rozdiel medzi množstvom peľových zrn API a SPI 169 PZ m⁻³. Podobné rozdiely sú dobrým príkladom, ktoré nám ukazujú dôležitosť výpočtu sezónneho peľového indexu, nakoľko práve v hlavnej peľovej sezóne dochádza k najväčšej záťaži pre alergikov. Z hľadiska trvania hlavnej peľovej sezóny bola najdlhšia sezóna v roku 2020, čo však automaticky neznamenalo, že táto sezóna bola najproduktívnejšou z hľadiska množstva peľových zrn. Na základe vyššie uvedenej tabuľky je možné podobným spôsobom porovnávať jednotlivé údaje API, SPI a MPS a množstvo peľových zrn v priebehu pozorovaných rokov.

Porovnaním nástupu a priebehu peľových sezón 2018 a 2020 možno konštatovať aj ďalšie dôležité skutočnosti. V roku 2020 začala celková peľová sezóna už 31. januára 2020, zatiaľ čo v roku 2018 štart sezóny začal 19. februára 2018 (obr. 2; tab. 1). Z pohľadu pacientov s akútnou peľovou alergiou na liesku je však dôležitá hlavná peľová sezóna (predstavuje 95 % peľovej záťaže). Táto štartuje v roku 2020 oproti roku 2018 o mesiac skôr (2020: 4. februára; 2018: 2. marca). Hlavná peľová sezóna v roku 2020 trvá až 44 dní, v roku 2018 je jej trvanie 37 dní. Najmarkantnejšie zistenie je práve výrazne (cca mesačné) posunutie peľovej sezóny roku 2020 do skoršieho kalendárneho termínu, čo môže byť nepríjemné pre alergika, ktorý sa riadi bežne dostupnými peľovými kalendármi z webových stránok, kde je zachytený priemerný nástup peľovej sezóny celoplošne (napr. pre Strednú Európu, resp. Slovensko). Zároveň v ňom chýba upozornenie na periódu kulminácie, ktorá ako už bolo uvedené vyššie je zlomovým zdravotným obdobím v symptomatických prejavoch polynózy (Galán *et al.* 2010). Z hľadiska komfortného zvládnutia sezónnej alergie by mal pacient s diagnostikovanou polinózou sledovať peľové informácie hlavne zo serióznych informačných zdrojov, napr. Peľové spravodajstvo RÚVZ (www.pelovespravodajstvo.sk). Táto stránka síce tiež obsahuje tzv. „peľový kalendár“ ako dlhodobú a priemernú informáciu, no zároveň poskytuje aktuálne informácie v reálnom čase v tabuľke koncentrácie alergénov v ovzduší pre príslušný kraj spolu s príslušným odborným textovým komentárom peľovej situácie.



Obr. 2 Denné koncentrácie peľových zrn rodu *Corylus* (PZ.m⁻³) v rokoch 2018 a 2022.

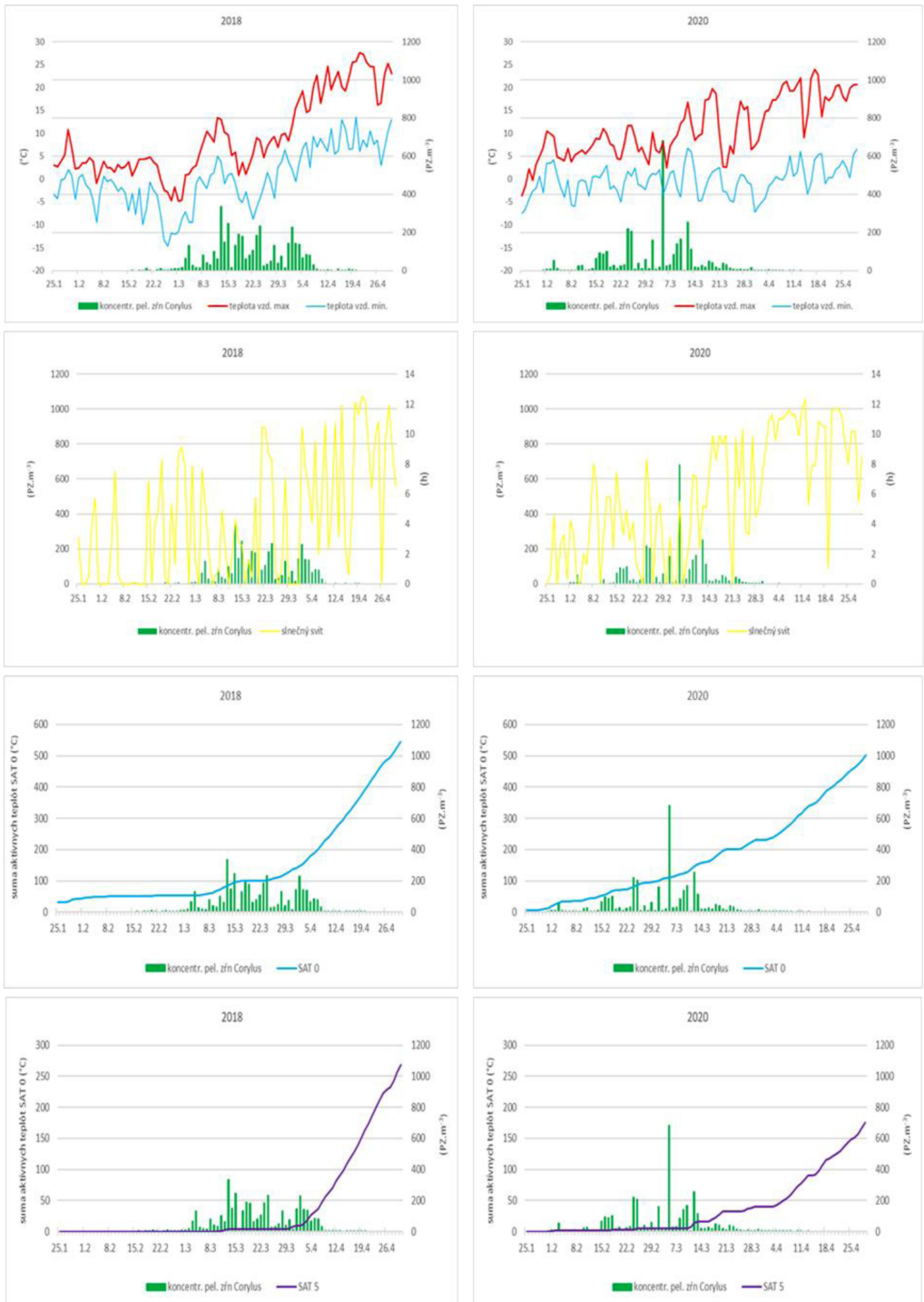
Fig. 2 Daily concentrations of *Corylus* pollen grains (Grains.m⁻³) in 2018 and 2022.

3.2 Vyhodnotenie vplyvu meteorologických prvkov

Pre hodnotenie vplyvu počasia sme v prvej časti použili jednoduchú grafickú metódu založenú na podrobnej dennej analýze priebehu denných koncentrácií peľových zŕn a súbežného chodu sledovaného meteorologického prvku pre oba sledované roky. Vytvorili sme tak názorné obrázky kde sme porovnávali párový priebeh koncentrácie peľových zŕn k nasledovným meteoroprvkom: maximálna a minimálna denná teplota vzduchu, suma aktívnej teploty nad 0 °C a nad 5 °C, dĺžka trvania slnečného svitu, denné úhrny zrážok a dĺžka ich trvania, priemerná denná relatívna vlhkosť vzduchu, priemerná denná rýchlosť vetra (obr. 3 a obr. 4). Pri hodnotení vplyvov meteorologických prvkov na množstvo peľových zŕn rodu *Corylus* v ovzduší sme sa zamerali na periódu kulminácie, teda obdobie do dosiahnutia najvyššieho množstva peľových spór v ovzduší, pričom sme využili Studentový test významnosti korelačných koeficientov. Týmto spôsobom sme štatisticky dospeli k vzťahom s najväčšou významnosťou pre ďalší výskum. Výsledky výpočtov štatistickej významnosti korelačných koeficientov sme spracovali do tabuľky č. 2. Vzhľadom na rôzne dátumy začiatku pelenia u rodu *Corylus* v jednotlivých rokoch, bol kvôli jednotnosti hodnôt na osiach grafov stanovený rovnaký dátum začiatku, a to od 25.01. do 30.04. Jednotlivé vzťahy možno pozorovať na priložených obrázkoch (obr. 3 a 4).

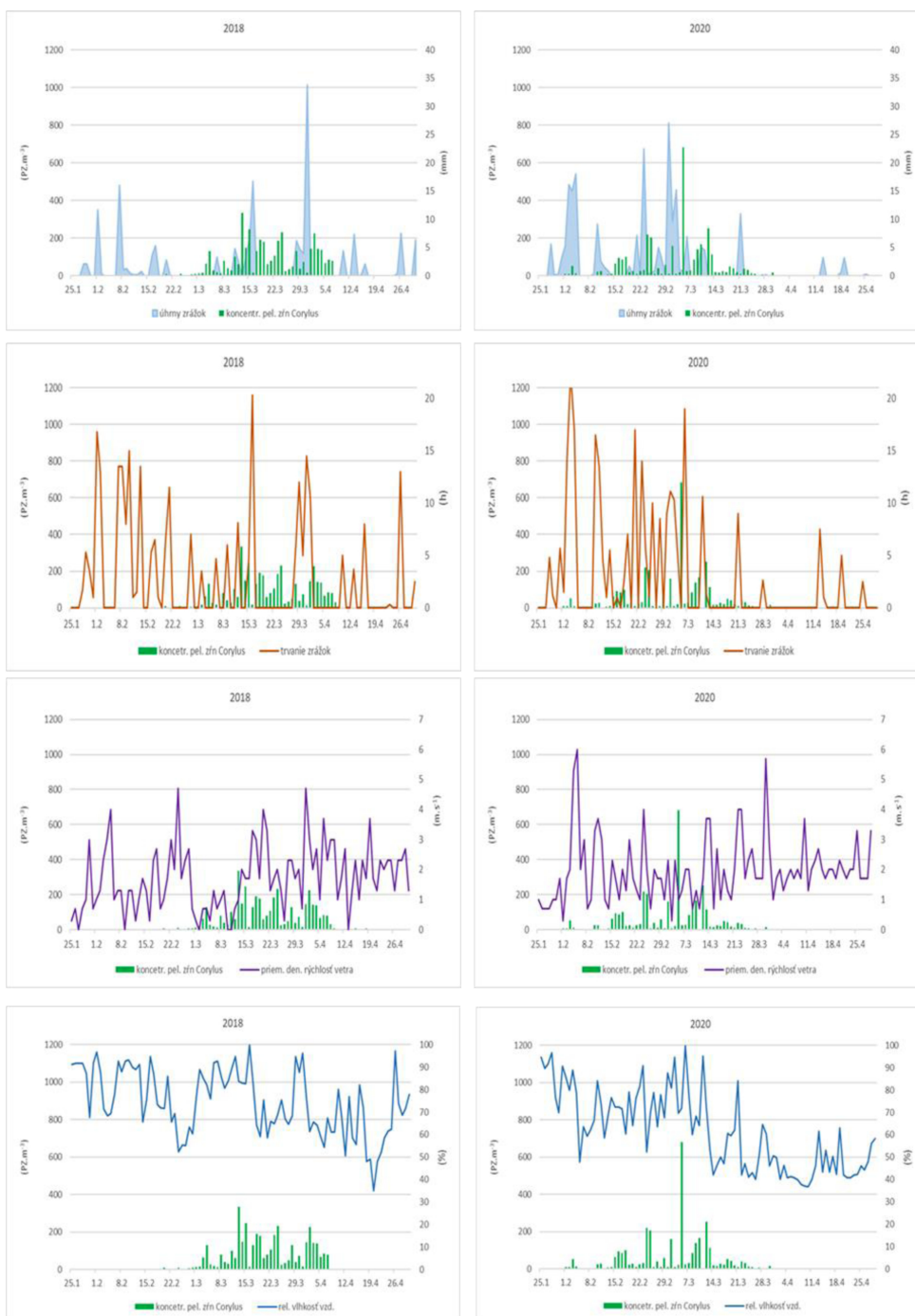
Na základe hodnotenia vidíme, že z meteorologických prvkov majú na koncentráciu peľových zŕn počas periódy kulminácie (II.) najvýraznejší vplyv teplotné prvky. V roku s najneskorším nástupom peľovej sezóny je to maximálna aj minimálna teplota vzduchu a taktiež hodnoty súm aktívnych teplôt nad 0 °C ako aj nad 5 °C. V roku 2020 bola situácia do istej miery odlišná. Maximálna denná teplota mala na koncentráciu peľových zŕn počas periódy kulminácie len štatisticky málo významný vplyv ($\alpha < 0,05$ *). Minimálna teplota vzduchu bola vzhľadom na bezmravový priebeh tejto periódy ne-signifikantná. Nakoľko bola perióda kulminácie peľových zŕn posunutá o mesiac skôr a končila už 23. marca suma aktívnych teplôt nad 5 °C sa jej už výrazne nedotkla.

Ako uvádzame vyššie (tab. 1, obr. 2) peľová sezóna začína v Banskej Bystrici u rodu *Corylus* skoro na jar. Rod lieska *Corylus* patrí k najskoršie kvitnúcim druhom na našom území. Spolu s jelšou (*Alnus*), topoľom (*Populus*), tisom (*Taxus*) a borievkou (*Juniperus*) preto patria k prvým rastlinám objavujúcim sa v peľovom kalendári alergikov (Laffersová 2023). Podobné zistenia uvádzajú Škvareninová *et al.* (2010) kedy lieska obyčajná začína pršať peľ častokrát už počas januárových teplých períod, pričom peľ liesky vidí fenologický pozorovateľ priamo na snehu v podobe žltých škvŕn. Aj Obstová (2012) konštatuje, že v jarnom období v roku 2011 mal v ovzduší českého mesta Humpolec najvyššie zastúpenie alergiológicky významný peľ čeľadi *Corylaceae*, konkrétne rody *Corylus* a *Alnus*, ktoré spôsobujú skoré jarné polinózy.



Obr. 3 Párový priebeh koncentrácie peľových zŕn rodu *Corylus* a maximálnej/minimálnej teploty vzduchu, slnečného svitu, súm aktívnych teplôt nad 0 °C a nad 5 °C v rokoch 2018 a 2020.

Fig. 3 Paired course of *Corylus* pollen grain concentration and maximum/minimum air temperature, sunshine, active temperature sums above 0 °C and above 5 °C in 2018 and 2020.



Obr. 4 Párový priebeh koncentrácie peľových zŕn rodu *Corylus* a denných úhrnov a trvania zrážok, priemernej rýchlosti vetra a priemernej relatívnej vlhkosti vzduchu v rokoch 2018 a 2020.

Fig. 4 Paired course of *Corylus* pollen grain concentration and daily precipitation totals and duration, mean wind speed and mean relative humidity in 2018 and 2020.

Tab. 2 Štatistická významnosť korelačných koeficientov medzi meteorologickými prvkami a koncentraciami peľových zrn liesky v jednotlivých rokoch obdobia 2017 až 2021 (podľa Šmelka (1987)). $\alpha > 0,1$ n.s – nevýznamný (not significant), $0,1 < \alpha < 0,05$ * – málo významný, $0,05 < \alpha < 0,01$ ** – významný, $0,01 < \alpha < 0,001$ *** – veľmi významný, $\alpha < 0,001$ **** – vysoko významný.

Table 2 Statistical significance of correlation coefficients between meteorological elements and hazel pollen grain concentrations in 2018 and 2020 (according to Šmelko (1987)). $\alpha > 0.1$ n.s - not significant, $0.1 < \alpha < 0.05$ * - low significant, $0.05 < \alpha < 0.01$ ** - significant, $0.01 < \alpha < 0.001$ *** - very significant, $\alpha < 0.001$ **** - high significant.

	2018	2020
maximálna teplota vzduchu	***	*
minimálna teplota vzduchu	**	n.s.
suma aktívnych teplôt nad 0 °C	****	****
suma aktívnych teplôt nad 5 °C	****	n.s.
rýchlosť vetra	n.s.	n.s.
relatívna vlhkosť vzduchu	n.s.	n.s.
úhrn zrážok	n.s.	n.s.
trvanie zrážok	n.s.	*
trvanie slnečného svitu	n.s.	n.s.

Ak chceme porovnávať naše výsledky sledovaných peľových sezón z výsledkami iných autorov môžeme tak urobiť len s krajinami nachádzajúcimi sa v porovnateľných klimatických a geografických oblastiach (napr. Poľsko, Česká republika, Rakúsko a i.). Napríklad Piotrowska a Kaszewski (2006) na základe deväť ročnej (2001-2009) štúdie konštatujú, že začiatky nástupu peľových sezón liesky vo východnom Poľsku (Lublin) sa vyznačujú veľkou variabilitou (64 dní). Nami pozorované začiatky nástupu peľových sezón v Banskej Bystrici vykazovali vysokú mieru variability (30 dní). Tiež konštatujú, že hlavnou príčinou neskorých nástupov peľových sezón boli nízke minimálne teploty. Tento názor sa potvrdil aj v našich výsledkoch. Problémom takéhoto porovnávania sú však rozdielne roky pozorovaní. Preto sme v ďalšom kroku rozšírili diskusiu o porovnanie charakteristík peľových sezón *Corylus* v súbežne pozorovaných rokoch. V práci Piotrowska-Weryszko *et al.* (2018) hodnotia aerobiológiu *Corylus* na 13 staniách Poľska v roku 2018. Trvanie hlavnej peľovej sezóny (HPS) autori vypočítali tou istou metódou ak aj my (t.j. metódou 95 %). Dĺžka HPS sa pohybovala od 76 (Szczecin) po 31 dní (Krakow). Práve posledná uvedená hodnota výborne korešponduje s nami zistenou hodnotou HPS 37 dní (B. Bystrica). Podobne aj maximálna koncentrácia peľových zrn bola nameraná v totožný deň ako v B. Bystrici - 13. 03. 2018. Avšak najvyššia peľová koncentrácia bola u nás 334 PZ.m⁻³, zatiaľ čo v Lubline len 136 PZ.m⁻³.

Čo sa týka vplyvu meteorologických podmienok na koncentráciu peľových zrn *Corylus* v ovzduší, poskytuje odborná a vedecká literatúra pomerne rozdielne výsledky. Súvisí

to pravdepodobne s klimaticko-geografickými podmienkami rozdielnosti hodnotených regiónov, ako aj s obdobím, ktoré sa hodnotí a v neposlednom rade aj s fenologickým vývojom vegetácie (Škvareninová *et al.* 2010). Na našich výsledkoch to názorne vidíme na príklade roku 2020. Peľová sezóna síce trvala najdlhšie vo všetkých nami sledovaných rokoch 74 (CPS) resp. 44 (HPS), ale množstvo peľu v ovzduší, vyjadrené SPI bolo relatívne nízke (3018 PZ.m⁻³). Tento stav bol podmienený skorým nástupom fenofázy kvitnutia v roku 2020 a to v dôsledku veľmi miernej zimy a nadpriemerne teplej jari, najmä čo sa týka mesiaca marec. To veľmi podrobne dokladuje aj práca Ostrihoň *et al.* (2021) ktorá konštatuje, že marec 2020 bol o 1,2 °C teplotne nadnormálny a maximálne teploty vystupovali nad 21 °C, čo nakoniec vidíme aj na obrázku 3.

Nami zistené korelačné vzťahy medzi priebehom HPS a meteorologickými prvkami veľmi dobre korešponujú s výsledkami práce Grewling *et al.* (2014). V meste Poznaň v západnom Poľsku v rokoch 1996 až 2010 hodnotili peľové sezóny *Corylus* veľmi podobnou metódou stanovenia sezónneho peľového indexu (metódu 90%). Zistila sa štatisticky významná korelácia medzi maximálnou teplotou vzduchu a početnosťou peľu v čase kulminácie peľovej sezóny. Podstatné rozdiely sa však ukázali u maximálnych denných koncentrácií peľu liesky, ktoré sa pohybovali v intervale 15 - 138, u nás 344 – 682 PZ.m⁻³. Podobne značné rozdiely sme postrehli aj pri SPI, kde v Poznani boli hodnoty 112 – 473, v Banskej Bystrici 3018 – 3725 PZ.m⁻³. Možnú príčinu týchto markantných rozdielov môžeme vysvetliť spôsobom využívania krajiny. Mesto Poznaň je obklopené intenzívne poľnohospodársky využívanou krajinou, zatiaľ čo Banská Bystrica má okolitú krajinu tvorenú lesnými a pasienkovými spoločenstvami s vysokým zastúpením liesky obyčajnej.

V našej práci sa ako štatisticky veľmi až vysoko významný ukázal vzťah medzi početnosťou peľu v čase kulminácie peľovej sezóny a sumami aktívnych teplôt nad 0 °C (SAT 0). Totožné zistenie uvádzajú pre rakúske mesto Linz Schinko *et al.* (2021), a to pre liesku *Corylus* v roku 2018. Zistili že vzťah koncentrácie peľu liesky a sumy priemerných denných teplôt nad 0 °C významne korelovali ($\alpha < 0,001$) pre začiatok kvitnutia až kulmináciu peľu. Skonštatovali, že peľové obdobie liesky začalo 31. januára 2018 pri SAT 0 103,8 °C. U nás sme evidovali prvý nástup peľu 16. februára. 2018 a začiatok HPS 2. marca pri dosiahnutí SAT 0 52,4 °C. Tento časový posun je logický vzhľadom na posun nadmorskej výšky porovnávaných miest.

ZÁVER

Mestská vegetácia a komunálne lesy, parky a záhrady poskytujú obyvateľom nespočetný rad prospešných benefitov v podobe zlepšovania podmienok životného prostredia cez svoje environmentálne funkcie a ekosystémové služby. Negatívnou stránkou bohatého zastúpenia vegetácie v prostredí mesta môžu byť polinózy vyvolané niektorými

zástupcami urbánnej vegetácie. Avšak, vzhľadom na fakt, že peľové alergie v Európe majú za posledné roky stúpajúcu tendenciu, pričom neustále viac a viac ľudí trpí polinózami, je dôležitosť skúmania peľových sezón a faktorov, ktoré majú vplyv na intenzitu a dĺžku týchto sezón nesmierny význam. Dôležitosť skúmania peľových zŕn jednotlivých alergénov je pre medicínske účely, najmä pre pacientov absolútne nevyhnutný vzhľadom k nastaveniu účinnej liečby. Aeropalynologickým monitorovaním získavame množstvo nových informácií, čím nadobúdame nové znalosti o mechanizme peľových alergií.

Výpočtami a grafickým spracovaním výsledkov použitých v tejto práci sme získali veľké množstvo nových poznatkov, ktoré sú použiteľné k ďalšiemu skúmaniu. Z hľadiska stanovenia sezónneho peľového indexu sa nám veľmi pozitívne uplatnilo použitie metódy 95%, ktorú využívajú aj iní zahraniční autori. Zo získaných výsledkov bol viditeľný skorý dátum začiatku prášenia peľu u liesky, čo značne korelovalo s hodnotami maximálnej a minimálnej teploty. Tento fakt možno pozorovať na roku 2018 kedy nízke minimálne teploty pod 10°C na konci mesiaca február značne posunuli začiatok prášenia liesky v porovnaní s rokom 2020, ktorý zas potvrdil, že liesky patria medzi prvé peľové alergény nachádzajúce sa v ovzduší. Rozdiel kvantity peľových zŕn v ovzduší a časové rozdiely medzi hodnotami API a SPI zase preukázali podstatnosť stanovovania sezónneho peľového indexu a hlavnej peľovej sezóny, nakoľko v niektorých rokoch sa tieto hodnoty značne odlišujú až s rozdielom v stovkách peľových zŕn na m⁻³. Stanovenie SPI pomocou metódy 95% pomôže efektívnejšie stanoviť hlavnú peľovú sezónu, a tým pomôcť k efektívnejšej liečbe polinotikov.

V súvislosti s koncentráciou peľových zŕn liesky vo vzťahu k priebehu vybraným meteorologickým prvkom ako slnečný svit, teplota, relatívna vlhkosť vzduchu, zrážky, rýchlosť vetra, suma aktívnych teplôt, a ostatných nami zvolených parametrov sa na štatistické určenie vzťahov s najväčšou významnosťou osvedčil Studentový test korelačných vzťahov podľa Šmelka (1987). Z hľadiska významnosti nám najlepšie vyšla suma aktívnych teplôt nad 0°C (SAT 0) a suma aktívnych teplôt nad 5°C (SAT 5), ktoré významne korelovali takmer v oboch sledovaných rokoch. Taktiež vo všetkých rokoch vyšiel rôzne významne aj vzťah s maximálnou teplotou vzduchu.

Naopak, z hľadiska významnosti nám meteorologické prvky rýchlosť vetra a čiastočne aj relatívna vlhkosť vzduchu vyšli menej významné, čo ide pravdepodobne pripísať vlastnostiam samotných peľových zŕn rodu *Corylus*, ktoré na základe svojej morfológie nie sú až tak ovplyvnené vlhkosťou. Z hľadiska rýchlosti vetra je možné predpokladať, že ten bude zohrávať väčšiu úlohu pri druhotnej kontaminácii, kedy dochádza k sfúkaniu usadeného peľu z iných objektov.

Vzhľadom na množstvo premenných, ktoré vplývajú na množstvo peľového alergénu *Corylus* v ovzduší, a taktiež vzhľadom na zistené korelačné vzťahy medzi jednotlivými meteorologickými prvkami a kvantitou zŕn je jednoznačne potrebné v danom výskume pokračovať, a konkrétne sa zameriavať na viacfaktorové korelačné vzťahy, pričom

do budúca je možné zväziť určenie korelácie a následne grafické znázornenie kombinácie viacerých faktorov dokopy, nakoľko práve na kombináciu faktorov reaguje rastlina ako celok, a úplne diferencovať vplyv jedného faktora nie je možné. Taktiež by bolo vhodné zvýšiť štatistickú reprezentatívnosť a predĺžiť sledované obdobie, resp. zväziť porovnanie výsledkov peľového monitoringu v Banskej Bystrici s inými geografickými oblasťami.

Pod'akovanie

Autori ďakujú za podporu projektom Agentúry na podporu výskumu a vývoja (APVV): APVV-21-0224, APVV-18-0347, APVV-19-0340 a APVV-15-0425. Taktiež ďakujú Vedeckej grantovej agentúre MŠVVaŠ SR a SAV (VEGA) za podporu projektu: VEGA 1/0443/23.

LITERATÚRA

- Balková, L. (2023). *Vplyv meteorologických parametrov na výskyt peľových alergénov rodu Corylus v ovzduší Banskej Bystrice*: diplomová práca. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. Fakulta ekológie a environmentalistiky. 2023. 58 s.
- Bastl, K., Kmenta, M., Berger, M., & Berger, U. (2018). The connection of pollen concentrations and crowd-sourced symptom data: new insights from daily and seasonal symptom load index data from 2013 to 2017 in Vienna. *World Allergy Organization Journal*, 11(1), 1-8.
- D'Amato, G., Baena-Cagnani, C. E., Cecchi, L., Annesi-Maesano, I., Nunes, C., Ansotegui, I., & Canonica, W. G. (2013). Climate change, air pollution and extreme events leading to increasing prevalence of allergic respiratory diseases. *Multidisciplinary respiratory medicine*, 8(1), 1-9.
- D'Amato, G., & D'Amato, M. (2023). Climate change, air pollution, pollen allergy and extreme atmospheric events. *Current Opinion in Pediatrics*, 35(3), 356-361
- Emberlin, J., Smith, M., Close, R., & Adams-Groom, B. (2007). Changes in the pollen seasons of the early flowering trees *Alnus* spp. and *Corylus* spp. in Worcester, United Kingdom, 1996–2005. *International Journal of Biometeorology*, 51, 181-191.
- Galán, C., Alcázar, P., Oteros, J., García-Mozo, H., Aira, M. J., Belmonte, J., & Domínguez-Vilches, E. (2016). Airborne pollen trends in the Iberian Peninsula. *Science of the Total Environment*, 550, 53-59.
- Galán, I., Prieto, A., Rubio, M., Herrero, T., Cervigón, P., Cantero, J. L., & Tobías, A. (2010). Association between airborne pollen and epidemic asthma in Madrid, Spain: a case-control study. *Thorax*, 65(5), 398-402.
- Grewling, L., Janerowicz, D., Nowak, M., Polanska, A., Jackowiak, B., Czarnecka-Operacz, M., & Smith, M. (2014). Clinical relevance of *Corylus* pollen in Poznan, western Poland. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 21(1), 64-69.
- Jato, V., Rodríguez-Rajo, F. J., Alcázar, P., De Nuntis, P., Galán, C., & Mandrioli, P. (2006). May the definition of pollen season influence aerobiological results?. *Aerobiologia*, 22, 13-25.
- Križo, M. (2004). *Veda na pomoc polinotikom* [online]. Dostupné na internete: <https://www.enviromagazin.sk/envirol/pel.html>
- Laaidi, M., Thibaudon, M., & Besancenot, J. P. (2003). Two statistical approaches to forecasting the start and duration of the pollen season of *Ambrosia* in the area of Lyon (France). *International Journal of Biometeorology*, 48(2), 65-73.
- Lafférová J. (2023). *Peľové spravodajstvo*. Regionálny úrad verejného zdravotníctva so sídlom v Banskej Bystrici [online]. Dostupné na internete: < <https://www.vzbb.sk/sk/aktuality/pel/index.php> >
- Nilsson, S., & Persson, S. (1981). Tree pollen spectra in the Stockholm region (Sweden), 1973–1980. *Grana*, 20(3), 179-182.
- Obstová, B. (2012). *Pylová spektra v ovzduší rôznych typů městské zástavby: sezónní dynamika a význam pro alergologii*: diplomová práca. Masarykova univerzita. Přírodovědecká fakulta. 2012. 119 s.

- Ostrihoň, M., Škvarenina, J., & Korísteková, K. (2021). Effect of Selected Meteorological Factors on Forest Litter Moisture Content and Fire Danger Degree. *Delta*, 15(1), 58-70.
- Piotrowska, K., & Kaszewski, B. M. (2009). The influence of meteorological conditions on the start of the hazel (*Corylus L.*) pollen season in Lublin, 2001-2009. *Acta Agrobotanica*, 62(2), 59-66.
- Piotrowska-Weryszko, K., Konarska, A., Kaszewski, B. M., Rapiejko, P., Puc, M., Ziemianin, M., & Wieczorkiewicz, A. (2018). Analysis of *Corylus* pollen seasons in selected cities of Poland in 2018. *Alergoprofil*, 14(1), 21-26.
- Puc, M., & Kasprzyk, I. (2013). The patterns of *Corylus* and *Alnus* pollen seasons and pollination periods in two Polish cities located in different climatic regions. *Aerobiologia*, 29, 495-511.
- Schinko, H. A., Lamprecht, B., & Schmidt, R. (2021). How will climate change alter the dynamics of airborne pollen and pollen load of allergenic plants? The “exceptionally warm year” 2018 in Linz (Upper Austria)—a potential model for the future based on long-term trends. *Allergo Journal International*, 30, 96-108.
- Šaulienė, I., Šukienė, L., Severova, E., & Kalnina, L. (2014). Comparison of *Alnus*, *Corylus*, *Betula* pollen seasons in Riga, Moscow and Vilnius. *Aerobiologia*, 30, 423-433.
- Ščevková, J., Mičieta, K. 2016. *Všeobecná a aplikovaná palynológia*. Bratislava: Univerzita Komenského v Bratislave, 146 s., 2016. ISBN 978-80-223-4193-6
- Škvareninová, J., Škvarenina, J., Benčaťová, B., Lafféřsová, J., Hříbik, M., & Šiška, B. (2010). Meteorologická analýza fenologických fáz a koncentrácií peľových zrn liesky obyčajnej (*Corylus avellana L.*) v Zvolenskej kotline. *Meteorologický časopis*, 13, 97-102.
- Škvareninová, J., Benčaťová, B., Škvarenina, J., Šiška, B., Hříbik, M., & Lafféřsová, J. 2011. Variation of spring phenological phases and airborne pollen grains of the European hazel (*Corylus avellana L.*) in the Zvolen basin (Slovakia) as influenced by meteorological factors. *Prace Geograficzne (126)*, Krakow 2011, p. 85-94
- Šmelko, Š. (1987). *Štatistické metódy v lesníctve*. ES VŠLD Zvolen, 207 s.
- Valencia-Barrera, R., Comtois, P., & Fernández-González, D. (2002). Bioclimatic indices as a tool in pollen forecasting. *International journal of biometeorology*, 46, 171-175.

www.pelovespravodajstvo.sk

Kontaktné údaje autorov:

¹⁾ Lesnícka fakulta TU vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 96001 Zvolen; email: skvarenina@tuzvo.sk

²⁾ Fakulta ekológie a environmentalistiky TU vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 96001 Zvolen

³⁾ Regionálny úrad verejného zdravotníctva, Cesta k nemocnici 1, 975 56 Banská Bystrica

⁴⁾ Mendelova univerzita v Brne, Fakulta regionálneho rozvoje a mezinárodných štúdií, Ústav environmentalistiky a prírodných zdrojů, tř. Generála Píky 7, 61300 Brno, Česká republika

Dynamics of two pollen seasons of the genus *Corylus* in the foothills of the Starohorské vrchy Mts.: response to different meteorological conditions

Abstract

Urban vegetation and communal forests, parks and gardens provide a myriad of benefits to residents in the form of improved environmental conditions. The downside of the abundant vegetation in the urban environment may be the pollinosis induced by some representatives of urban vegetation, including hazel. In the present work we focused on the evaluation of pollen seasons of the genus hazel (*Corylus*) in climatically significantly different years 2018 and 2020 in the territory of Banská Bystrica. In 2020, the start of the main pollen season was already on 4 February, but in 2018 the main pollen season started only one month later on 2 March. We determined basic aerobiological characteristics such as annual pollen index (API), seasonal pollen index (SPI) using the 95% method, individual seasons of the genus *Corylus*. SPI reached a maximum value in 2018 (3725 Grains.m⁻³), in 2020 the SPI was 3018 Grains.m⁻³. In 2020, the duration of the main pollen season was the longest (44 days) and the maximum pollen concentration was 682 Grains.m⁻³ (5 March 2020). The main objective of this paper was to investigate the influence of selected meteorological elements (sunshine, temperature and relative humidity, precipitation, wind speed, sum of active temperatures, etc.) on the pollen concentration of hazelnut grains during their peak period. The sums of active temperatures above 0 °C and 5 °C, as well as maximum and minimum air temperatures, respectively, were the most statistically significant. The knowledge about the seasonal dynamics of pollen grains has a wide application, for example, in allergology, but also in arboricultural management in community forestry.

Keywords: pollen, hazel, grains, palynology, allergens, meteorological elements, pollen indices, pollen seasons

BROWN HARE (*LEPUS EUROPAEUS*) AS A BIOINDICATOR OF CHANGES IN THE AGRICULTURAL LANDSCAPE IN THE CZECH REPUBLIC

Andrej KVAS¹, Ladislav ZELINKA⁺, Ilja VYSKOT², Jaroslav VIDO¹, Jaroslav ŠKVARENINA¹

KVAS A., ZELINKA L., VYSKOT I., VIDO J., ŠKVARENINA J.: Brown Hare (*Lepus europaeus*) as a bioindicator of changes in the agricultural landscape in the Czech Republic, Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

ABSTRACT

The European brown hare (*Lepus europaeus* Pallas, 1778) is a vital bioindicator that reflects the health of its environment, yet its numbers have been declining consistently across Europe for several decades. This study assesses the impact of large-scale agriculture on hare populations, particularly within the context of the HA Postoupy-Hradisko region, where numbers have fallen sharply since the 1970s. Historical data indicate that optimal densities of 50-60 hares per 100 hectares, as seen in the Netherlands and the best habitats in Poland, have not been sustained. Changes in land management from extensive to intensive agriculture, especially the shift to large monoculture fields, have been a primary driver of habitat degradation. Political and socio-economic decisions, particularly in the former Czechoslovakia, have resulted in a tenfold increase in average field size, eliminating boundaries and windbreaks essential for hare habitation. Our findings confirm that such alterations in landscape structure have significantly contributed to the decline in hare numbers, with monocultures of maize and oilseed rape failing to provide adequate refuge or sustenance. The recommended hunting quotas and thresholds, as suggested by population viability analyses, are no longer applicable under current agricultural practices. This paper argues for an immediate re-evaluation of land management policies and the establishment of diverse, hare-friendly habitats to alleviate the ecological stress on this species and encourage recovery through its rapid reproductive cycle.

Keywords: European brown hare, landscape change, agricultural intensification, population decline, bioindicator species

INTRODUCTION

The problem of the regularly declining numbers of brown hares (*Lepus europaeus* Pallas, 1778) in Europe has persisted for the last few decades. In the Netherlands, the autumn population is usually 50-60 hares per 100 ha (Broeckhuizen, 1976), which represents approximately the average density in the best habitats in Poland (Pielowski,

Raczyński, 1976), as the density data reported from Poland are 10-50 hares per 100 ha (Pielowski, 1976) and in the former German Democratic Republic 20-60 hares per 100 ha (Möller, 1967). Changes mostly concern differences in habitat and climate conditions (Pielowski, Raczyński, 1976). This decline in the number of hares is also confirmed by hunting bags and monitoring at the beginning of the 21st century (Wincentz Jensen, 2009; Zellweger-Fischer et al., 2011; Strauss et al., 2018; Rödel, Dekker, 2012; Petrovan et al., 2013). Population viability analysis showed that a recommended quota with a harvest rate of 10% was sustainable for population densities of 45 hares/km², and that the threshold for hunting should be raised from 10 hares/km² so that hare populations with <15 hares/km² are not hunted (Schai-Braun et al., 2019).

The brown hare can be described as a very sensitive bioindicator of the environment in which it is located. At present, due to anthropogenic disruption of self-regulatory mechanisms in the country, the conditions for his life are not the most favorable. It should be accepted that hares are affected not only by natural conditions, but also by anthropogenic activity (primarily agriculture, and landscaping to its low diversification, lack of quality water, transport, recreation, but also irresponsible hunting, etc.). These facts should be taken into account in all interventions in the landscape and habitat of the hare (Matoušková, Ernst, 2013).

The brown hare prefers an open flat landscape with scattered hedges or shrubs to cover and can reach significant densities in such habitats (Flux, 1990; Mitchell-Jones et al., 1999; Cowan, 2004). In much of Europe, and especially in the United Kingdom, the highest density is found on arable land, often used for growing wheat and barley (Hutchings and Harris, 1996), while in some parts of South America, especially in Argentina, they appear to occupy almost all available habitat types (Bonino et al., 2010). It was the agrarian country in Europe that underwent fundamental changes in the 20th - 21st century. Land management has changed from extensive to intensive. As part of the intensification of agriculture, fields have been merged into large monoculture fields (Stoate et al., 2001; Tschardt et al., 2005; Tryjanowski et al., 2011; Sklenička et al., 2014). These changes, which were in the former Czechoslovakia influenced mainly by political and socio-economic decisions, caused that the average field area increased more than tenfold (Zámečník, 2013). The main goal of our research is to find out what effect the current large-scale agriculture has on the population of hares.

MATERIALS AND METHODS

In the Hunting Association (HA) Postoupky – Hradisko, hares have been hunted for many years. Already in the 1970s, hares belonged to the most important hunting game. The pan-European decline in the abundance of the hare population in the 1970s was also reflected in the numbers of hares hunted in the HA Postoupky – Hradisko, when its

abundance decreased to only 20-30% of the original state (Fig. 1). Despite this decline, hares are still considered in this hunting association as one of the most important hunting game species (Zelinka, 2021).

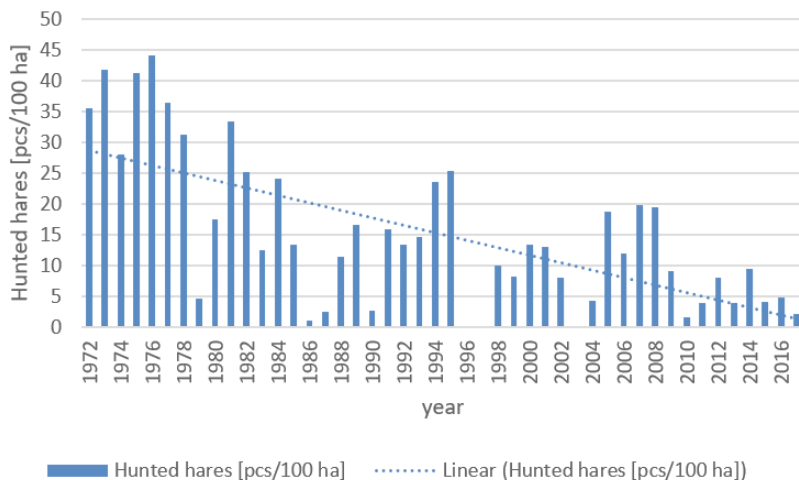


Fig. 1 Hunted hares in HA Postoupky-Hradisko from 1972 to 2017

The HA Postoupky – Hradisko currently has an area of 691 ha and it is located in Central Moravia near the town of Kroměříž. Approximately 50% of the total area of the district is plain with altitudes of 191 to 195 m.a.s.l. Just this part was hit by a flood in 1997 (Brázdil et al., 2011), which had a decimating effect on the population of brown hare in the HA Postoupky-Hradisko. The second half of the hunting ground is formed by a slightly undulating landscape, which is located at altitudes of 220 to 230 m a.s.l.

According to the BPEJ (valued soil-ecological units) catalog, HA Postoupky-Hradisko belongs to the „T3“ (warm, slightly humid) climatic region (Tab. 1, Fig. 2), which occupies the northern and eastern part of Česká křídová pánev, the entire Hornomoravský úval, the northern part of Dolnomoravský úval and the lowest position of Boskovická brázda.

Table 1. Characteristics of the climate region „T3“

Characteristic	Value range
Sum of temperatures >10 °C	2,500 - 2,800
Annual average temperature [°C]	8 - 9
Average total precipitation [mm]	550 – 650
Probability of dry growing seasons [%]	10 – 20
Moisture security in the growing season	4 - 7

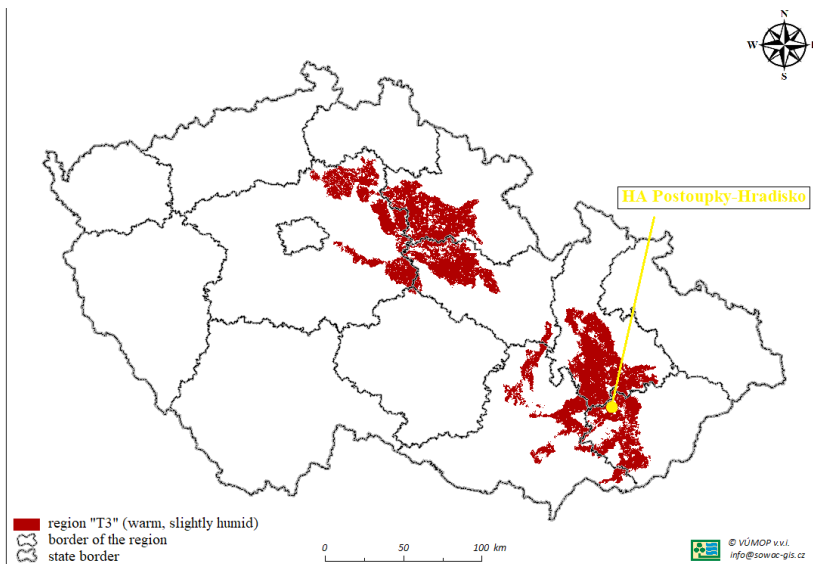


Fig. 2 Map of the climate region „T3“

The basis for evaluating the impact of landscape changes on the number of hares is the results of autumn hunting (in November and December) in the HA Postoupky – Hradisko. The number of hunted pieces is recalculated on average per 100 ha of hunting ground area. The system and method of land management have changed in this area from the 1970s to the present. The transformations mainly concern the disturbance of meadows and their transfer to arable land, the disturbance of field roads, orchards, and scattered greenery, which affected the overall appearance of the landscape (Zelinka et al., 2008, 2011, 2019).

In the first step, we determined the change of landscape by comparing 1950 and 2017 using the Coefficient of Ecological Stability (CES) according to Michal (1982). The map data on the basis of which we compared these two years were taken from the National Geoportal INSPIRE (<http://geoportal.gov.cz>). The calculation formula of CES according to Michal (1982) is:

$$CES = S / L \tag{1}$$

where S represents the relatively stable areas (forest, non-forest wood vegetation, meadows,

pastures) and L represents the relatively unstable areas (arable land, built-up area). The CES values are interpreted according to following in the Table 2.

Table 2. Value interpretation of Coefficient of Ecological Stability (CES) according to Míchal (1982)

level	CES value	Interpretation
1	< 0.10	maximum natural structure disruption, the basic ecological functions have to be intensively and permanently replaced using technical interventions
2	0.10 – 0.30	above the average used territory with the obvious natural structures disruption
3	0.30 – 1.00	territory intensively used for mainly large-scale agricultural production, weakened auto-regulatory processes cause a certain ecological lability
4	> 1.00	almost balanced landscape where the technical objects are relatively in accordance with the preserved natural structures

The CES takes into account the ecological quality of the assessed landscape elements, which shows the degree of anthropogenic impact on these elements. CES, which we calculated according to the formula: $CES = S/L$, was calculated for the territory of HA Postoupky-Hradisko (total area 609 ha) from map data from 1950 and 2017.

In the second step, we monitored changes in the landscape by changing the composition of cultivated agricultural crops. The sown areas of these crops for the period from 1972 to 2017 were taken over from the Czech Statistical Office. By regression analysis, we examined the impact of growing individual crops on the number of hares in the area of HA Postoupky – Hradisko.

RESULTS AND DISCUSSION

Despite the fact that in 2017, agriculture in this locality already had a significantly large-scale character (Fig. 4) and the calculated value of CES is 0.27 (Tab. 3). The change between years 1950 and 2017 is only one level of CES to weaker ecological stability of the country.

Table 3. CES for HA Postoupky - Hradisko for the years 1950 and 2017

year	1950	2017
forest, non-forest woody vegetation, meadows, pastures (S) [ha]	182	138
arable land, built-up land (L) [ha]	509	553
CES value	0.36	0.27

Tab. 3 shows that, forest, non-forest woody vegetation, meadows, pastures area decreased by 44 ha from 182 ha in 1950 to 138 ha in 2017. Conversely, the area of arable land, built-up land increased by 44 ha from 509 ha in 1950 to 553 ha in 2017. These changes in the landscape caused only a slight shift in the CES by one level (from 0.36 to 0.23) to lower landscape stability. Based on a shift (from level 3 to level 2), we can say, that the most important factor influencing the abundance of brown hare is not the percentage and

area of individual landscape-forming elements, but their structure and distribution in the given habitat (Ristić et al., 2021; Meriggi and Alieri, 1989; Smith et al., 2004) (Fig. 3 and Fig. 4). The hare needs to have these elements evenly distributed across the country and not concentrated in one place, which was also confirmed by our research based on the CES (Míchal, 1982). Equally important is the composition of the flora in the individual elements. The more varied this composition, the more favorable the conditions for hares to survive in a given area. This is especially true of the varied composition of cultivated crops. Poor feeding resources may be a reason for low reproduction of hares (Hansen 1992). Small fields provide hares with better feeding conditions because the diet of hares turned out to be more diversified in areas with small fields than with large ones (Endler, Jezierski, 1995; Panek, Kamieniarz, 1999). This statement is also confirmed by home range research, which has shown that with an average field area <7 ha, the home range of a hare is 12-29 ha (Rühe, Hohmann, 2004; Smith et al., 2004; Schai-Braun, Hackländer, 2014). On the contrary, with an average field area of 20-50 ha, the average home range of the hare was >133 ha (Marboutin, Aebischer, 1996; Stott, 2003). Djordjević et al. (2014) concluded that the size and age structure of the population of brown hare have a big impact anthropogenic factors. At the same time, anthropogenic factors had a negative effect on hare populations due to mechanization, chemicalization, land reclamation, land consolidation, and other modern measures in agriculture.

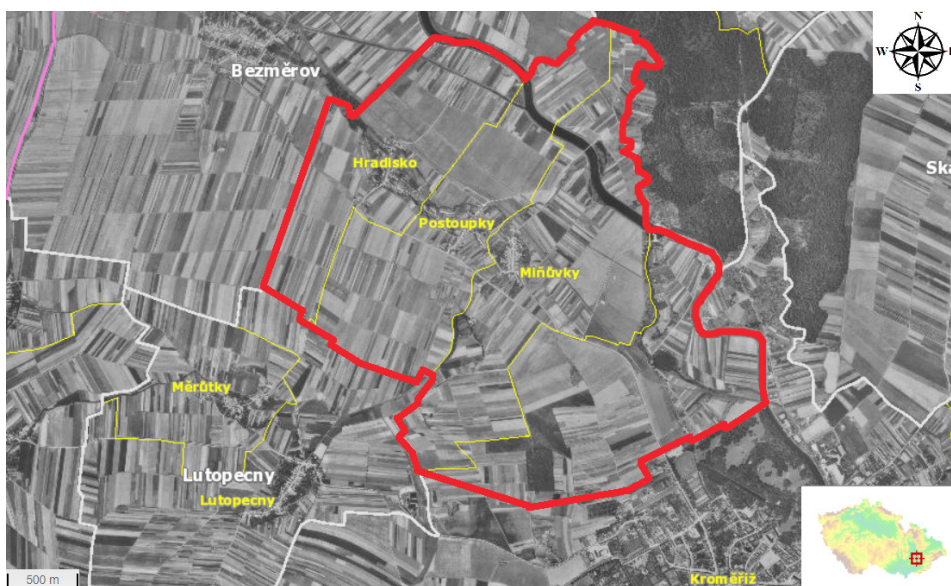


Fig 3 HA Postoupky-Hradisko in 1950 (<https://geoportal.gov.cz/web/guest/map>)



Fig. 4 HA Postoupky-Hradisko in 2017 (<https://geoportal.gov.cz/web/guest/map>)

Equally important is the composition of the vegetation in the individual elements. With a higher variability of cultivated crops, brown hares have more favorable conditions for survival in the given area. We have proved that the cultivation of individual types of crops can significantly affect the number of hares.

Total cereals, rye, oat, potatoes and flax have the highest correlation with the population dynamics of the hare (Tab. 4), but these dependencies are random in these crops. Zelinka (2021) mentions that oats were grown in the first half of the 20th century mainly as feed for horses. However, the horsepower was eventually replaced by mechanisms and therefore its cultivation lost importance.

Table 4. The correlation between cultivated crops and the population dynamics of the hare in the years 1972 - 2017 (red color indicates the most important negative correlation, green indicates the most important positive correlation).

Years 1972 – 2017	correl. coef.
Total cereals	0.6805
Wheat	- 0.0289
Rye	0.6914
Barley	0.4136
Oat	0.7392
Maize	- 0.5220
Legumes (total)	0.2056
Legumes (edible)	- 0.3548
Potatoes	0.6651
Sugar beet	0.5475
Oilseed rape	- 0.5718
Flax	0.5658
Fodder (grown on arable land)	0.4215

Two crops show a high positive correlation (> 0.41) are barley and sugar beet (Tab. 5). During the dry season, the hare obtains water from beet leaves in the form of dew (Zelinka, 2021). In the autumn hares stay the longest in beets, where they hide mainly during autumn plowing and sowing (Szederjei et al. 1958). This phenomenon is also confirmed by the fact that the date of collection is determined by sugar factories. The collection is most often performed between September 25 and November 15 (Pospíšil et al., 2007). In temperate areas, winter cultivars are preferred, whenever possible, as they are higher-yielding than spring forms and winter cultivars are generally hardier than their spring counterparts (Stanca et al., 2003). We assume that the vast majority of cultivated barley was winter barley, which is less demanding to grow than spring barley. The method of growing this type of barley (the area was untouched in the spring) provided female hares and young hares in the spring with calm conditions and thus a higher number of hares in this area. Hares are not found from autumn to spring on empty plowed areas, which are often avoided by hares (Mayer et al., 2018; Ujhegyi et al., 2021). With a larger area of these two crops, the population of the hare also increases, but based on data from the Czech Statistical Office, we can confirm a decrease in the sown area of barley by 38.03% and a decrease in the sown area of sugar beet by 51.62% for the period from 1972 to 2017. In the case of barley, the correlation with the population of hares is 17% at a correlation coefficient of 0.41, which according to Cohen (1988) indicates a mean dependence. In the case of sugar beet, the correlation with the population of hares represents almost 30% at a correlation coefficient of 0.55 with a high dependence. The earlier harvest of sugar beet

due to global warming also has also a negative effect in this direction (Stredova, Stehnova, 2016). For both relationships, the test of the significance of the correlation coefficient confirmed the correlation at the level $\alpha = 0.05$, which represents 95% reliability of the correlation.

Table 5. Values of correlation analysis of positive crops

	B	SE B	β	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>L. 95%</i>	<i>Up.95%</i>
Barley (const.)	-10.5395	8.645633	-	-1.21906	0.229318	-27,9636	6,884612
Hunted hares	4.69E-05	1.55E-05	0.4136	3.013378	0.004274	1,55E-05	7,82E-05
Sugar beet (const.)	-2.73226	4.370319	-	-0.62519	0.535078	-11.5401	6.075539
Hunted hares	0.000171	3.94E-05	0.5475	4.340017	8.22E-05	9.17E-05	0.000251

The strongest negative correlations (> -0.52) were found between the hunt of a hares with the area sown to maize and oilseed rape (Tab. 6). The cultivation of these two crops was significantly influenced by the political situation in then Czechoslovakia (Decree no. 2/1972 Coll.). Both of these crops are typical representatives of crops grown in a large area, cultivated by high-performance machines. Some farmers' cooperatives had a field size of 60 ha, even up to 88 ha (Stankoviansky, 1997). Research on stomach contents (Reichlin, 2006) shows that maize hare hardly eats. Proportions of maize in hare stomach represented a maximum of 2.3%. Rapeseed was not among the examined crops. Other research has shown that the brown hare consumes up to 95 different species of plants, of which about 35 species of grasses, 20 species of clover and about 40 species of other plants, mostly weeds (Djordjević et al., 2014). It is these factors that cause a significant negative impact on hares because agricultural intensification results in increased mechanization and agro-chemical use, and changes in habitats such as a reduction in diversity (Smith et al., 2005). The negative impact of agricultural monocultures was also confirmed by Tapper and Barnes (1986), who found, that hares selected areas with various vegetation types and that autumn hare density was positively related to landscape diversity, and that hare density increased with habitat heterogeneity (Topping et al., 2010; Mayer et al., 2018). In the case of maize, this relationship is 27% at a correlation coefficient of 0.52, which, according to Cohen (1988), is highly dependent. Also a large dependence with the value of the correlation coefficient of 0.57 and explaining almost 33% of the relationship between the hunted hares and the sown area of oilseed rape. For both relationships, the test of the significance of the correlation coefficient confirmed the correlation at the level $\alpha = 0.05$, which represents 95% reliability of the correlation.

Table 6. Values of correlation analysis of negative crops

	B	SE B	β	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>L. 95%</i>	<i>Up.95%</i>
Maize (const.)	26,67758	3,272303	-	8,15254	2,44E-10	20,08269	33,27248
Hunted hares	-0,00021	5,23E-05	0,5220	-4,05971	0,000199	-0,00032	-0,00011
Oilseed rape (const.)	25,88108	2,792491	-	9,268096	6,6E-12	20,25318	31,50897
Hunted hares	-5,3E-05	1,14E-05	0,5717	-4,62278	3,31E-05	-7,6E-05	-3E-05

CONCLUSION

Despite the fact that efforts continue in HA Postoupky-Hradisko to preserve the hare as one of the main hunting game species, the change of landscape did not escape this area either. Its number has dropped significantly since the 1970s in this hunting association as well. The results of our research confirm that the change in the landscape and its landscape structure significantly affects the number of hares. The change was caused mainly by political decisions throughout Czechoslovakia. As a result of these regulations, farmers were forced to switch to large-scale land management. Boundaries, windbreaks and specialized agricultural production were almost abolished. Due to the decline in the cultivation of crops such as sugar beet and barley, which have become agriculturally unattractive, the hare lost its natural habitat. Currently cultivated monocultures of maize and oilseed rape, do not provide sufficient peace during the breeding season, enough food throughout the year and shelter from predators. It is precisely these changes in the environment that are one of the reasons that caused the hares the constant ecological stress, and thus a significant decrease in their number. The ability of the hare to react in this way quickly, with its abundance, to changes in the country, shows that the hare is a good bioindicative species. If suitable natural conditions were created for the rabbit, its fast reproductive cycle would most likely begin to prosper rapidly in the area.

Acknowledgement:

We would like to extend our heartfelt thanks to our esteemed colleague Assoc. prof. Dipl.-Eng. Ladislav Zelinka, PhD., whose invaluable contributions and years of dedicated research have been fundamental to the completion of this scientific article. Without their insight and expertise, this work would not have been possible. His absence leaves a gap in our team, but his legacy continues to inspire and guide us. We dedicate this work to his memory, with deep appreciation for their lasting impact on our field.

Podakovanie:

Radi by sme vyjadrili úprimné poďakovanie nášmu váženému kolegovi doc. Ing. Ladislavovi Zelinkovi, PhD., ktorého neoceniteľné poznatky, skúsenosti a roky zanietého výskumu boli zásadné pre dokončenie tohto vedeckého článku. Bez jeho vedomostí a odborných znalostí by táto práca nebola možná. Jeho odchod zanecháva medzeru v našom tíme, ale jeho odkaz nás naďalej inšpiruje a vedie. Toto dielo venujeme jeho pamiatke s hlbokým uznaním za jeho trvalý vplyv na naše poznanie.

Funding:

This work was supported by the research grants of the Slovak Research and Development Agency No.: APVV-21-0224, grant of the Science Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic VEGA No.: 1/0392/22 and Cultural and Educational Grant Agency of the Ministry of Education, Science, Research and Sport of the Slovak Republic No.: 011TU Z-4/2021.

REFERENCES

- BONINO, N., COSSÍOS, D., & MENEGHETI, J. (2010). Dispersal of the European hare, *Lepus europaeus* in South America. *Folia Zoologica*, 59(1), 9-15.
- BRÁZDIL, R., Řezníčková, L., VALÁŠEK, H., HAVLÍČEK, M., DOBROVOLNÝ, P., SOUKALOVÁ, E., ... & SKOKANOVA, H. (2011). Fluctuations of floods of the River Morava (Czech Republic) in the 1691–2009 period: interactions of natural and anthropogenic factors. *Hydrological Sciences Journal–Journal des Sciences Hydrologiques*, 56(3), 468-485.
- BROECKHUIZEN, S. (1976). The situation of hare populations in the Netherlands. In: Ecology and management of European hare populations, Eds. Z. Pielowski & Z. Pucek. *Państw. Wyd. Roln. i Leśn.*, 23-24.
- COHEN, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hillsdale.
- COWAN, D. (2004). An overview of the current status and protection of the Brown Hare (*Lepus europaeus*) in the UK. *Defra report prepared for European Wildlife Division*.
- DECREE NO. 2/1972 COLL. (Decree of the Federal Ministry of Agriculture and Food on cooperative relations in the development of specialization and lower agricultural production).
- DJORDJEVIĆ, N., POPOVIĆ, Z., BEUKOVIĆ, D., & BEUKOVIĆ, M. (2014). Climate impacts, the degree of forestation and natural resources of food to the age structure of brown hare. *Zbornik naučnih radova Instituta PKB Agroekonomik*, 20(1-4), 251-259.
- ENDLER Z. AND JEZERSKI W. 1995. The structure of habitats and the diet of hares. In: Hare. International Symposium, Czempin 1992. *Polski Związek Łowiecki*, Warszawa: 231-256.
- FLUX, J.E.C., 1990. Brown hare. In: *The Handbook of New Zealand Mammals*. Auckland, New Zealand: Oxford University Press, 161-172.
- HANSEN, K. (1992). Reproduction in European hare in a Danish farmland. *Acta theriologica*, 37, 27-27.
- HUTCHINGS, M. R., & HARRIS, S. (1996). *The current status of the brown hare (Lepus europaeus) in Britain*. Peterborough: Joint Nature Conservation Committee. 78 p.
- MARBOUTIN, E., & AEBISCHER, N. J. (1996). Does harvesting arable crops influence the behaviour of the European hare *Lepus europaeus*? *Wildlife biology*, 2(3), 83-91.
- MATOUŠKOVÁ, J.; ERNST, M. (2013). Vliv mysliveckého a zemědělského managementu na populaci zajíce polního v honitbě Němčice nad Hanou za období 1918 – 2013. In: *Spolupráca poľovníkov a poľnohospodárov – nová šanca pre malú zver*. Mojmirovce: Centrum výskumu živočíšnej výroby Nitra, 83-95, ISBN: 978-80-89418-27-5.
- MERIGGI, A., & ALIERI, R. (1989). Factors affecting brown hare density in northern Italy. *Ethology Ecology & Evolution*, 1(3), 255-264.

- MÍCHAL, I. (1982). Principy krajinnárskeho hodnotení území. *Architektúra a urbanizmus*, 16(Z), 65-87.
- MITCHELL-JONES, A. J., AMORI, G., BOGDANOWICZ, W., KRYSZTOFEK, B., REIJNDERS, P. J. H., SPITZENBERGER, F., ... ZIMA, J. (1999). *The atlas of European mammals* (Vol. 3). London: Academic Press. 484 s.
- MÖLLER, D. (1967). Der nutzbare Zuwachs des Hasen in Abhängigkeit von regionalen Klimaunterschieden. *Arch. Forstwes*, 16, 929-932.
- PANEK, M., KAMIENIARZ, R. Relationship between density of brown hare *Lepus europaeus* and landscape structure in Poland in the years 1981-1995. *Acta Theriologica* 44.1 (1999): 67-75.
- PETROVAN, S. O., WARD, A. I., & WHEELER, P. M. (2013). Habitat selection guiding agri-environment schemes for a farmland specialist, the brown hare. *Animal conservation*, 16(3), 344-352.
- PIELOWSKI, Z. (1976). On the present state and perspectives of the European hare breeding in Poland. *Ecology and management of European hare populations PWRiL*, 25-27.
- PIELOWSKI, Z., & RACZYNSKI, J. (1976). Ecological conditions and rational management of hare populations. *Ecology and management of European hare populations. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa*, 269-286.
- POSPÍŠIL, R., KARABÍNOVÁ, M., DANČÁK, I., CANDRÁKOVÁ, E., POLÁČEK, M., & HORVÁT, F. (2007). Integrovaná rastlinná výroba (2. nezmien. vyd). Slovenská poľnohospodárska univerzita vo Vydavateľstve SPU, 2007. ISBN 978-80-8069-856-0.
- REICHLIN, T., KLANSEK, E., & HACKLÄNDER, K. (2006). Diet selection by hares (*Lepus europaeus*) in arable land and its implications for habitat management. *European journal of wildlife research*, 52(2), 109-118.
- RISTIĆ, Z., PONJIGER, I., MATEJEVIĆ, M., KOVAČEVIĆ, M., RISTIĆ, N., & MARKOVIĆ, V. (2021). Effects of factors associated with the decline of brown hare abundance in the Vojvodina region (Serbia). *Hystrix, the Italian Journal of Mammalogy*, 32(1).
- RÖDEL, H. G., & DEKKER, J. J. (2012). Influence of weather factors on population dynamics of two lagomorph species based on hunting bag records. *European journal of wildlife research*, 58(6), 923-932.
- RÜHE, F., & HOHMANN, U. (2004). Seasonal locomotion and home-range characteristics of European hares (*Lepus europaeus*) in an arable region in central Germany. *European Journal of Wildlife Research*, 50(3), 101-111.
- SCHAI-BRAUN, S. C., & HACKLÄNDER, K. (2014). Home range use by the European hare (*Lepus europaeus*) in a structurally diverse agricultural landscape analysed at a fine temporal scale. *Acta theriologica*, 59(2), 277-287.
- SCHAI-BRAUN, S. C., KOWALCZYK, C., KLANSEK, E., & HACKLÄNDER, K. (2019). Estimating sustainable harvest rates for European hare (*Lepus Europaeus*) populations. *Sustainability*, 11(10), 2837.
- SKLENICKA, P., ŠÍMOVÁ, P., HRDINOVÁ, K., & SALEK, M. (2014). Changing rural landscapes along the border of Austria and the Czech Republic between 1952 and 2009: Roles of political, socioeconomic and environmental factors. *Applied Geography*, 47, 89-98.
- SMITH, R. K., JENNINGS, N. V., ROBINSON, A., & HARRIS, S. (2004). Conservation of European hares *Lepus europaeus* in Britain: is increasing habitat heterogeneity in farmland the answer?. *Journal of Applied Ecology*, 41(6), 1092-1102.
- SMITH, R. K., VAUGHAN JENNINGS, N., & HARRIS, S. (2005). A quantitative analysis of the abundance and demography of European hares *Lepus europaeus* in relation to habitat type, intensity of agriculture and climate. *Mammal review*, 35(1), 1-24.
- STANCA, A. M., ROMAGOSA, I., TAKEDA, K., LUNDBORG, T., TERZI, V., & CATTIVELLI, L. (2003). Chapter 9: Diversity in Abiotic Stress Tolerances. *Diversity in Barley (Hordeum vulgare)*.
- STANKOVIANSKY M. (1997). Antropogénne zmeny krajiny myjavskej kopaničiarskej oblasti. *Životné prostredie*, 31, 2, 88-93.
- STOATE, C., BOATMAN, N. D., BORRALHO, R. J., CARVALHO, C. R., DE SNOO, G. R., & EDEN, P. (2001). Ecological impacts of arable intensification in Europe. *Journal of environmental management*, 63(4), 337-365.
- STOTT, P. (2003). Use of space by sympatric European hares (*Lepus europaeus*) and European rabbits (*Oryctolagus cuniculus*) in Australia. *Mammalian Biology*, 68(5), 317-327.
- STRAUSS E, KLAGES I, SLIWINSKI K, GRÄBER R (2018): Von der Scheinwerferzählung zum Citizen Science – welche Möglichkeiten bieten verschiedene Erfassungsmethoden für ein wissenschaftliches Wildtiermonitoring am Beispiel des Feldhasen? In: *Wildbiologische Forschungsberichte 2018. Schriftenreihe der Vereinigung der Wildbiologen und Jagdwissenschaftler Deutschlands (VWJD) (Hrsg.)*, Kessel-Verlag. ISBN 978-3-945941-43-0, p. 168-176.

- SZEDERJEL, Á., SZEDERJEL, M., & STUDINKA, L. (1958). *Zajac, bažant, jarabica*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo pôdohospodárskej literatúry. 288 s.
- TRYJANOWSKI, P., HARTEL, T., BÁLDI, A., SZYMAŃSKI, P., TOBOLKA, M., HERZON, I., GOŁAWSKI, A., KONVIČKA, M., HROMADA, M., JERZAK, L., KUJAWA, K., LENDA, M., ORŁOWSKI, G., PANEK, M., SKÓRKA, P., SPARKS, T.H., TWOREK, S., & A.W. & Żmihorski, M. (2011). Conservation of farmland birds faces different challenges in Western and Central-Eastern Europe. *Acta Ornithologica*, 46(1), 1-12.
- TSCHARTNKE, T., KLEIN, A. M., KRUESS, A., STEFFAN-DEWENTER, I., & THIES, C. (2005). Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity–ecosystem service management. *Ecology letters*, 8(8), 857-874.
- WINCENTZ JENSEN, T. L. (2009). Identifying causes for population decline of the brown hare (*Lepus europaeus*) in agricultural landscapes. Denmark: University of Copenhagen.
- ZÁMEČNÍK, V. (2013). Metodická príručka pro praktickou ochranu ptáků v zemědělské krajině. *Praha, AOPK*.
- ZELINKA, L. (2021). Discussion about landscape changes affecting the territory of the HA Postoupky-Hradisko. Personal communication with assoc. prof. Ladislav Zelinka.
- ZELINKA, L., KVAS, A., ROŽNOVSKÝ, J., & ŠKVARENINA, J. (2019). Príspevok k poznaniu zoofenológie zajaca poľného v oblasti Hornomoravského úvalu. In: Fenologie, její význam a užití Modrá 2019, VÚMOP v.v.i. Praha, ISBN 978-80-87361-98-6
- ZELINKA, L., ŠKVARENINA, J., & ROŽNOVSKÝ, J. (2008). Vplyv meteorologických podmienok na populáciu zajaca poľného (*Lepus europaeus* L.) v oblasti Strednej Moravy-Holešov. In: Bioklimatologické aspekty hodnocení procesů v krajině: sborník příspěvků z mezinárodní konference. Praha: Česká bioklimatologická společnost 13 s., ISBN 978-80-86690-55-1
- ZELINKA, L., VACEK, V., KARASEK, L. (2011). Vliv reprodukčních ukazovatelů a meteorologických faktorů na odlov zajíce polního (*Lepus europaeus*) v letech 1998-2007 MS Postoupky – Hradisko, oblast střední Moravy, Česká Republika. *Folia Venatoria*. 40-41: 87-105.
- ZELLWEGER-FISCHER, J., KÉRY, M., & PASINELLI, G. (2011). Population trends of brown hares in Switzerland: the role of land-use and ecological compensation areas. *Biological conservation*, 144(5), 1364-1373.
- UJHEGYI, N., KELLER, N., PATKÓ, L., BIRÓ, Z., TÓTH, B., & SZEMETHY, L. (2021). Agri-environment schemes do not support Brown Hare populations due to inadequate scheme application. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 67(3), 263-288.
- MAYER, M., ULLMANN, W., SUNDE, P., FISCHER, C., & BLAUM, N. (2018). Habitat selection by the European hare in arable landscapes: The importance of small-scale habitat structure for conservation. *Ecology and Evolution*, 8(23), 11619-11633.
- TAPPER, S. C., & BARNES, R. F. W. (1986). Influence of farming practice on the ecology of the brown hare (*Lepus europaeus*). *Journal of applied Ecology*, 39-52.
- TOPPING, C. J., HOYE, T. T., & OLESEN, C. R. (2010). Opening the black box—development, testing and documentation of a mechanistically rich agent-based model. *Ecological Modelling*, 221(2), 245-255.

SUMÁR V SLOVENSKOM JAZYKU

Zajac poľný (*Lepus europaeus* Pallas, 1778) je dôležitý bioindikátor, ktorý odráža zdravie svojho prostredia, no jeho populácia na celom európskom kontinente konzistentne klesá už niekoľko desaťročí. Táto štúdia hodnotí vplyv veľkoplošného poľnohospodárstva na populácie zajačikov, najmä v kontexte oblasti HA Postoupky-Hradisko, kde počty zajačikov od 70. rokov 20. storočia výrazne poklesli. Historické údaje naznačujú, že optimálne hustoty 50-60 zajačikov na 100 hektárov, ako boli zaznamenané v Holandsku a v najlepších biotopoch v Poľsku, sa neutržiavajú. Zmeny v manažmente poľnohospodárskej pôdy z extenzívneho na intenzívne poľnohospodárstvo, predovšetkým

prechod na veľké monokultúrne polia, boli primárnym motorom degradácie biotopu. Politické a socio-ekonomické rozhodnutia, najmä v bývalom Československu, viedli k desaťnásobnému nárastu priemernej veľkosti polí, čo eliminovalo živé ploty a vetrolamy, ktoré sú nevyhnutné pre obývanie zajačikov. Naše zistenia potvrdzujú, že takéto zmeny v štruktúre krajiny významne prispeli k poklesu počtu zajačikov, pričom monokultúry kukurice a repky olejnej neposkytujú dostatočný úkryt ani obživu. Odporúčané kvóty lovu a prahové hodnoty, ako naznačujú analýzy životaschopnosti populácie, už nie sú aplikovateľné v rámci súčasných poľnohospodárskych praktík. Táto práca argumentuje za okamžité prehodnotenie politik riadenia pôdy a zriadenie rozmanitých, zajačikom priateľských biotopov, aby sa zmierňoval ekologický stres tohto druhu a podporil jeho zotavenie prostredníctvom rýchleho reprodukčného cyklu.

AFFILIATIONS

Andrej KVAS¹, Ladislav ZELINKA⁺, Ilja VYSKOT², Jaroslav VIDO¹, Jaroslav ŠKVARENINA¹

¹*Department of Natural Environment, Faculty of Forestry, Technical University in Zvolen, Ul. T. G. Masaryka 2117/24, 960 01 Zvolen, Slovakia*

²*Department of Environmentalistics and Natural Resources (FRDIS), Faculty of Regional Development and International Studies, Mendel University in Brno, Tř. Generála Píky 2005/7, 613 00 Brno, Czech Republic*

⁺*in memoriam*

VYUŽITIE CHROBÁKOV ČEL'ADE BYSTRUŠKOVITÉ (COLEOPTERA, CARABIDAE) V HODNOTENÍ STAVU A ZMIEN ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA

Zbyšek ŠUSTEK

ŠUSTEK, Z: Use of the Ground beetles (Coleoptera, Carabidae) for evaluation of the environmental state and changes. Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

ABSTRACT

Owing to their rich ecological differentiation and a good knowledge of their autecology, at least in the European conditions, the Carabid beetles represent one of the best group of animals for evaluation of the momentary state of environment and its natural and anthropogenic changes. In order to popularize their excellent preconditions for this purpose, this paper presents a brief review of the basic data on the typifying of their assemblages in natural forest ecosystems in accordance to the Zlatník's geobiocoenological systems. In addition the paper brings comments on their sampling methods in the field and some ecological criteria that can be used for evaluation of their assemblages. The presented data are based on the extensive field research undertaken by the author in various types of ecosystems before all in Central Europe in the last 40 years.

Key words: ground beetles, Carabidae, ecology, bioindication, Central Europe

Kľúčové slová: bystruškovité, Carabidae, ekológia, bioindikácia, Stredná Európa

Úvod

Bystruškovité predstavujú druhovo bohatú čel'ad' s 25000 známymi druhmi (KRYŽANOVSKIJ 1983, podľa niektorých odhadov dokonca až s35 000 – 40 000 druhmi (GUERGUEV & GUERGUIEV 1995, ARNDT et al.2011). Z nich v palearttickej podoblasti žije 10 000 druhov, v Európe asi 2 700 druhov (TURIN 1981), na celom Balkáne 1 681 druhov, z čoho v Bulharsku 754 (GUERGUEV & GUERGUIEV 1995), v Grécku 962 (ARNDT et al. 2011), na Slovensku 560 druhov (HŮRKA 1995). Smerom na sever počet druhov rýchlo ubúda, napr. Estónsku len 275 (HABERMAN 1968). Je mimoriadne diferencovaná veľkostne (dĺžka 1,5 –100 mm), tvarovo a najmä ekologicky. Ekologická diferenciácia im umožňuje obsadzovať takmer všetky typy terestrických ekosystémov a ich špeciálnych ník. To zároveň umožňuje jej využitie na bioindikáciu stavu a zmien životného prostredia. Predpokladom pre ich bioindikačné využitie je aj dobrá znalosť ich autekológie, najme

v rámci strednej a severnej Európy (BURMEISTER, 1939, LINDROTH 1949, 1985, HABERMAN 1968, ŠAROVA 1981). Cieľom tejto štúdie je podať stručný prehľad spôsobov a možností biodiakačného využitia bystruškovitých v strednej Európe.

Metódy zberu bystruškovitých

Pre bioindikačné účely je možné používať v zásade pri metódy zberu. Prvou je kvadrátová metóda, pri ktorej sú na stanovenej ploche vyzbierané všetky jedince. Jej výhodou sú presné informácie o počte jedincov a druhov. Nevýhodou sú veľká prácnosť a obmedzenia vyplývajúce z malej populačnej hustoty niektorých druhov a z ich ukrytia hlbšie v pôde. Druhou metódou je zber na svetlo. Je to metóda vhodná na zistenie časového rozloženia aktivity lietajúcich druhov. Ale nie je použiteľná na zisťovanie prítomnosti nelietajúcich druhov. Treťou najčastejšie používanou metódou sú rôzne konštruované zemné pasce. Ich výhodou je automatické fungovanie po celú dobu expozície a pomerne jednoduchá inštalácia a obsluha. Nevýhodou je závislosť od pohybovej aktivity rôznych druhov a do určitej miery aj vplyv fixačnej tekutiny na zloženie materiálu (možnosť odpuzdovania alebo naopak lákania niektorých druhov) i pôsobenie chyteného materiálu ako atraktantu dravých alebo nekrofágnych druhov. Napriek týmto známym nevýhodám je to takmer štandardne používaná metóda pri ekologických výskumoch bystruškovitých a iných bezstavovcov žijúcich na povrchu pôdy.

V tejto súvislosti je často diskutovanou otázkou je počet pascí potrebný na presné zistenie úplného druhového spektra a pomeru zastúpenia jednotlivých druhov. V bývalom Československu bola dlho určujúca experimentálna a štatistická práca OBRTELA (1971, ktorý v prostredí tvrdého lužného lesa stanovil ako minimálny počet pascí potrebný na zistenie pomeru zastúpenia dominantných druhov 6 pascí a na zistenie podstatnej časti druhového spektra 10, resp. 12 pascí. Jeho práca však vychádzala z 24 pascí rozmiestnených na pomerne veľkej a heterogénnej ploche s rôznymi vlhkosťnými pomermi a vykazujúcej bohatšie druhové spektrum ako menšie a homogénnejšie časti sledovaného lužného lesa.

Takéto počty pascí však nie je možné dodržať napr. v mestskom prostredí, kde to nedovoľuje veľkosť študovaných plôch alebo nemožnosť ukrytia pascí pred verejnosťou. Podobne ich nebolo možné dodržať pri výskume líniových formácií (vetrolamov). V ich prípade bola urobená iná štatisticky podložená štúdia (PAVLÍČEK & HOUŠKOVÁ 1989), ktorá ukázala, že pre každý úsek vetrolamu je dostatočne reprezentatívna jedna pasca a počet pascí sa musí odvíjať od dĺžky a premenlivosti líniového spoločenstva a sledovaného ekologického gradientu. Porovnanie výsledkov z rôznych spoločenstiev (ŠUSTEK 1993) ukázalo, že potrebný počet pascí je premenlivá veličina, ktorá závisí aj na rozmanitosti spoločenstva. V jednoduchých, spravidla, stredne narušených spoločenstvách s autodominciou 1-2 druhov postačuje nižší počet pascí ako v zložitejších spoločenstvách v vyrovnannejšom zastúpení druhov, teda v prípadoch podobných lužnému lesu študovanému

OBRETELOM (1971). Je teda potrebné prijímať rôzne riešenia, navrhnuté podľa konkrétnej situácie a s ohľadom aj na minimalizáciu usmrcovania živočíchov.

Doplnkovú úlohu pri zbere bystruškovitých môže mať individuálny zber (exhaustorom) tam, kde nie je možné klásť zemné pasce (brehy vodných tokov s nestálou hladinou) alebo šmýkanie a sklepvávanie druhov žijúcich prevažne na vegetácii (rody *Lebia* a *Dromius*), prípadne pod kôrou (*Tachyta nana*).

Typizácia spoločenstiev bystruškovitých

V botanike, resp. geobotanike a fytoocenológii sú rozpracované rozsiahle systémy hierarchickej klasifikácie rastlinných spoločenstiev. Používajú sa dva – rozšírenejší a univerzálnejší – montpelierský (BRAUN-BLANQUET 1932) a špeciálne pre potreby lesníctva vytvorený Zlatníkov geobiocenologický systém – ZLATNÍK & RAUŠER (1966). Ich význam pre bioindikáciu zmien životného prostredia spočíva v tom, že typizované spoločenstvá predstavujú akýsi etalón stavu rastlinných spoločenstiev v daných prirodzených alebo umelo vytvorených podmienkach. Analogické systémy v zoológii v podstate neexistujú. Je to dôsledkom nemožnosti zachytiť všetky živočíchy na jednom mieste rovnakou metodikou a pohyblivosti živočíchov. Preto živočíchy nevytvárajú spoločenstvá s pevne danými hranicami tak ako rastliny (SUKAČEV & DYLLIS 1964). Napriek tomu však snaha o aspoň rámcovú typizáciu živočíšnych spoločenstiev má svoj význam aspoň pre jednotlivé živočíšne skupiny. V čisto teoretickej rovine môže takáto typizácia slúžiť ako doplnková charakteristika geobiocenologických jednotiek v Zlatníkovskom systéme, ktorý má ambíciu integrovať aj živočíšnu zložku geobiocenózy (ekosystému) (ŠUSTEK 2000). Zároveň môže plniť v bioindikácii presne tú istú úlohu etalónu či modelu ako samotné fytoocenologické jednotky.

Východiskom pre rámcovú typizáciu sú tri nadstavbové dimenzie Zlatníkovho geobiocenologickej klasifikácie a predpoklad, že základom typizácie sú prírodné alebo prírode blízke lesné geobiocenózy (ekosystémy). Tie sa diferencujú vertikálne v deviatich vegetačných stupňoch, štyroch trofických a šiestich hydrických radoch.

Výskyt vo vegetačných stupňoch

Im zodpovedá aj diferenciácia spoločenstiev bystruškovitých. Prevažnú časť spoločenstiev bystruškovitých tvoria mezohygrofilné lesné druhy, s optimom výskytu v dubovom až dubovo-bukovo vegetačnom stupni (*Abax paralelopipedus*, *Abax parallelus*, *Carabus nemoralis*, *Carabus hortensis*, *Carabus coriaceus*, *Pterostichus oblongopunctatus*). Ich výskyt vyznieva smerom do vyšších vegetačných stupňoch. Ako dominantné alebo subdominantné druhy sa vyskytujú ešte v bukovom vegetačnom stupni. Vo vyšších stupňoch je ich výskyt už málo početný. Na ne nadväzuje výskyt druhov s opti-

mom výskytu v bukovo-jedľovom vegetačnom stupni (*Carabus linnei*, *Carabus auro-nitens*, *Carabus violaceus*, *Carabus glabratus*, *Cycrus caraboides*, *Cachrus attenuatus*, *Pterostichu burmeisteri*, *Trechus pulchellus*.-, V Karpatoch k nim pristupujú *Pterostichus pillosus*, *Pterostichus foveolatus*, *Trechus latus* a *Trechus cardioderus* a vo Vysokých Tatrách aj *Trechus striatulus*. Tieto druhy zostupujú smerom nižšie do dubovo-bukového stupňa a smerom vyššie vystupujú zväčša až do kosodrevinového stupňa. V alpínskom stupni prevažujú druhy *Carabus sylvestris*, *Nebria gyllenhalii*, *Nebria tetrica*, *Patrobus quadricollis*, *Pterostichus negligens*, *Pterostichus morio* a *Calathus metallicus*. Charakteristický je *Deltomerus tetricus*, *Deltomerus carpathicus*, *Duvalius microphthalmus* a *Duvaliopsis pilosellus*. Do kosodrevinového a smrekového vegetačného stupňa miestami zostupuje *Calathus metallicus* a *Carabus sylvestris*. Posledne menovaný najmä v hercýnskej oblasti zostupuje do nižších negetačných stupňov).

Výskyt v hydrických radoch

Vo vzťahu k vlhkosti sa bystruškovité diferencujú na mezo- a xerofilné druhy s optimom výskytu v 1. a 3. rade uvedené vyššie a na hygrofilné druhy s optimom výskytu v hydrických radoch 4, 5a a 5b, ktoré obývajú typicky len široké a pravidelne zaplavované údolné nivy. Tam naopak chýbajú mezohygrofilné a xerofilné druhy. Medzi údolnými nivami a susednými mezohygrofilnými spoločenstvami existujú rôzne široké prechodné pásma, ktoré kopírujú sled rastlinných spoločenstiev a sezónne výkyvy pôdnej vlhkosti. V úzkych alúviách dochádza k prelínaniu hygrofilných a mezohygrofilných druhov.

V spoločenstvách v prirodzených skupinách geobiocenóz *Salici Alneta*, ktoré sú niekoľkokrát ročne zaplavované intenzívne tečúcou vodou dominujú druhy *Platynus assimilis*, *Agonum obscurum*, *Carabus granulatus*, *Asaphidion flavipes*, *Bembidion dentellum*, *Bembidion femoratum*, *Pterostichus strenuus*, *Pterostichus melanarius*, *Pterostichus niger*, *Patrobus septemtrionis* a *Oodes helopioides*. Spoločenstvá sú druhovo veľmi bohaté 40-50 druhov, ale majú sklon k nízkej kumulatívnej abundancii. Pre tieto spoločenstvá bystruškovitých je charakteristické, že sa druhovo takmer nelíšia od najvlhších spoločenstiev v trstinách. Naopak znakom narušenia spoločenstiev vo vysušených trstinách je náhrada bystruškovitých veľkým počtom zdochlinára *Silpha obscura*.

V prirodzených spoločenstvách v skupinách geobiocenóz *Querci fraxineta* a *Ulmi Fraxineta populi*, pravidelne zaplavovaných stagnujúcou vodou, dominujú druhy *Agonum moestum*, *Platynus asiimilis*, *Bembidion unicolor*, *Carabus granulatus*, *Bembidion biguttatum*, *Pterostichus anthracinus*, *Pterostichus nigrita*, *Pterostichus niger*, *Pterostichus melanarius* a *Patrobus septemtrionis*. V zvlášť zachovalých geobiocenózach sa objavuje *Agonum krynickyi* a *Carabus clathratus*. Spoločenstvá sú druhovo bohaté (až 53 druhov) a majú sklon k vysokej kumulatívnej abundancii.

V prirodzených spoločenstvách v skupinách geobiocenóz *Ulmi Fraxineta carpineae*

s občasnými záplavami a umelo zmeneným hydrologickým režimom si zachovávajú dominantné alebo subdominantné postavenie *Carabus granulatus*, *Platynus assimile*, *Pterostichus niger* a *Pterostichus melanarius*. Naopak, dominantné postavenie nadobúdajú *Pterostichu oblongopunctatus* a *Epaphius secalis*. Začínajú sa uplatňovať mezohydrofilné druhy *Abax parallelopipedus*, *Abax parallelus*, *Abax carinatus*, *Carabus ullrichi* ojedine- lo aj *Carabus nemoralis*.

Pre spoločenstvá v čiastočne vysušených lužných lesoch so zachovaným stromovým poschodím býva charakteristická enormná dominancia *Carabus coriaceus* alebo *Carabus violaceus*. Pre spoločenstvá v lužných lesoch s narušenou integritou porastu, obmedzením záplav a so zníženou hladinou podzemnej vody je príznačné prenikanie druhov otvorenej krajiny, najmä *Poecilus cupreus* a *Pseudoophonus rufipes*, ktoré môžu v takýchto spoločenstvách aj prevážiť (sútok Moravy a Dyje). V týchto spoločenstvách sa krátkodobo (1-2 roky) veľmi priaznivo prejavili silné záplavy v roku 1997.

Výskyt bystruškovitých v trofických radoch

Výskyt bystruškovitých v trofických radoch je málo preskúmaný. Dostupné poznatky však ukazujú, že tu vznikajú dve skupiny spoločenstiev v trof. radoch A a B a v trof. radoch C a D, resp. prechodných radoch BC a BD. V prvej skupine býva kumulatívna abundancia a biomasa bystruškovitých výrazne nižšia ako v druhej. Tam, kde sa segmenty geobiocenóz radov D a C stýkajú so segmentami geobiocenóz trofického radu A sa prejavujú rozdiely doslova skokovo (Malá Fatra, Belianské Tatry). V geobiocenózach trofického radu A sa neraz formujú spoločenstvá zložené len z veľmi malých druhov, najmä vo vyšších vegetačných stupňoch.

Otázka typizácie spoločenstiev bystruškovitých v nelesných geobiocenózach a geobiocenoïdoch

Ide o širokú škálu spoločenstiev v umelých ekosystémoch, kde výrazne prevažujú druhy otvorenej krajiny, vyskytujúce v závislosti na prítomnosti roztrúsenej stromovej alebo krovinovej vegetácie aj v zmesi s druhmi vyžadujúcimi zatienenie. Je to príznačné najmä pre spoločenstvá obývajúce sídla a mestské parky a záhrady. Druhy vytvárajúce tieto spoločenstvá majú prevažne optimum rozšírenia v nižších vegetačných stupňoch. Druhy s optimom rozšírenia vo vyšších stupňoch sú na rozdiel od lesných spoločenstiev nepočítané. Pre prvý vegetačný stupeň je len na Slovensku charakteristický výskyt *Brachinus gangelbaueri* a *Brachinus psophia*. Prvý a druhý vegetačný stupeň možno charakterizovať prítomnosťou vzácnych druhov *Ophonus diffinis* a *Ophonus sabulicola* a výrazne pieskomilnej *Amara fulva*. Tretí veg. stupeň charakterizuje neprítomnosť uvedených piatich druhov a vyznievanie skupiny druhov *Harpalus pumilus*, *Pterostichus sericeus*

a *Calathus ambiguus*. Štvrtý a piaty vegetačný stupeň možno charakterizovať sklonom k výraznejšiemu zastúpeniu *Poecilus versicolor* a *Poecilus virens* a výskyt *Carabus granulatus* v poľných ekosystémoch (zemiakové polia), Zloženie spoločenstiev bystruškovitých v poľných ekosystémoch silne závisí na zhode prítomnosti tej-ktorej plodiny na poli s rozmnožovacím cyklom jednotlivých druhov. V jarinách a ozimných plodinách prevažujú druhy s jarným rozmnožovaním (*Agonum dorsalis*, *Brachynus crepitans*, *Brachinus ex-plo-dns* a *Poecilus cupreus*, kým v kukurici, repe, slnečnici a zemiakoch druhy s jesenným rozmnožovaním (najmä *Pseudoophonus rufipes*). Ide o časovo nestále spoločenstvá, ktoré sa vytvárajú každoročne znova.

Ekologické kritéria použiteľné v bioindikácii

Pohyblivosť bystruškovitých

Pri bioindikačnom využití bystruškovitých treba brať do úvahy spôsoby ich šírenia. Veľká časť druhov je bezkrídla, niektoré majú dokonca zrastené krovky (viaceré druhy rodu *Carabus*, *Abax*), alebo silne redukované krídla. Pre tieto druhy je jediným spôsobom aktívneho pohybu chôdza alebo beh. Niektoré bezkrídle druhy však vedú využívať pasívne možnosti šírenia pomocou záplavových vln v aluviálnych oblastiach. Ich príkladom je horská bystruška *Cychrus caraboides*, ktorá týmto spôsobom preniká do podunajských lužných lesov z predhoria Álp. Značná časť druhov bystruškovitých je schopná letu. Hoci mnohé druhy dokonca lietajú dobre, na veľké vzdialenosti a vo veľkých výškach, využívajú tento spôsob pohybu len príležitostne. Hlavne na jar, za špecifických klimatických podmienok (teplo a napätie vodných pár), dokonca cez deň, a potom vo vrcholnom lete, za teplých nocí predovšetkým približne dva dni pred prechodmi frontálnych systémov, keď ich migrácia býva mimoriadne intenzívna.

Schopnosť letu je príznačná pre druhy obývajúce ekosystémy vystavené častým disturbanciam (pobrežné a lužné ekosystémy – dočasné vysychanie, poľnohospodárska krajina - orba, zber úrody), ktoré nútia tieto druhy opúšťať dočasne nepriaznivé stanovištia a vyhľadávať iné vhodné prostredie. Prejavuje sa to neraz nečakaným vymiznutím niektorých druhov v miestach, kde boli dominantné. Typické je to pre druhy *Pterostichus melanarius* a *Pterostichus niger* v lužných lesoch.

Veľkostná štruktúra ako indikačné kritérium a všeobecná charakteristika organizácie lesných spoločenstiev bystruškovitých v holarktickej oblasti

V prirodzených alebo prírode blízkych lesných ekosystémoch zisťujeme, že spoločenstvá bystruškovitých pozostávajú z niekoľkých veľkostných tried. V strednej Európe majú najmenšie druhy dĺžku cca 2-5 mm (rody *Tachys*, *Trechus*, *Bembidion*, nasle-

dujú druhy s dĺžkou cca 6-8 mm (malé druhy rodov *Pterostichus*, *Agonum*, *Trichotichnus*), cca 12-16 mm (stredne veľké druhy rodu *Prerostichus*), cca 16-22 mm (väčšie druhy rodu *Pterostichus* a menšie druhy rodov *Carabus*), cca 22-32 mm (väčšina druhov rodu *Carabus*), 35-40 mm (*Carabus coriaceus*). V južnej Európe dosahujú extrémnu veľkosť 40-60 mm druhy *Procerus gigas* a *Procerus caeruleus*. Veľkosť každej z týchto tried je približne 1,5-násobkom veľkosti triedy predchádzajúcej. Veľkosť druhov bystruškovitých určuje aj veľkosť koristi, ktorá môže byť zdrojom ich potravy. Ide v podstate o reguláciu potravnú kompetície medzi jednotlivými druhmi. Dve najväčšie triedy veľkosťou nad 40 mm zodpovedajú najmenším dravým cicavcom (piskorom - Soricidae).

Veľmi podobnú štruktúru lesných spoločenstiev však nachádzame aj v lesoch na Iberskom polostrove, na Kaukaze, ale aj vo východnej Ázii (Čína, Kórea – s obrovskými druhmi z rodu *Coptolabus* zodpovedajúcimi veľkostne európskym druhom rodu *Procerus* a druhu *Carabus coriaceus*) a strednej veľké druhy rodu *Carabus*, ktoré majú podobné postavenie ako európsky *Carabus nemoralis*, a drobný druh *Pterostichus olgae*, ktorý presne zodpovedá eurosibirskému *Pterostichus oblongopunctatus*.

Indexy rozmanitosti

V ekologických výskumoch sú indexy rozmanitosti obľúbené. Najjednoduchším indexom je vlastne už samotný počet druhov. Indexy vychádzajúce z teórie informácie (Shannon Wienerov index, Simpsonov index – de facto len matematický variant Shannon Wienerovho indexu (PIELOU 1977) podávajú jednoduchú číselnú charakteristiku rozdelenia počtu jedincov medzi jednotlivými druhmi. Pri vyrovnanom rozdelení jedincov má Shannon Wienerov index a index a jemu podobné indexy vysoké hodnoty, naopak Simpsonov index býva nízky. Preto sa interpretuje aj ako index koncentrácie dominancie. Konkrétne hodnoty indexov sa často porovnávajú s maximálne dosiahnuteľnou hodnotou indexu, teda teoretickou hodnotou pri úplne vyrovnanom zastúpení druhov. Táto hodnota sa označuje ako ekvita alebo ekvitabilita. Ich nevýhodou indexov diverzity je fakt, že nemajú priamu ekologickú interpretáciu. Dobré sa však hodia napr. na ilustráciu priebehu sukcesie medzi rôznymi spoločenstvami v priestore a čase, kde býva diverzita a ekvita v stredných štádiách vyššia ako vo východných a výsledných. Podobne existuje pravidlo, že v stredných štádiách narušenia (alebo symetricky prebiehajúcej spontánnej obnovy) spoločenstva, kde výtazne dominujú 1-2 tolerantné druhy býva diverzita nižšia. Naopak v silne exponovaných spoločenstvách (mestské parky, kvetinové záhony na uliciach) býva zastúpenie zistených druhov vyrovnané a ekvitabilita vysoká. V zásade však platí, že vysoká diverzita meraná počtom druhov i indexami diverzity nie je apriórne atribútom prirodzenosti spoločenstva a naopak. Príkladom môžu byť poľné spoločenstvá bystruškovitých, ktoré sú takmer vždy druhovo oveľa bohatšie ako prirodzené lesné. Hodnoty indexov diverzity musia byť vždy interpretované len na základe hodnotenia druhového spektra a jeho vzťahu k sledovanému prostrediu.

Zoogeografická štruktúra

Geografické rozšírenie druhov je možné typizovať a klasifikovať do podobných areálov rozšírenia. Ide na jednej strane o areály veľmi rozsiahle, ktoré na jednej strane zaoberajú aj územie severnej Eurázie a Ameriky (holarktické, cirkumpolárne), až po areály menšie (transpalearktické, eurosibírske, európske), alebo podstatne menšie, obmedzené len na jednotlivé pohoria, teda areály de facto endemické (stredoeurópske, karpatské, endemické). Rozsah týchto areálov je výsledkom propagačnej schopnosti jednotlivých druhov, ktorá úzko súvisí aj s ich ekologickou toleranciou. Inými slovami, u druhov s veľkými areálmi možno predpokladať väčšiu ekologickú toleranciu a tým aj odolnosť proti rôznym antropickým činiteľom. Do značnej miery to je vidieť v urbánnych alebo poľných ekosystémoch, kde druhy s veľkým areálmi výrazne prevažujú (FRISTOE et al. 2021, ŠUSTEK 1981, 1982). Naopak druhy s malými areálmi v takýchto ekosystémoch chýbajú. Podobné je to aj v aluviálnych ekosystémoch, ktoré majú v celom holarktickom prostredí veľmi podobné podmienky. To umožňuje ľahké osídľovanie týchto ekosystémov. Podporuje to aj veľká pohyblivosť vlhkomilných druhov, ktoré sú prispôbené kolísaniu vlhkosti a dokážu rýchlo strieďať stanovištia podľa momentálnych výkyvov vlhkosti.

Pohlavný index

Bystruškovité majú sklon k vyrovnanému pohlavnému indexu. Od tohto pomeru existujú v rôznych podmienkach odchýlky. Vo všeobecnosti totiž platí, že samce, ktoré majú snahu propagovať svoju genetickú informáciu majú aj snahu prenikať do prostredí, ktoré sú na okraji existenčných podmienok druhu, zatiaľ čo samice zodpovedné za potomstvo majú naopak snahu zotrvať blízko optimálnych podmienok (MÜLLER 1970, ŠUSTEK 1984). Prevalha samíc v populácii môže byť z hľadiska prežívania populácií výhodná, lebo samce môžu oplodniť viaceré samice. Naopak prevalha samcov môže byť nevýhodná a môže znamenať ohrozenie populácie. Boli skutočne zaznamenané prípady, keď prevalha samcov v populácii *Carabus cancelatus* a prevalha samíc v populácii *Carabus hortensis* sa po 10 rokoch prejavila vo zvýšení populačnej hustoty *Carabus hortensis* a výraznom poklese *Carabus cancelatus* (ŠUSTEK 1983, 1984). Prevalha samíc býva u bystruškovitých pozorovaná najmä u dominantných druhov v spoločenstvách vystavených určitému stresu. Je tu výrazná korelácia prevalhy samíc dominantných druhov a nízkych indexov diverzity v poľných ekosystémoch a v niektorých mestských parkoch.

Vzťah bystruškovitých k vegetačnému krytu

Značná časť bystruškovitých vyžaduje zatienenie súvislou stromovou vegetáciou, iné druhy naopak uprednostňujú otvorenú krajinu a časť druhov je k zatieneniu

indiferentná. Do určitej miery táto preferencia súvisí so systematickou príslušnosťou druhu a s prostredím, kde prebiehala v minulosti ich speciácia. Názorne to ilustruje KATAEV (2023) na príklade rodu *Harpalus*, v ktorom v našich podmienkach jednoznačne prevažujú druhy otvorenej krajiny. Tento rod však obsahuje aj druhy pôvodne lesné, napr. skupina druhu *Harpalus atratus*, ktorý je u nás typickou súčasťou svetlejších lesných porastov v nížinách.

Keďže narušenie lesných porastov je spojené prinajmenšom s ich presvetlením alebo priam so zničením stromového poschodia, môžeme pomer zastúpenia tieňomilných a svetlomilných druhov bystruškovitých považovať ako indikátor ich stavu. Preferencia zatienenia je u bystruškovitých kladne skorelovaná s ich preferenciou k zvýšenej vlhkosti. Absencia stromového krytu môže byť kompenzovaná klimatickou vodnou bilanciou prostredia (ŠKVARENINA et al. 2022). Prejavuje sa to aj prechodom od nočnej aktivity v nižších polohách k dennej aktivite vo vysokých polohách.

Vzťah bystruškovitých k vlhkosti

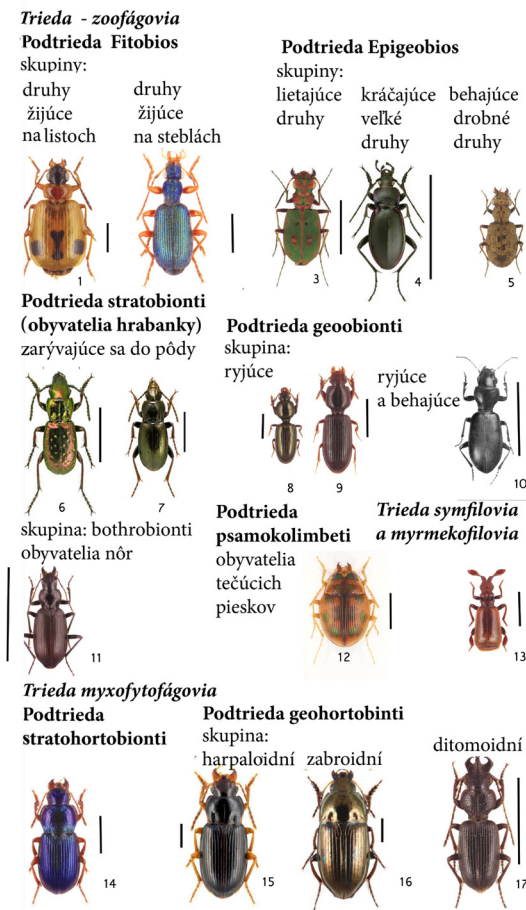
Bystruškovité majú výrazný a diferencovaný vzťah k pôdnej vlhkosti a k celkovým vlhkosťným pomerom prostredia (porovnaj vyššie). Ich preferencia siaha od vyslovene vlhkomilných druhov obývajúcich brehy vôd (mnohé druhy rodov *Dyschyrius*, *Bembidion*, *Elaphrus*) a trvale podmáčané stanovištia (viaceré druhy rodov *Agonum*, *Oodes*, *Pterostichus*, *Carabus clathratus*) až po suchomilné druhy obývajúce stepi (*Masoreus wetterhali*, druhy rodu *Microlestes*) a púšte (*Scarites bucephalus*). V strednej Európe však jednoznačne prevažujú druhy vlhkomilné v aluviálnych ekosystémoch a stredne vlhkomilné (v lesných a poľných ekosystémoch). Druhy xerofilné sú v menej početné. Opäť pomer ich kvalitatívneho a kvantitatívneho zastúpenia v spoločenstve má veľkú výpovednú hodnotu o stave ekosystémov a o procesoch, ktoré v nich prebiehajú. Má to zvlášť veľký význam pri hodnotení stavu mokradí a lužných lesov, ktoré sú často postihnuté reguláciami vodných tokov a snahou o predchádzanie záplavám.

Výrazná závislosť bola zistená medzi obdobiami sucha a kumulatívnou abundanciou bystruškovitých v horských ekosystémoch. Po výskyte sucha nasleduje približne s ročným až dvojročným oneskorením silný pokles abundancie bystruškovitých (ŠUSTEK et al. 2017).

Životné formy bystruškovitých

ŠAROVA (1981) vypracovala na základe detailnej znalosti autekológie bystruškovitých a porovnania ich morfológických vlastností komplikovaný systém klasifikácie ich životných foriem. Tento systém integruje informácie o ich potravných vzťahoch, spôsobe pohybu v hrabanke alebo na jej povrchu a vyhľadávania úkrytu v trhlinách pôdy

alebo aktívnym vyhrabávaním chodieb. Systém sa vyznačuje zložitým a nie vždy ľahko preložiteľným a prehľadným názvoslovím (napr. kráčajúce zoofágne epigeontobionty, stratobionty- hemikryptobionty žijúce v trhlínach). Obsahuje však veľké množstvo informácií o vlastnostiach druhov a preferencii spoločných typov prostredia. Systém je osobitne vypracovaný pre larvy a dospelce (Obr. 1). Predstavuje jedno z možných kritérií hodnotenia zmien prostredia. Na Slovensku bol použitý na hodnotenie zmien spoločenstiev v mestskom prostredí (ŠUSTEK 1992).



Obr. 1. Vybrané ukážky hlavných životných foriem bystruškovitých podľa ŠAROVJOJ (1981) (1 - *Lebia trimaculata*, 2 - *Drypta dentata*, 3 - *Cicindela campestris*, 4 - *Carabus glabratus*, 5 - *Elaphrus aureus*, 6 - *Pterostichus pillosus*, 7 - *Pterostichus foveolatus*, 8 - *Dyschirius chaldeus*, 9 - *Clivina fossor*, 10 - *Brosicus cephalotes*, 11 - *Shodrus leucophthalmus*, 12 - *Omophron limbatus*, 13 - *Pausus turcicus* (južná Európa), 14 - *Ophonus rupicola*, 15 - *Trichotichnus laevicollis*, 16 - *Amara aenea*, 17 - *Ditomus calydonicus* (Južná Európa).

Latentná komunikácia spoločenstiev bystruškovitých

Pri štúdiu spoločenstiev bystruškovitých sa stretávame vo veľmi ojedinelým výskytom stenoekných lesných alebo aluviálnych druhov aj v strede rozsiahlych poľných ekosystémov v odlesnenej krajine. Ich zastúpenie zväčša rádo vo neprekračuje pomer 1:10000 k druhom otvorenej krajiny. Naopak typicky poľné druhy nachádzame aj v homogénnych a rozsiahlych lesných komplexoch. Ich zastúpenie je však relatívne o niečo vyššie, vzhľadom na to, že spoločenstvá bystruškovitých v prirodzených lesných ekosystémoch sa spravidla výrazne vyznačujú menším počtom jedincov ako v poľných ekosystémoch. Je to dôkaz, že zdanlivo veľmi nepriaznivé podmienky umožňujú migráciu druhov s celkom odlišnými ekologickými nárokmi. S určitou metaforou môžeme tento proces prirovnať s migráciou terestrických druhov cez moria a osídľovaním ostrovov zo vzdialených pevnín. Pozoruhodné druhové bohatstvo niektorých ostrovov ukazuje, že tento princíp úspešne funguje aj v intenzívne antropicky zmenenej krajine.

Pod'akovanie

Štúdia vznikla v rámci riešenia projektu VEGA 1/0392/22.

Literatúra

- ARNDT E., SCNITTER, P., SFENTHOURAKIS S., WRASE, D., 2011: Ground beetles (Carabidae) of Greece, Pensoft, Sofia- Moscow, 393 s.
- BRAUN-BLANQUET, J., 1932: Plant sociology. The study of plant communities. McGraw-Hill, New York, London, 439 s.
- BURMEISTER, F., 1939: Biologie, Ökologie und Verbreitung der europäischen Käfer auf systematischer Grundlage. I. Band: Adephaga, I. Familiengruppe: Caraboidea. Hans Goecke Verlag, Krefeld, pp. 307.
- FRISTOE, T. S., CHYTRÝ, M., DAWSON, W. ESSL, F., HELENO, R., KREFT, H., MAUREL, N., PERGL, J., PYŠEK, P., HANNO SEEBENS, H., WEIGELT, P., VARGAS, P., YANG, Q., ATTORRE, F., BERGMEIER, E., BERNHARDT-RÖMERMANN, M., BIURRUN, I., BOCH, S., BONARI, G., BOTTA-DUKÁT, Z., BRUUN, H. H., BYUN, C., CARNI, Z., CARRANZA, M. L., CATFORD, J. A., CERABOLINI, B. E. L., CHACÓN-MADRIGAL, E., CICCARELLI, D., CUŠTEREVSKA, R., DE RONDE, I., DENGLER, J., GOLUB, V., HAVEMAN, R., HOUGH-SNEE, N., JANDT, U., JANSEN, F., KUZEMKO, A., KŮZMÍČ, F., LENOIR, J., MACANOVIČ, A., MARCENÒ, C., MARTIN, A. R., MICHALETZ, S. T., MORI, A. S., NIINEMETS, Ü., PETERKA, T., PIELECH, R., RAŠOMAVIČIUS, V., RUSINA, S., DIAS, A. S., ŠIBÍKOVÁ, M., ŠILC, U., STANISCI, A., JANSEN, S., SVENNING, J.-CH., SWACHA, G., VAN DER PLAS, F., VASSILEV, K., MARK VAN KLEUNEN, M., 2021: DIMENSIONS OF INVASIVENESS: Links between local abundance, geographic range size, and habitat breadth in Europe's alien and native floras. PNAS 2021 Vol. 118, No. 22 e2021173118, s. 11.
- HABERMANN, H., 1968: Eesti joksiklased (Carabids of Estonia! Valgus, Tallin, 599 pp.
- HŮRKA, K. 1996: Carabidae České a Slovenské republiky. Kabourek, Zlín, 565 pp.
- GEORGUIEV, V. B. – GEORGUIEV B. V. 1995: Catalogue of the groundbeetles of Bulgaria (Coleoptera: Carabidae) Pensoft, Sofia – Moscow, pp.279.
- KATAEV, B. M., 2023: A review of Asian species of the genus *Platymetopus* (Coleoptera: Carabidae: Harpalini) Zootaxa 5306(5):501-536.
- LINDROTH, C. H., 1949: Die Fennoskandischen Carabidae. Eine Tiergeographische Studie. I. Spezieller Teil. Witergren & Kerbers Förlag, Göteborg, 711 s.
- LINDROTH, C. H., 1985: The Carabidae (Coleoptera) of Fennoscandia and Denmark Vol. 1 - 2. (Fauna

- Entomologica Scandinavica 15, Brill. Scandinavien Science Press Ltd., Leiden - Copenhagen, 497 s.
- MÜLLER, G. 1970: Der Sexual index bei Carabiden als ökologische Kriterium. Entomologische Berichte, 14: 12-18.
- PAVLÍČEK T. & HOUŠKOVÁ L. 1989: The problem off survival of Carabidae (Coleoptera in the agricultural landscape of southern Moravia. Scripta fac. sci, nat. Univ. Purk. Brunensis, 19, (3-6): 229-238.
- PIELOU, E. C., 1977: Mathematical ecology. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, 385 pp.
- RAUŠER, J., ZLATNÍK, Z., 1966: Biogeografie I, Národní atlas ČSSR, list 21.
- SUKAČEV, V. N. DYLIS, N. V. 1964: Osnovy lesnoj geobiocenologii, Nauka, Moskva, 573 s.
- ŠAROVA, I. Ch. 1981: Žiznennye formy žuželic, Coleoptera, Carabidae, Nauka, Moskva, 360 s.
- ŠKVARENINA, J., TOMLAIN, J., KRIŽOVÁ, E., 2002: Klimatická vodní bilance vegetačních stupňu na Slovensku. Meteorol. správy, 55: 103–109.
- ŠUSTEK, Z., 1981: Některé souvislosti geografického rozšíření střevlíkovitých (Col. Carabidae) a jejich schopností pronikat do ekosystémů urbanizované krajiny. Zprávy Geografického ústavu ČSAV, 18 (1): 30-40.
- ŠUSTEK, Z., 1982: An attempt at a possible application of zoogeographical criteria in bioindication. S. 167-172. In: Zborník referátov z konferencie Živočíšstvo ako bioindikátor zmien životného prostredia. Slovenská zoologická spoločnosť pri SAV v Bratislave. Zoologický ústav Univerzity Komenského v Bratislave. 218 s.
- ŠUSTEK, Z., 1983: The comparison of the Carabidae and Staphylinidae (Insecta, Coleoptera) in the selected geobiocoenoses of the Pavlovské kopce hill during the years 1971-1973. Biológia (Bratislava), 38: 105-115.
- ŠUSTEK, Z., 1984: Bioindicative and prognostic significance of sex ratio in Carabidae. Ekológia (ČSSR):2: 3-32.
- ŠUSTEK, Z., 1992: Changes in the representation of Carabid life forms along an urbanisation gradient. Biológia (Bratislava), 47: 417-430.
- ŠUSTEK, Z., 1993: Niekoľko úvah o používaní zemných pascí k odchytu epigeického hmyzu. In: Vršk T. (Ed.): Sborník referátů z pracovního semináře Výzkum lesních rezervací pořádaného dne 25. 3. 1994 u příležitosti 75. výročí vzniku VŠZ v Brně, p. 73-76.
- ŠUSTEK, Z., 1995: Fluktuácie populácií druhov *Pterostichus melanarius* a *Pterostichus niger* (Col. Carabidae) a ich interpretácia. In: Svobodová, A. et Lisický, M. J. (eds). Výsledky a skúsenosti z monitorovania bioty územia ovplyvneného vodným dielom Gabčíkovo. Ústav zoológie a ekososológie SAV, Bratislava, 314-318.
- ŠUSTEK, Z., 2000: Spoločensvá bystruškovitých (Coleoptera, Carabidae) a ich využitie ako doplnkovej charakteristiky geobiocenologických jednotiek: problémy a stav poznania. In: ŠTYKAR, J., ČERMÁK, P. (eds), Geobiocenologická typizace krajiny a její aplikace, Geobiocenologické spisy, svazek č. 5. Brno, p. 18–30.
- ŠUSTEK, Z., 2004. Characteristics of humidity requirements and relations to vegetation cover of selected Central-European Carabids (Col., Carabidae). In: ŠTYKAR, J. ČERMÁK, P. (Eds.): Geobiocenologická typizace krajiny a její aplikace [Geobiocenological landscape typology and applications]. Geobiocenologické spisy, 9, 210–214.
- ŠUSTEK, Z., 2006: Cenozele carabidelor din ecosisteme alpine si subalpine din Carpații occidentali. Oltenia, stud. com., Șt. Nat., 22: 138–147.
- ŠUSTEK, Z., 2009: Changes of secondary productivity of Carabid communities (Insecta: Coleoptera) in natural forest ecosystems in relation to geological substrate and vertical zonality. Oltenia. Studii și comunicări. Științele Naturii, 25: 83-90.
- ŠUSTEK, Z., VIDO, J. 2013: Vegetation state and extreme drought as factors determining differentiation and succession of Carabidae communities in forests damaged by a windstorm in the High Tatra Mts. Biologia, 68, 119–121.
- ŠUSTEK, Z. 2017: Changes in chorological structure of Carabid assemblages during their restoration after the windstorm in High Tatra in 2004. In: 24th International Poster Day Transport of Water, Chemicals and Energy in the Soil-Plant-Atmosphere System Bratislava, 8.11.2017, s. 268 -276.
- ŠUSTEK, Z., VIDO, J., ŠKVARENINOVÁ, J., ŠKVARENINA, J., ŠURDA, P. 2017: Drought impact on ground beetle assemblages (Coleoptera, Carabidae) in Norway spruce forests with different management after windstorm damage – a case study from Tatra Mts. (Slovakia). Journal of Hydrology and Hydromechanics, 65: 333–342.
- ŠUSTEK, Z., ŽUFFA, M., 1986: Orientačné výsledky inventarizačného výskumu spoločensiev čeľadi Carabidae a Staphylinidae v CHKO Malá Fatra. Ochrana prírody, 7: 347–374.
- ŠUSTEK, Z., ŽUFFA, M., 1988: Spoločensvá bystruškovitých a drobčíkovitých (Coleoptera, Carabidae et Staphylinidae) Štátnej prírodnej rezervácie Kľáčianska Magura v Chránenej krajine oblasti Malá Fatra. Ochrana Prírody, 9: 229–251

SNEŽNÉ RIASY A ICH ŠPECIFICKÝ EKOSYSTÉM SNEHOVÝCH POLÍ

Miriám HANZELOVÁ¹

HANZELOVÁ, M.: Snežné riasy a ich špecifický ekosystém snehových polí, Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

ABSTRAKT

S prebiehajúcim klimatickým otepľovaním dochádza k výrazným zmenám v snehových pokrývkach na celom svete, ktoré pokrývajú približne tretinu zemského povrchu a zohrávajú kľúčovú úlohu v schladzovaní zemského klimatického systému. Snehová pokrývka tiež predstavuje dôležitý habitat pre mikroskopické organizmy, ktoré sú schopné prežiť v extrémnych podmienkach. Tento článok prináša informácie o rozmanitosti organizmov žijúcich v chladných podmienkach, vrátane snežných rias a mikroorganizmov, ktoré predstavujú dokonalé príklady adaptácie a odolnosti voči extrémnym podmienkam. S globálnym zmenšovaním a miznutím snehových ekosystémov sa stáva dôležitým a naliehavým úsilie o celkové pochopenie ich produktivity, biodiverzity a fungovania špecifického ekosystému. Zároveň, vďaka ich jedinečným adaptáciám majú potenciál využitia k rozvoju nových produktov a biotechnológií. Snežné riasy nám ukazujú, že aj v najmenej pravdepodobných miestach môže život nielen existovať, ale aj prosperovať a poskytovať inšpiráciu pre nové vedecké objavy.

Kľúčové slová – snehová pokrývka, snežné riasy

Snehová pokrývka - zložka klimatického, hydrologického systému a ekosystému

Sneh pokrýva takmer tretinu (32%) zemského povrchu a ľad približne 11%. (ALLISON *et al.*, 2018). Je to dôležitá informácia, pretože zmeny v týchto snehových a ľadových ekosystémoch môžu mať značný vplyv na globálnu klímu a biodiverzitu (HOLHAM & REMIAS, 2020). Snehová pokrývka hrá kľúčovú úlohu v schladzovaní zemského klimatického systému, ovplyvňuje množstvo a distribúciu slnečnej radiačnej energie, ktorá sa absorbuje alebo odráža späť do atmosféry. Veľkosť tohto chladiaceho vplyvu sa znížila spolu s pozorovaným znížením jarnej snehovej pokrývky v posledných desaťročiach (LETTERLY *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2019).

Na základe údajov z posledných dekád sa stále jasnejšie ukazuje, že s prebiehajúcim klimatickým otepľovaním dochádza k výrazným zmenám v snehových pokrývkach na celom svete. Nie len snehová pokrývka ale celá kryosféra (sneh, morský ľad a povrchový

permafrost) je veľmi citlivá na zmeny teploty, čo znamená, že aj malé otepľovanie alebo ochladzovanie môže mať veľký vplyv na množstvo a rozloženie snehu. Nezáleží na tom, aká presne je trajektória globálneho otepľovania (napríklad rýchlosť alebo intenzita otepľovania), sneh rýchlo a priamo odpovedá na tieto zmeny teploty, bez ohľadu na to, aký presne je priebeh zmeny klímy (MUDRYK *et al.*, 2020). Pozorovania jasne hovoria o zmenách nie len v oblastiach subarktických a arktických regiónoch (BROWN *et al.*, 2017; MEREDITH *et al.*, 2020), ale aj v stredných zemepisných šírkach (MUDRYK *et al.*, 2017) a alpských oblastiach (HOCK *et al.*, 2019).

Snehová pokrývka predstavuje významný komponent hydrologického cyklu. Pozorované a predpokladané zmeny v sezónnom pokrytí snehom, najmä v horských oblastiach, majú významný vplyv na množstvo, kvalitu a časovú dostupnosť vody. Tieto zmeny môžu ovplyvniť všetko od zásobovania vodou po riadenie vodných zdrojov a ekosystémové služby (FYFE *et al.*, 2017; MARTY *et al.*, 2017; VERFAILLIE *et al.*, 2018).

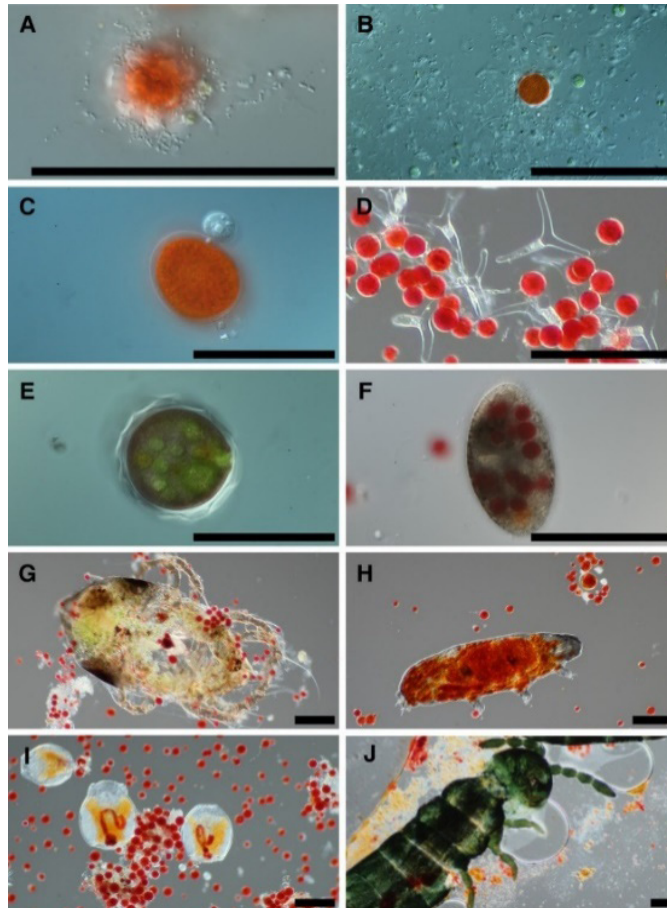
V neposlednom rade však snehová pokrývka zohráva dôležitú úlohu v ekologickom systéme. Predstavuje totiž habitat pre život spoločenstva mikroskopických organizmov, ktorý nepatrí zrovna medzi tie najpohostinnejšie. Výskyt, rozloženie a trvanie snehovej pokrývky v čase a priestore je veľmi premenlivé. Môžeme tvrdiť, že ide o jedno z extrémnych prostredí, kde pôsobia v interakcii podmienky ako nízka teplota (okolo 0°C), silná radiácia a UV žiarenie, obmedzená dostupnosť živín, mierne kyslé pH, nízka vodivosť, vysychanie, striedanie fáz roztápania a opätovného zamrzania, krátka sezóna rastu (len niekoľko týždňov počas roku) (HOHAM & DUVAL, 2001; KOMÁREK & NEDBALOVÁ, 2007; PROCHÁZKOVÁ, 2020)

Kryosetón

Organizmy schopné prežiť v snehu a na povrchu ľadovcov nazývame kryosetón (FOTT, 1967). Ide o fascinujúci mikrosvet, často prehliadaný, no o to viac úžasný. Diverzita organizmov žijúcich v chladných podmienkach je prekvapivo veľká. Unikátny ekosystém, ktorý pozostáva hlavne zo snežných rias, ktoré to všetko spúšťajú. V tomto ekosystéme sú snehové riasy primárnymi producentmi. Keď fotosyntetizujú, spotrebúvajú živiny a zároveň produkujú odpadové produkty, ako sú cukry a ďalšie zložky, ktoré slúžia ako možná potrava pre baktérie a iné mikroorganizmy (KHADILKAR, 2021). Komunita baktérií, húb, prvokov alebo malé rotifery, tardigrady, roztoče a pavúky tiež považujú snehový ekosystém za svoj domov.“ (LOOP, 2022; YAKIMOVICH *et al.*, 2021). Tak ako je to v prípade vodného prostredia tak aj v tomto extrémnom a efemérnom prostredí je pravdepodobné že vznikajú vzájomné interakcie, ktoré sú nevyhnutné pre rast rias (SEYMOUR *et al.*, 2017). Baktérie môžu podporovať rast rias prostredníctvom výmeny metabolitov, napríklad vitamínov, aminokyselín alebo rastlinných hormónov, za fixovaný uhlík. Niektoré štúdie ukazujú, že riasy izolované zo snehu rastú lepšie v prítomnosti baktérií z prí-

rodných vzoriek (HARROLD *et al.*, 2018; VERFAILLIE *et al.*, 2018). V ekosystéme snehu je zastúpenie heterotrofných organizmov menej časté v porovnaní so snežnými riasami a sú prevažne sústredené na okrajoch snehových polí, kde majú možnosť kontaktu s pôdou. YAKIMOVICH *et al.* (2020) uvádza dôkazy o predácii snežných rias vírnikmi, tardigradmi, chvostoskokmi, chytridovými hubami a nálevníkmi (obr. 1), čím sa vytvára rámec pre komplexnú potravinovú sieť. Všetky organizmy tak vytvárajú reťazce, potravinové siete a spolu s fyzikálnymi a chemickými parametrami tvoria zložité snehové a ľadovcové ekosystémy (AITCHISON, 2001; HOHAM & DUVAL, 2001).

Organizmy žijúce v extrémnych podmienkach, ako sú snehové ekosystémy, si museli vyvinúť sofistikované adaptačné mechanizmy na prežitie. Kľúčovou schopnosťou snežných rias je zabezpečiť fungovanie fotosyntézy aj pri nízkych teplotách (SIGEE, 2005). Okrem toho, ich komplikovaný životný cyklus, ktorý zahŕňa bičíkaté štádiá, ktoré aktívnym pohybom vyhľadávajú vhodnejšie podmienky pre fungovanie a naopak trvalé štádiá, tzv. cysty, v ktorých prežívajú nepriaznivé teploty (veľmi nízke ale aj vysoké teploty počas leta), prípadne obdobia vysychania (HOHAM & DUVAL, 2001). Ďalším zaujímavým adaptačným mechanizmom snežných rias je vytváranie slizového obalu na povrchu buniek, ktorý zachytáva prach a iné častice, čím poskytuje bunkám ochranu proti silnému žiareniu (REMIAS *et al.*, 2005). Tento obal zároveň poskytuje istý stupeň zatienenia, ktorý môže byť dôležitý pre prežitie týchto organizmov v prostrediach s vysokým ultrafialovým žiarením. Vnútri bunky snehových rias sú prítomné sekundárne karotenoidy, ktoré slúžia ako pasívny filter a ochrana proti vymrznaniu. Tieto karotenoidy sú dôležité pre zachovanie životaschopnosti buniek pri extrémnych teplotách. Taktiež zmena zloženia mastných kyselín v bunkových membránach je ďalším mechanizmom, ktorý zabezpečuje fluiditu bunkových membrán aj pri nízkych teplotách (GORTON *et al.*, 2001; SECKBACH, 2007). No nie len snežné riasy, ale taktiež niektoré bezstavovce sa vysoko špecializovali pre život na povrchu snehu. Medzi príklady patria tzv. snežná blcha *Hypogastrura socialis* (*Collembola*) a dva bezkridle hmyz *Chionea* sp. (*Diptera: Limoniidae*) a *Boreus* sp. (*Mecoptera*), využívajú hladký povrch snehu pre efektívnu migráciu. Mrazuvzdorný pavúk *Boleophthalmes index* je jedinečný tým, že konštruje siete v malých depresiách na snehu, aby chytil migrujúce *Collembola* (HÄGVAR, 2010).



Obr. 1 – Reprezentatívne snímky z mikroskopovania zafarbeného snehu snežnými riasami. Bakérie viditeľné v popredí (A) s červenou pigmentovanou bunkou snežnej riasy v pozadí, (B) rôzne bunky označené ako huby kvôli veľkosti, (C) pozostáva z dvoch chytridových buniek pripojených k vonkajšej časti bunky rias, (D) zobrazuje morfológický druh húb nazývaný *Selenotila nivalis*, (E) neidentifikovaný mikro-eukaryot, (F) nálevník, (G) roztoč, (H) pomalka, (I) vírnik, (J) chvostok (Collembola). Všetky mierky predstavujú 100 μm (YAKIMOVICH et al., 2020)

Fig. 1 - Representative photomicrographs of snow algae bloom samples. Bacteria are seen in the foreground of panel (A) with a red pigmented algae cell in the background, and various cells putatively designated as fungi due to size are in panel (B). Panel (C) is of two chytrid cells attached to the outside of an algae cell. Panel (D) shows a fungal morphological species called *Selenotila nivalis*. Panel (E) shows an unidentified micro-eukaryote and panel (F) shows a ciliate. Panels (G–J) are representative of animals seen in samples, and in order are a mite, tardigrade, rotifers, and a springtail (*Collembola*). All scale bars are 100 μm . (YAKIMOVICH et al., 2020)

Snežné riasy

V nasledovnom texte budeme venovať pozornosť len skupine snežných rias. Tie sa nevyvíjajú v čerstvo napadnutom snehu. Vyskytujú sa na permanentných alebo semipermanentných snehových poliach, povrchoch ľadovcov, vo vysokých nadmorských výškach a zemepisných šírkach. Kryosestón sa v skrytej forme vyskytuje pomerne hojne, ale zreteľne viditeľné prejavy sa vyskytujú menej často. Okolnosti, ktoré robia tieto spoločenstvá viditeľnými voľným okom závisia od dostupnosti kvapalnej vody. Hlavná sezóna výskytu a rozvoja spoločenstiev snežných rias prichádza na jar alebo v lete, v čase keď sa začína sneh topiť. V dôsledku toho, iba mokrý sneh, ktorý zotráva dosť dlho, je vhodný pre rozvoj populácií rias (REMIAS, 2012). Väčšinou je potrebných 7-10 dní nepretržitého topenia snehu na to, aby sa objavili snežné riasy (HOHAM & DUVAL, 2001). Snežným riasam teda nevyhovuje suchý zimný sneh ani rýchlo sa topiaci sneh (snehová kaša) v nížinách (REMIAS, 2012). Za priaznivých podmienok dochádza k premnoženiu snežných rias v snehovom poli a toto premnoženie vedie k viditeľnému zafarbeniu povrchu snehu.

Zafarbenie snehu býva nepravidelné, ale skôr škvrnité a nemusí sa vyskytovať bezprostredne na povrchu ale aj pár centimetrov hlbšie, v závislosti od prenikania slnečného žiarenia do snehovej pokrývky, ktoré je nevyhnutné pre fotosyntézu rias (THOMAS & DUVAL, 1995). Farba snehu a jej intenzita je závislá od druhu kryosestónu a od fázy životného cyklu, pigmentového zloženia a koncentrácie buniek v snehu (HOHAM & DUVAL, 2001; KOMÁREK & NEDBALOVÁ, 2007; REMIAS, 2012; SIGEE, 2005). Farebná škála snehových polí je dosť široká, od žltó-zelenej, cez oranžovú, červenú, ružovú, zlato-hnedú. Najčastejšie sa stretávame s červeným sfarbením snehu, vo svete známim tiež pod pojmom „watermelon snow“. Niektorí ľudia s citlivým čuchom sú vraj schopní rozpoznať vôňu melóna, ktorá ide z roztápujúceho sa snehového poľa a údajne pochádza z produktu štiepenia astaxantínu, preto ten názov melónový sneh (NEDBALOVÁ & PROCHÁZKOVÁ, 2019).

Niečo málo z histórie pozorovaní snežných rias

Mysteriózny červený sneh bol spomínaný kronikármi už od dávnych čias a bol zaznamenaný na všetkých kontinentoch vrátane Antarktídy. Spočiatku sa ľudia domnievali, že zafarbený sneh je božie varovanie, alebo že na danom mieste vychádzajú na povrch rudné žily. Neskôr si mysleli, že tento jav má fyzikálny pôvod ako napríklad odraz oblohy, alebo prítomnosť kozmického prachu či splavenín a minerálov z pôdy. O miestach s výskytom červeného snehu vznikali povesti o „krvavom daždi« alebo o tragických nehodách ľudí.

Za prvú zmienku o farebnom snehu pokladáme dielo *Meteorologica* od Aristotelesa. Objaviteľské cesty počas novoveku priniesli veľa nových záznamov ako napr. J. Davis v roku 1585 pozoroval v prielive medzi Grónskom a Baffinovým ostrovom červené snehové polia. Sú známe pozorovania zo Špicberg z druhej polovice 17. storočia. História tento fenomén zaznamenáva aj v roku 1818, keď kapitán John Ross z britského námorníctva popisuje obrovské plochy pokryté červeným snehom v Grónsku. Francis Bauer v roku 1819

prvkrát popisuje pôvodcu červeného snehu v svojom článku, pôvodne ho považoval za huby zo skupiny hrdz. Avšak, vďaka následným vedeckým prácam bol tento organizmus zaradený do rastlinnej ríše. Zaujímavý prínos priniesol aj Charles Darwin, ktorý si v roku 1835 všimol červenajúce sa stopy po muliciach v snehu počas prechodu Andami. Po detailnom skúmaní pod mikroskopom, Darwin popisuje tento jav ako zvláštny. Časom ako sa zdokonalil mikroskop, roku 1896 švajčiarsky algológ R. Chodat mikroskopovaním prišiel na to, že červené sfarbenie je spôsobené intenzívnym rastom mikroorganizmov. Nórsky bádateľ N. Wille vykonal podobný výskum ako Chodat a v roku 1903 identifikoval najčastejšie sa vyskytujúci druh v červenom snehu *Chlamydomonas nivalis*, ktorý sa objavuje od horských lokalít cez polárne oblasti až po exotické tropické ľadovce. Je považovaný za najrozšírenejšiu snehovú riasu. Avšak už niekoľko generácií vedcov po celom svete sa snaží o jeho ochočenie, no stále bez úspechu, čo z neho robí nedokonale preskúmaný, kolektívny druh. (NEDBALOVÁ & PROCHÁZKOVÁ, 2019; NEDBALOVÁ & LUKAVSKÝ, 2007). V minulosti patrili Vysoké Tatry z hľadiska výskumu kryoflóry medzi najpreskúmanejšie horské oblasti v Európe (HINDÁK, 1970). Medzi prvé vedecké záznamy patrí určite práca „Über die Kryovegetation der Hohen Tatra“ od Erzsébet Kol z roku 1928.

Dnes vieme, že červené pigmentované snehové riasy sú kozmopolitné a nezávislé od geochemických a mineralogických faktorov špecifických pre danú lokalitu (Lutz *et al.*, 2016). Procházková *et al.* (2019) informuje o objave úplne nového rodu mikrorias, ktorý je zodpovedný za vznik červeného a oranžového snehu v rôznych častiach sveta. Tento rod, objavený botanikmi na Karlovej univerzite v Prahe v Českej republike pred pár rokmi, pomenovali *Sanguina* ako odkaz na krvavo-červenú farbu, ktorú tieto riasy produkujú. Výskumníci našli spomínanú riasu v Európe, Severnej Amerike, Južnej Amerike aj v obidvoch polárnych oblastiach. Na Svalbarde spôsobila nezvyčajný oranžový sneh (KHADILKAR, 2021)

Medzi najčastejšie sa vyskytujúce rody snežných rias patria okrem už zmieneného *Chlamydomonas* taktiež rody *Chloromonas* a *Chlainomonas* a v neposlednom rade aj rod *Sanquina*, ktorý bol výsledkom nových vedeckých zistení preklasifikovaný z pôvodného rodu *Chlamydomonas* (PROCHÁZKOVÁ *et al.*, 2019).

„Ochranný svetelný štít“ snežných rias

Pri pohľade pod mikroskop sú si spomínané riasy veľmi podobné. Ide o „červené guľičky“ rôznych veľkostí, takzvané cysty, ktoré obsahujú červený pigment, sekundárny karotenoid zvaný astaxantín. Ten chráni bunkové štruktúry pred poškodením extrémnymi podmienkami prostredia, pretože slúži ako antioxidant (pomáha neutralizovať škodlivé voľné radikály, ktoré môžu spôsobiť oxidačné poškodenie buniek), ako pohlcovač energie a ako svetelný štít pre bunky rias vystavené intenzívnemu žiareniu na povrchu snehu. Zabráňuje tak fotoinhibícii alebo poškodeniu UV žiarením, čo je kľúčové pre prežitie rias v extrémnych podmienkach, ako sú snehové polia, kde sú vystavené vysokým hladinám slnečného žiarenia. Napokon, astaxantín môže predstavovať „metabolickú nádrž“ v nerastúcich sporách. Tento termín sa používa na označenie molekúl, ktoré absorbujú a

ukladajú prebytočnú energiu, čím pomáhajú stabilizovať metabolické procesy v bunke, a to najmä v situáciách, keď je energia hojne dostupná, ale rast buniek je obmedzený. (LEMOINE & SCHOEFS, 2010; LI *et al.*, 2008; REMIAS *et al.*, 2016). V mnohých prípadoch astaxantín takmer úplne pokrýva štruktúru chloroplastov cysty, čo sťažuje použitie svetelného mikroskopu pri identifikácii druhu. Preto kvôli morfologickej podobnosti červených spór sú vedci nútení využívať ďalšie prístupy skúmania kde kombinujú použitie viacerých metód skúmania ultraštruktúry, genetiky, životného cyklu, fotosyntézy a ekofyziológie (PROCHÁZKOVÁ *et al.*, 2020). V práci REMIAS *et al.* (2016) využili svetelnú a transmisnú elektónovú mikroskopiu a chromatografickú analýzu v kombinácii s hmotnostnou spektrometriou, aby prišli na rozdiely v intracelulárnej organizácii snežných rias *Chlainomonas sp.* a *Chlamydomonas nivalis*.

Snežné riasy v pozornosti nie len odborníkov ale aj verejnosti

Fenomén snežných rias a červeného/ružového snehu sa v súčasnosti stáva stále viac rozpoznateľným nielen v rámci vedeckej komunity, ale aj medzi laickou verejnosťou. O rastúcom záujme na túto tému poukazujú titulky zahraničných článkov ako napríklad „*Ladovcová krv? Melónový sneh? Akokoľvek sa to volá, sneh by nemal byť taký červený*“ (GIAIMO, 2021), „*Melónový sneh: Nie je jedlý, ale je dôležitý pre zmenu klímy*“ (KLEIN, 2016), „*Život na náhornej plošine: Nejedzte riasy, ktoré voňajú ako melón*“ (YING, 2019), „*Prečo môže byť posledný sneh na Zemi červený*“ (BURDICK, 2017), „*Rastúce škvrny farebného snehu vo francúzskych Alpách by mohli byť znakom vplyvu klimatických zmien na hory*.“ (KHADILKAR, 2021) a mnoho ďalších.

Tento trend záujmu o snežné riasy je ďalej potvrdený vznikom nových pracovných tímov na vedeckej scéne, ale aj medzi amatérskymi dobrovoľníkmi. Projekt ALPALGA, je konzorcium spolupracujúcich piatich francúzskych inštitútov, ktoré sa venuje štúdiu horských rias. Združuje vedeckých pracovníkov z rôznych disciplín, vrátane biológov, environmentálnych vedcov (ekológov) a glaciológov. Ich úlohou je skúmať mikroriasy žijúce vo výškach od 1000 do 3000 metrov nad morom v náročnom teréne Álp (ALPALGA – Microalgues des Alpes). Na rozdiel od tejto iniciatívy vznikol na Western Washington University projekt s názvom „Living Snow Project, ktorý je unikátny svojím spojením študentov, turistov, horolezcov a lyžiarov. V rámci ich bežných outdoorových aktivít sú títo dobrovoľníci zapojení do zhromažďovania vzoriek sfarbeného snehu. Práve ich angažovanosť umožňuje výskumníkom získať vzorky z omnoho širšieho územia, než by bolo možné len silami vedeckého tímu. Vďaka tejto spolupráci „Living Snow Project“ sa snaží o vytvorenie najväčšej databázy biodiverzity mikrobiómu ružového snehu na svete (LIVING SNOW PROJECT).

Pozorovanie snežných rias je fascinujúce z mnohých hľadísk. Zaujímavé je skúmať zloženie snežného spoločenstva, interakcie medzi jeho členmi, skúmanie doteraz presne nepochopeného životného cyklu snežných rias a objavovanie mechanizmov, ako sa tieto organizmy prispôbujú extrémnym podmienkam. Všetky tieto aspekty predstavujú významný prínos pre vedu a výskum, avšak môžu byť pre laickú verejnosť menej ucho-

piteľné. No keď sa na to pozrieme v súvislosti s aktuálnou a v médiách neustále diskutovanou témou klimatickej zmeny, rýchlosti topenia sa a straty kryosféry, téma snežných rias zaujme aj verejnosť mimo odbornej komunity. S rastúcimi teplotami sa topenie snehu zrýchľuje, tým pádom snehové polia obsahujú väčšie množstvo kvapalnej vody čo vedie k vytvoreniu lepších podmienok potrebných pre rast snežných rias, ktoré sa v danom prostredí premnožia do takej miery že sfarbia povrch snehu. Sneh a ľad majú prirodzene vysoké albedo (odrážajú veľa slnečného svetla späť do atmosféry), čím pomáhajú regulovať globálnu teplotu. Avšak stmavenie snehu riasami znižuje toto albedo (ONUMA *et al.*, 2020), čo vedie k rýchlejšiemu topeniu snehu (HEALY & KHAN, 2023) a potenciálne prispieva k rýchlejšiemu globálnemu otepľovaniu.

Na sledovanie a mapovanie efektu zníženia albeda červeným snehom na veľkých územiach sa javí využitie bezpilotných autonómnych vozidiel (napr. drony) (HEALY & KHAN, 2023) a satelitných snímkov ako efektívna metóda. Aj keď je to zriedkavý a metodologicky náročný prístup kvôli prítomnosti iných svetlo-absorbujúcich nečistôt (HUOVINEN *et al.*, 2018). Satelitné snímky poskytujú podrobný pohľad na zemský povrch a umožňujú presné určenie miest, kde sa červený sneh vyskytuje. Táto metóda je užitočná aj preto, že umožňuje sledovanie zmien v čase a ich analýzu v súvislosti s klimatickými zmenami. LUTZ *et al.* (2016) pri porovnávaní albedo meraní na červenom snehu oproti snehu bez rias odhadli, že tmavnutie snehu mikroorganizmami znižuje albedo o približne 13% v priebehu 100 dní. Tvrdí, že takýto ‚bio-albedo‘ efekt musí byť zohľadnený v klimatických modeloch. V práci GANEY *et al.* (2017) zistili, že mikrobiálne spoločenstvá sú zodpovedné za 17% celkového topenia snehu a predpokladajú že, ich príspevok k globálnemu otepľovaniu pravdepodobne porastie s väčším topením a prísunom živín. Riasy sú preto «indikátormi» (pozitívne ovplyvnené súčasnými environmentálnymi zmenami) a zároveň «aktérmi» (pozitívne pôsobiacimi na tavenie ľadu a snehu) klimatickej zmeny. Výskum rias v ľade a snehu je preto nevyhnutný na lepšie pochopenie dopadu klimatických zmien v polárnych a horských prostrediach. MARÉCHAL & NEDBALOVÁ, 2022).

Inšpirácia pre nové technológie a vedecké objavy

Snežné riasy, aj keď môžu na prvý pohľad pôsobiť nevýznamne, majú výrazný vplyv na prostredie, v ktorom žijú a tiež môžu priniesť mnoho benefitov pre ľudskú civilizáciu. Ich význam spočíva v ich schopnosti zvládať extrémne podmienky, čím sú zaujímavými modelmi pre výskum napríklad mikroevoúcie a biogeografickej distribúcie. Môžu predstavovať jedinečné príklady toho, ako sa migrácia, izolácia a následne lokálna adaptácia odráža v mikroevoúcií komunít. Práca SEGAWA *et al.* (2023) naznačuje zistenia, že tzv. „kosmopolitné» mikroorganizmy sa rozšírili po celom svete a následne sa vyvinuli nové, lokálne endemické druhy. Alebo môžu predstavovať nový zdroj pre poznanie klímy v minulosti, pretože riasy a druhové zloženie komunít uložených do vrstiev ľadu počas dlhého obdobia môžu reflektovať podmienky z minulých rokov (TAKEUCHI, 2001; YOSHIMURA *et al.*, 1997).

V oblasti biochémie, snežné riasy zohrávajú dôležitú úlohu pri primárnej produkcii, respirácii, kolobehu živín, dekompozícii, akumulácii kovov a v potravinových reťazcoch v habitate snehu a ľadu (HOHAM & LING, 2000). Často sa zúčastňujú na procesoch, ktoré môžu byť využité pri spracovávaní odpadov alebo v potravinárstve. Sú tiež potenciálnym zdrojom astaxantínu, ktorý má zdravotné a výživové benefity a môže byť pridaný do potravín ako aditívum. Astaxantín je cenný aj vo farmácii ako neškodné farbivo a ako doplnková látka do akvakultúr. Je tiež potenciálnym predchodcom biopalív, čím otvára dvere k širšiemu využitiu týchto rias v budúcnosti (SOLOVCHENKO, 2015).

Na biotechnologickom poli sú snežné riasy považované za ideálne modelové organizmy vďaka ich rýchlemu rastu, silnej adaptabilite na extrémne prostredia a vysokým obsahom olejov (ZHENG *et al.* 2020). Mikroriasy ponúkajú vynikajúce možnosti pre výrobu potravín a palivových komodít, ale v chladnejších klímach môžu nízke rastové rýchlosti mnohých odrôd brzdiť produkciu. V práci HULLAT *et al.* (2017) boli testované extrémofilné arktické mikroriasy, aby sa zistilo, či možno dosiahnuť uspokojivý rast a produkciu lipidov pri nízkej teplote vody. Výsledky naznačujú, že polárne mikroriasy by mohli poskytnúť príležitosť na zvýšenie výnosov mikroalgovej biomasy a olejových produktov pri nízkych teplotách.

Rovnako našli snežné riasy uplatnenie aj v kozmetickom priemysle. V dnešnej dobe začali viacerí výrobcovia (napr. švajčiarska kozmetika) pridávať do svojich produktov červený prášok zo snežných rias. Tento extrakt je schopný zabraňovať starnutiu, chrániť pokožku pred zvýšenou produkciou enzýmov zodpovedných za rozklad kolagénu a zlepšovať hydratáciu pokožky. Krémy obsahujúce prášok zo snehových rias majú dokázané protistárnucie účinky (JACQUELINE PIOTAZ SWITZERLAND, NCC (Nutrition Cosmetics Creation SA), 2020 WILDT, 2016, NIKŠA, 2014, SCHMID *et al.*, 2014). Uplatnenie by mohli kľudne nájsť aj pri vývoji opaľovacích krémov.

Dnes je známe, že snežné riasy sú schopné prežiť v náročných a nepriaznivých podmienkach vrátane mrazivých teplôt, intenzívneho solárneho žiarenia a podmienok chudobných na živiny.

Preto sú tieto organizmy často v centre záujmu astrobiológie, štúdia života vo vesmíre, pretože pochopenie stratégií a mechanizmov, ktoré používajú na prežitie snežné riasy, môže vedcom pomôcť predpovedať, aký druh života by mohol existovať na iných planétach alebo mesiacoch s drsnými podmienkami.

Snežné riasy, miniatúrne výnimočné životné formy, nám ukazujú, že príroda je plná prekvapení. Nie sú to len obyčajné organizmy, ale sú to dokonalé príklady adaptácie a odolnosti v tvári výziev. Zatiaľ čo väčšina života na Zemi by mala v týchto podmienkach problémy, ľadovce a snehové polia sú pre ne prirodzené prostredie pre život. Keďže snehové ekosystémy sa globálne zmenšujú a miznú, je potrebné vyvinúť úsilie na plné pochopenie ich produktivity a biodiverzity. Jedinečné adaptácie snehových rias a ich potenciálne využitia z nich robia obzvlášť zaujímavú oblasť štúdia a výskumu. Určite toho majú mnoho čo ponúknuť a prispieť tak k získaniu nových poznatkov v rámci ekológie a taktiež rozvoju nových produktov a technológií v oblasti biotechnológie.

Pod'akovanie: Autori ďakujú za podporu projektom Agentúry na podporu výskumu a vývoja (APVV): APVV-21-0224. Taktiež ďakujú Vedeckej grantovej agentúre MŠV-VaŠ SR a SAV (VEGA) za podporu projektu: VEGA 1/0392/22.

Literatúra

- AITCHISON, C. W. (2001). The effect of snow cover on small animals. *Snow ecology: an interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, 229-265.
- ALLISON, I., HOCK, R., KING, M. A. & MACKINTOSH, A. N. (2018). Future Earth and cryosphere. In Beer, T., Jiaoping, L. & Alverson, K. [Eds.] *Global Change and Future Earth: The Geoscience Perspective*. Cambridge University Press, Cambridge,
- ALPALGA - Microalgues des Alpes [cit. 2023-06-23] Dostupné na <<https://alpalga.fr/>>
- BROWN, R., VIKHAMAR SCHULER, D., BULYGINA, O., DERKSEN, C., LUOJUS, K., MUDRYK, L., WANG, L., AND YANG, D. (2017). Arctic terrestrial snow cover. In: *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)*, Oslo, Norway, 25–64.
- BURDICK, A. (2017). Why the Last Snow on Earth May Be Red. [cit. 2023-06-23]. Dostupné na: <<https://www.newyorker.com/tech/annals-of-technology/why-the-last-snow-on-earth-may-be-red>>
- BUSH, E. (2017). Citizen scientists track effects of climate change in the Northwest. [cit. 2023-06-23] Dostupné na: <<https://www.seattletimes.com/life/outdoors/citizen-scientists-track-effects-of-climate-change-in-the-northwest/>>
- FYFE, J. C., DERKSEN, C., MUDRYK, L., FLATO, G. M., SANTER, B. D., SWART, N. C., ... & JIAO, Y. (2017). Large near-term projected snowpack loss over the western United States. *Nature communications*, 8(1). doi:10.1038/ncomms14996
- GANEY, G., LOSO, M., BURGESS, A. *et al.* (2017). The role of microbes in snowmelt and radiative forcing on an Alaskan icefield. *Nature Geosci* **10**, 754–759. doi.org/10.1038/ngeo3027
- GIAIMO, C. (2021). Glacier Blood? Watermelon Snow? Whatever It's Called, Snow Shouldn't Be So Red. [cit. 2023-06-23] Dostupné na: <<https://www.nytimes.com/2021/06/11/science/watermelon-snow-algae-glacier-blood.html>>
- GORTON, H. L., WILLIAMS, W. E., & VOGELMANN, T. C. (2001). The Light Environment and Cellular Optics of the Snow Alga *Chlamydomonas nivalis* (Bauer) Wille. *Photochemistry and Photobiology*, 73(6), 611–620.
- HÄGVAR, S. (2010). A review of Fennoscandian arthropods living on and in snow. *Eur. J. Entomol.* 107: 281–298, ISSN 1210-5759 (print), 1802-8829 Dostupné na: <<http://www.eje.cz/pdfs/eje/2010/03/01.pdf>>
- HEALY, S.M., KHAN, A.L. (2023). Albedo change from snow algae blooms can contribute substantially to snow melt in the North Cascades, USA. *Commun Earth Environ* **4**, 142. doi.org/10.1038/s43247-023-00768-8
- HOCK, R., G. RASUL, C. ADLER, B. CÁCERES, S. GRUBER, Y. HIRABAYASHI, M. JACKSON, A. KÄÄB, S. KANG, S. KUTUZOV, A. MILNER, U. MOLAU, S. MORIN, B. ORLOVE, & STELTZER, H. (2019). High Mountain Areas. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* In press. Dostupné na: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/06_SROCC_Ch02_FINAL.pdf>
- HOHAM, R. W., & DUVAL, B. (2001). Microbial Ecology of Snow and Freshwater Ice with Emphasis on Snow Algae. In H. G. Jones, J. W. Pomeroy, D. A. Walker, & R. W. Hoham (Eds.), *Snow ecology: An Interdisciplinary Examination of Snow-Covered Ecosystems* (pp. 168–228). Cambridge. Cambridge University Press.
- HOHAM, R. W., & LING, H. U. (2000). Snow algae: The Effects of Chemical and Physical Factors on Their Life Cycles and Populations. In J. Seckbach (Ed.), *Journey to diverse microbial worlds. Adaptation to exotic environments* (pp. 133–145). Dordrecht The Netherlands. Kluwer Academic Publishers. doi.org/10.1007/978-94-011-4269-4_10
- HOHAM, R. W., & REMIAS, D. (2020). Snow and glacial algae: a review 1. *Journal of Phycology*, 56(2), 264-282. doi.org/10.1111/jpy.12952
- LIVING SNOW PROJECT (). [cit. 2023-06-23]. Dostupné na: <<https://wp.wvu.edu/livingsnowproject/>>
- HULATT, C. J., BEREZC, O., EGELAND, E. S., WIJFFELS, R. H., & KIRON, V. (2017). Polar snow algae as a valuable source of lipids?. *Bioresource Technology*, 235, 338-347. doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.130
- HUOVINEN, P., RAMÍREZ, J., & GÓMEZ, I. (2018). Remote sensing of albedo-reducing snow algae and impurities

- in the Maritime Antarctica. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 507-517. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.015
- JACQUELINE PIOTAZ SWITZERLAND (). A Snow Algae Extract. [cit. 2023-06-23]. Dostupné na: <<https://jacquelinepiotaz.com/pages/snow-algae>>
- KHADILKAR, D. (2021). The secrets of the Alps' strange red snow. [cit. 2023-06-23]. Dostupné na <<https://www.bbc.com/future/article/20210729-why-snow-in-the-alps-is-turning-red>>
- KLEIN, J. (2016). Watermelon Snow: Not Edible but Important for Climate Change. [cit. 2023-06-23]. Dostupné na: <<https://www.nytimes.com/2016/06/23/science/watermelon-snow-global-warming.html>>
- KOL, E. (1928). Über die Kryovegetation der Hohen Tátra. I. *Folia Cryptogramica* (Szeged) 1(6): 613-622, 1 pl. [pl. XVII].
- KOMÁREK, J., & NEDBALOVÁ, L. (2007). Green cryosestic algae. In J. Seckbach (Ed.), *Algae and Cyanobacteria in Extreme Environments* (pp. 321–342). Springer.
- LEMOINE, Y., SCHOEFS, B. (2010). Secondary ketocarotenoid astaxanthin biosynthesis in algae: a multifunctional response to stress. *Photosynth Res* 106, 155–177. doi.org/10.1007/s11120-010-9583-3
- LETTERLY, A., KEY, J., & LIU, Y. (2018). Arctic climate: changes in sea ice extent outweigh changes in snow cover. *The Cryosphere*, 12(10), 3373-3382. doi.org/10.5194/tc-12-3373-2018
- LI, Y., SOMMERFELD, M., CHEN, F., & HU, Q. (2008). Consumption of oxygen by astaxanthin biosynthesis: a protective mechanism against oxidative stress in *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyceae). *Journal of plant physiology*, 165(17), 1783-1797. doi.org/10.1016/j.jplph.2007.12.007
- LOOP, P. (2022). Heading to the mountains? The Living Snow Project needs your help. [cit. 2023-06-23]. Dostupné na: <<https://www.dri.edu/heading-to-the-mountains-the-living-snow-project-needs-your-help/>>
- LUTZ, S., ANESIO, A. M., RAISWELL, R., EDWARDS, A., NEWTON, R. J., GILL, F., & BENNING, L. G. (2016). The biogeography of red snow microbiomes and their role in melting arctic glaciers. *Nature communications*, 7(1), 11968. doi.org/10.1038/ncomms11968
- MARÉCHAL, E., & NEDBALOVÁ, L. (2022). Ice and Snow Algae. *Frontiers in Plant Science*, 13. doi.org/10.3389/fpls.2022.868467
- MARTY, C., TILG, A.-M., AND JONAS, T. (2017). Recent evidence of large-scale receding snow water equivalents in the European Alps, *J. Hydrometeorol.*, 18, 4, 1021–1031. doi.org/10.1175/JHM-D-16-0188.1
- MEREDITH, M., SOMMERKORN, M., CASSOTTA, S., DERKSEN, C., EKAYKIN, A., HOLLOWED, A., KOFINAS, G., MACKINTOSH, A., MELBOURNE-THOMAS, J., MUELBERT, M.M.C., OTTERSEN, G., PRITCHARD, H. & SCHUUR, E.A.-G. (2019). Polar Regions. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. In press. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/07_SROCC_Ch03_FINAL.pdf>
- MUDRYK, L. R., KUSHNER, P. J., DERKSEN, C. & THACKERAY, C. (2017). Snowcover response to temperature in observational and climate model ensembles. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 919–926. doi:10.1002/2016GL071789
- MUDRYK, L., SANTOLARIA-OTÍN, M., KRINNER, G., MÉNÉGOZ, M., DERKSEN, C., BRUTEL-VUILMET, C., ... & ESSERY, R. (2020). Historical Northern Hemisphere snow cover trends and projected changes in the CMIP6 multi-model ensemble. *The Cryosphere*, 14(7), 2495-2514. doi.org/10.5194/tc-14-2495-2020
- NCC (Nutrition Cosmetics Creation SA) (2020). Snow algae powder to help rejuvenating skin. [cit. 2023-06-23]. Dostupné na: <<https://www.nccreation.ch/en/snow-algae-powder-repair-the-effects-of-time-and-to-increase-the-longevity-of-skin-cells-2/>>
- NEDBALOVÁ, L., & LUKAVSKÝ, J. (2007). Když sníh zčervená , aneb co (ne) víme o sněžných řasách. *Živa*, 3, 104–107.
- NEDBALOVÁ, L., PROCHÁZKOVÁ, L. (2019). Nedopsaný příběh červeného sněhu. *Vesmír* 98, 24, 2019/1, Téma: Led. [cit. 2023-06-23]. Dostupné na <<https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2019/cislo-1/nedopsany-pribeh-cerveneho-snehu.html>>
- NIKŠA (2014). Snow-Algae-Powder Snow Algae Powder The Secret of Red Snow In-Cosmetics. [cit. 2023-06-23]. Dostupné na: <<https://www.scribd.com/document/440174562/Snow-Algae-Powder-Snow-Algae-Powder-the-Secret-of-Red-Snow-in-cosmetics-Preview-February-2014#>>
- ONUMA, Y., TAKEUCHI, N., TANAKA, S., NAGATSUKA, N., NIWANO, M., AND AOKI, T. (2020). Physically based model of the contribution of red snow algal cells to temporal changes in albedo in northwest Greenland, *The Cryosphere*, 14, 2087–2101. doi.org/10.5194/tc-14-2087-2020
- PROCHÁZKOVÁ, L., LEYA, T., KŘÍŽKOVÁ, H. & NEDBALOVÁ, L. (2019). *Sanguina nivaloides* and *Sanguina aurantia* gen. et spp. nov. (Chlorophyta): the taxonomy, phylogeny, biogeography and ecology of two newly reco-

- gnised algae causing red and orange snow. *FEMS Microbiology Ecology* 95(6): fiz064. doi.org/10.1093/femsec/fiz064
- PROCHÁZKOVÁ, L., REMIAS, D., BILGER, W., KRÍŽKOVÁ, H., ŘEZANKA, T. & NEDBALOVÁ, L. (2020) Cysts of the Snow Alga *Chloromonas krienitzii* (Chlorophyceae) Show Increased Tolerance to Ultraviolet Radiation and Elevated Visible Light. *Front. Plant Sci.* 11:617250. doi: 10.3389/fpls.2020.617250
- PROCHÁZKOVÁ, L. (2020). *Exploring the diversity of snow algae using polyphasic approach*. Praha, 2020. Dizertační práce. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Katedra ekologie. Dostupné na: <<http://hdl.handle.net/20.500.11956/121037>>
- REMIAS, D. (2012). Cell structure and physiology of alpine snow and ice algae. In S. Lutz (Ed.), *Plants in alpine regions. Cell physiology of adaption and survival strategies*. (pp. 175–186). Wien.Springer-Verlag. doi.org/10.1007/978-3-7091-0136-0
- REMIAS, D., LÜTZ-MEINDL, U. & LÜTZ, C. (2005). Photosynthesis, pigments and ultrastructure of the alpine snow alga *Chlamydomonas nivalis*. *European Journal of Phycology*, 40(3), 259–268. doi.org/10.1080/09670260500202148
- REMIAS, D., PICHRTOVA, M., PANGRAZ, M., LÜTZ, C. & HOLZINGER, A. (2016). Ecophysiology, secondary pigments and ultrastructure of *Chlamydomonas* sp.(Chlorophyta) from the European Alps compared with *Chlamydomonas nivalis* forming red snow. *FEMS Microbiology Ecology*, 92(4). doi.org/10.1093/femsec/fiw030
- SECKBACH, J. (2007). Algae and cyanobacteria in extreme environments. Series Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology, Vol. 11, Springer, Dordrecht. 814 pp. ISBN: 978-1-4020-6111-0 doi.org/10.1016/j.ejop.2008.12.002
- SEGAWA, T., YONEZAWA, T., MATSUZAKI, R., MORI, H., AKIYOSHI, A., NAVARRO, F., ... & TAKEUCHI, N. (2023). Evolution of snow algae, from cosmopolitans to endemics, revealed by DNA analysis of ancient ice. *The ISME Journal*, 1-11. doi.org/10.1038/s41396-023-01359-3
- SIGEE, D. C. (2005). *Freshwater microbiology: Biodiversity and Dynamic Interactions of Microorganisms in the Aquatic Environment*. Chichester, West Sussex, England. John Wiley & Sons Ltd. 525 p.
- SCHMID, D., BELSER, E. & ZÜLLI, F. (2014). Rejuvenating effect of snow algae analysed. [cit. 2023-06-23]. Dostupné na: <<https://www.scribd.com/document/265447285/Rejuvenating-Effect-of-Snow-Algae-Analysed-Personal-Care-Magazine-Europe-04-2014-pdf>>
- SOLOVCHENKO, A.E. (2015). Recent breakthroughs in the biology of astaxanthin accumulation by microalgal cell. *Photosynth Res.* 2015 Sep;125(3):437-49. doi: 10.1007/s11120-015-0156-3.
- TAKEUCHI, N. (2001). The altitudinal distribution of snow algae on an Alaskan glacier (Gulkana Glacier in the Alaska Range). *Hydrol. Process.* 15, 3447 – 3459. doi: 10.1002/hyp.1040
- TERASHIMA, M., UMEZAWA, K., MORI, S., KOJIMA, H. & FUKUI, M. (2017). Microbial Community Analysis of Colored Snow from an Alpine Snowfield in Northern Japan Reveals the Prevalence of Betaproteobacteria with Snow Algae. *Front. Microbiol.* 8:1481. doi:10.3389/fmicb.2017.01481
- THOMAS, W. H. & DUVAL, B. (1995). Sierra Nevada, California, USA, snow algae: snow albedo changes, algal-bacterial interrelationships, and ultraviolet radiation effects. *Arctic and alpine research*, 27(4), 389-399.
- VERFAILLIE, D., LAFAYASSE, M., DÉQUÉ, M., ECKERT, N., LEJEUNE, Y. & MORIN, S. (2018). Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, *The Cryosphere*, 12, 1249–1271, doi.org/10.5194/tc-12-1249-2018
- WILDT, M. (2016). Why You Want Snow Algae in Your Face Cream. [cit. 2023-06-23]. Dostupné na <<https://longevitylive.com/beauty/want-snow-algae-face-cream/>>
- YAKIMOVICH, K.M., ENGSTROM, C.B. & QUARMBY, L.M. (2020). Alpine Snow Algae Microbiome Diversity in the Coast Range of British Columbia. *Front. Microbiol.* 11:1721. doi: 10.3389/fmicb.2020.01721
- YOSHIMURA, Y., KOHSHIMA, S., & OHTANI, S. (1997). A community of snow algae on a Himalayan glacier: change of algal biomass and community structure with altitude. *Arctic and Alpine Research*, 29(1), 126-137.
- ZHANG, R., WANG, H., FU, Q., RASCH, P. & WANG, X. (2019). Unraveling driving forces explaining significant reduction in satellite-inferred Arctic surface albedo since the 1980s, *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 116 (48), 23947–23953. doi.org/10.1073/pnas.1915258116
- YING, Z. (2019) Life on Plateau: Don't eat the algae that smell like watermelon [cit. 2023-06-23]. dostupné na <<https://news.cgtn.com/news/3d3d514e3341444d32457a6333566d54/index.html>>
- ZHENG, Y., XUE, C., CHEN, H., HE, C., & WANG, Q. (2020). Low-temperature adaptation of the snow alga *Chlamydomonas nivalis* is associated with the photosynthetic system regulatory process. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1233. doi.org/10.3389/fmicb.2020.01233

Kontaktné údaje autora:

Ing. Miriam Hanzelová, PhD.
Katedra prírodného prostredia
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen
hanzelova@tuzvo.sk

Snow Algae and their specific snowfield ecosystem**Summary**

With ongoing climate warming, significant changes are occurring in snowpacks around the world, which cover about a third of the Earth's surface and play a key role in cooling the Earth's climate system. Snow cover also provides an important habitat for microscopic organisms that are able to survive in extreme conditions. This article provides information on the diversity of organisms living in cold conditions, including snow algae and microorganisms, which are perfect examples of adaptation and resistance to extreme conditions. With the global reduction and disappearance of snow ecosystems, efforts to comprehensively understand their productivity, biodiversity and specific ecosystem functioning become important and urgent. At the same time, thanks to their unique adaptations, they have the potential to be used for the development of new products and biotechnologies. Snow algae show us that even in the most unlikely places, life can not only exist, but also thrive and provide inspiration for new scientific discoveries.

KLASIFIKÁCIA DREVINOVÉHO ZLOŽENIA Z HYPERSPEKTRÁLNYCH A LIDAR ÚDAJOV POMOCOU METÓD STROJOVÉHO UČENIA

Roman SITKO – Matúš PIVOVAR – Šimon SALOŇ – Roman KADLEČÍK – Miroslav SIVÁK – František CHUDÝ – Ľubomír SCHEER – Daniel TUNÁK – Milan MISTRÍK – Zuzana PAROBEKOVÁ – Ivana SARVAŠOVÁ

SITKO R., PIVOVAR M., SALOŇ Š., KADLEČÍK R., SIVÁK M., CHUDÝ F., SCHEER, L. TUNÁK D., MISTRÍK M., PAROBEKOVÁ Z., SARVAŠOVÁ I.: Classification of tree species from hyperspectral and LiDAR data using machine learning methods, Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

ABSTRACT

This study aims to compare the accuracy of 2 parametric (Linear Support Vector Machine, Naive Bayes) and 4 non-parametric (Radial Basis Function Support Vector Machine, K-Neighbours, Random Forest, Extra Trees) machine learning methods for classifying tree species at the tree level in specific conditions near electrical power lines, where the edge effect is pronounced. Two parametric and four non-parametric machine learning methods were compared for the classification of 14 tree species and 2 surfaces. Among these methods, the Linear Support Vector Machine achieved the highest classification accuracy. The comparison was extended by two more approaches. The first one was aimed at exploring an alternative use of the LSVM classifier and with this procedure, exceptionally high classification accuracy was achieved with a Kappa index of 0.98 for classification of tree species. The second approach involved incorporating characteristics of shadows derived from LiDAR data into the classification procedure. However, the inclusion of additional data did not contribute to increasing the accuracy of the classification. The combination of hyperspectral data with very high spatial resolution, LiDAR records, and machine learning methods offers a promising approach to achieving high accuracy in tree species classification at the tree level.

Key words: tree species, classification, machine learning, hyperspectral images, LiDAR

1. Úvod a problematika

Explicitná priestorová informácia o druhovom zložení lesa poskytuje cenné informácie pre ochranu prírody, obhospodarovateľov lesa, ale aj technické odvetvia, ako napríklad energetika, ktorá prichádza do interakcie s lesnou krajinou prostredníctvom svojich vonkajších prenosových sústav. Tieto informácie sú často požadované na

rozsiahlych územiach a jedným z efektívnych zdrojov týchto informácií je klasifikácia optických obrazových záznamov získaných prostriedkami diaľkového prieskumu. Nedávny vývoj v oblasti multispektrálnych a hyperspektrálnych snímacích zariadení a využívanie umelej inteligencie v klasifikačných nástrojoch uľahčil a zlepšil správnosť detekcie druhov drevín.

Výhodou hyperspektrálnych snímok v porovnaní s multispektrálnymi snímkami je, že majú niekoľkonásobne väčší počet kanálov, spravidla desiatky až stovky kanálov. Zaznamenávajú elektromagnetické žiarenie v úzkych pásmach vlnových dĺžok, radovo niekoľko jednotiek až desiatok nanometrov, pričom záznam spravidla zahŕňa celú viditeľnú časť a vybratú oblasť infračervenej časti elektromagnetického spektra. Historicky jeden z prvých senzorov tohto typu, AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) zachytáva žiarenie v rozsahu od 400 nm do 2400 nm, je zaznamenané v 224 kanáloch, ktorých šírka je do 10 nm. Takáto vysoká spektrálna rozlišovacia schopnosť umožňuje rozlišovať jemné spektrálne rozdiely, čo nachádza využitie aj pri klasifikácii drevinového zloženia na úrovni jednotlivých druhov. Medzi prvé štúdie detekcie druhov stromov pomocou hyperspektrálnych obrazových záznamov, ktoré boli vyhotovené senzorom AVIRIS patrí práca (MARTIN, 1998). Ďalšie príbuzné aplikácie hyperspektrálnych snímok využívajúce výhody ich vysokého spektrálneho rozlíšenia sú napr. odhad obsahu chlorofilu vo vegetácii (ZARCO-TEJADA et al., 2004), odhad indexu listovej plochy LAI (LEE et al., 2004), hodnotenie zdravotného stavu (MALENOVSKY, 2002) a ďalšie.

Jednou z nevýhod hyperspektrálneho snímania v jeho počiatkoch bola nižšia priestorová rozlišovacia schopnosť záznamov, čo súvisí s dominanciou využívania skenerov typu push broom, ktoré zachytávajú celý snímaný pás naraz a posun snímača zabezpečuje jeho nosič. Prvé klasifikácie sa preto orientovali na zisťovanie drevinového zloženia na úrovni porastu (MARTIN, 1998). Veľký nárast aplikácií klasifikácie drevinového zloženia z hyperspektrálnych údajov nastal po roku 2010, čo súvisí so zvýšenou dostupnosťou uvedeného druhu záznamov. Vývoj samotných skenerov a ich nosičov priniesol zlepšenie aj v zvýšení priestorovej rozlišovacej schopnosti. Častým je využívanie leteckých nosičov s nízkou výškou letu a v poslednom období aj bezpilotných leteckých systémov UAV (YING et al., 2023, ZHONG et al., 2022), čo v súčasnosti umožňuje zisťovať drevinové zloženie na úrovni jednotlivých stromov. LASSALLE et al. (2022) rieši problém dosiahnutia požadovaného priestorového rozlíšenia hyperspektrálnych údajov použitím metódy panchromatického zaostrenia. Otázkou vplyvu priestorovej rozlišovacej schopnosti, na správnosť klasifikácie sa zaoberali viaceré práce. DALPONTE (2013) porovnával rozlíšenie 0,4 a 1,5 m. Klasifikované boli 4 druhy drevín, pričom pri rozlíšení 0,4 m (približne 10 % priemernej veľkosti koruny) bola dosiahnutá vyššia správnosť klasifikácie až o vyše 20%. PEÑA et al. (2013) porovnaním viacerých úrovní rozlíšenia v rozmedzí 0,3 – 2,4 m zistil, že najvhodnejšie z hľadiska správnosti sa ukázalo najvyššie rozlíšenie 0,3 m (približne 5 % priemernej veľkosti koruny). S uvedenou líniou nekorešpondujú výsledky

GHOST et al. (2014), kde boli porovnávané úrovne rozlíšenia 4, 8 a 30 m, a ako mierne vhodnejšie sa ukázalo 8 m rozlíšenie (približne 120 % priemernej veľkosti koruny) v porovnaní s najvyšším 4 m rozlíšením. FASSNACHTA (2016) konštatuje, že požadovaná veľkosť priestorového rozlíšenia závisí aj od výberu typu klasifikácie, či ide o pixelovo-orientovanú, alebo objektovo-orientovanú klasifikáciu. Na základe výsledkov iných autorov, ktorí sa zaoberali vplyvom priestorového rozlíšenia na variabilitu obrazových údajov, FASSNACHTA (2016) zovšeobecňuje, že za predpokladu relatívne hustého porastu, spoľahlivosť výsledku klasifikácie narastá, keď veľkosť pixelu dosiahne približne úroveň jednej koruny, čo platí pre klasifikácie na úrovni pixelov, zatiaľ čo prístupy založené na objektoch budú pravdepodobne vo všeobecnosti ťažiť z vyšších priestorových rozlíšení.

Okrem priestorového rozlíšenia, výberu objektového, resp. pixelového prístupu ku klasifikácii má na výsledok klasifikácie významný vplyv aj výber samotného klasifikátora. S ohľadom na veľký počet vstupných premenných, ktoré predstavujú jednotlivé kanály hyperspektrálnych záznamov a s tým súvisiacu požiadavku na veľký počet tréningových obrazových prvkov pri použití parametrických metód (napr. metóda maximálnej pravdepodobnosti), sa pre klasifikáciu používajú predovšetkým neparametrické klasifikátory. Tiež niektoré štúdie (PANT et al., 2013) využívajúce zmiešané súbory vstupných premenných (spektrálne, texturálne, geometrické, indexy) uprednostňujú použitie neparametrických metód strojového učenia, ako je metóda Random Forest (RF) alebo Support Vector Machine (SVM). BALLANTI et al. (2016) dokumentuje možnosť použitia naposledy uvedených metód aj v postupe objektovo-orientovanej klasifikácie. XI et al. (2021) konštatuje zlepšenie výsledkov klasifikácie s použitím neparametrických metód strojového učenia aj pri klasifikácii drevinového zloženia z časového radu multispektrálnych údajov Sentinel-2. SOTHE et al. (2021) porovnáva metódy strojového učenia (machine learning) a hlbokého učenia (deep learning) na príklade rozlíšenia 16 druhov drevín pomocou hyperspektrálnych údajov a fotogrametrického mračna bodov (PPC) v podmienkach hustého tropického lesa. Výsledky porovnania ukázali, že pokročilé metódy konvulčných neurónových sietí (CNN) umožnili dosiahnuť vyššiu správnosť klasifikácie o 22-26% v porovnaní s klasickými neparametrickými metódami strojového učenia RF a SVM pri použití výhradne hyperspektrálnych údajov. Pri doplnení priestorových charakteristík odvodených z PPC a normalizovaného výškového modelu porastu (CHM), metódy strojového učenia dosiahli porovnateľné výsledky s CNN metódou hlbokého učenia. LA ROSA et al. (2021) navrhol architektúru CNN vhodnú na klasifikáciu druhov drevín z hyperspektrálnych údajov pri malom množstve tréningových množín. Priemerná užívateľská a producentská správnosť sa pohybovala okolo 89%. Výhodou metód hlbokého učenia je, že tieto metódy dokážu spektrálne aj priestorové charakteristiky extrahovať pri tvorbe klasifikačného modelu priamo z originálnych hyperspektrálnych údajov. Výhodou metód strojového učenia je to, že sú rýchlejšie, priestorové charakteristiky je ale potrebné odvodiť samostatne MÄYRÄ et al. (2021).

Prehľad najpoužívanejších metód strojového a hlbokého učenia použitých na klasifikáciu druhov drevín prezentuje práca YEL, TUNC GORMUS (2023).

Pre účel zahrnutia priestorových charakteristík sa v súčasnosti najčastejšie stretávame s kombinovaným využívaním hyperspektrálnych a LiDAR záznamov. ZHANG et al. (2022) pozoroval zvýšenie správnosti klasifikácie pri použití charakteristík odvodených z LiDARu na 89%, z pôvodnej správnosti 86%, ktorá bola dosiahnutá len pomocou hyperspektrálnych údajov. Typickým výstupom pri spracovaní LiDAR údajov v lesníckych aplikáciách je normalizovaný digitálny model povrchu CHM. GHOSH et al. (2014) uvádza, že informácie o výške korunovej vrstvy často nedokázali výrazne zlepšiť výsledky založené len na hyperspektrálnych údajoch. Zistilo sa však, že tieto informácie zlepšili správnosť klasifikácie menších stromov, čo môže súvisieť so závislosťou spektrálnych hodnôt od veľkosti stromu a jeho susedov (NAIDOO et al., 2012). Ďalšími charakteristikami získanými z LiDAR údajov použitými pri klasifikácii drevinového zloženia sú výškové charakteristiky mračna bodov (DALPONTE et al. 2012), metriky založené na separácii jednotlivých korún (ALONZO et al. 2014), typ odrazu a intenzita LiDAR signálu ZHONG et al. (2022) a tiež údaje z tzv. Waveform LiDAR systému (FASSNACHT et al. 2016). KORPELA et al. (2014) kombinoval optické a LiDAR údaje komplexnejším spôsobom, keď využil digitálny model povrchu korún (DSM) vytvorený z LiDAR na modelovanie úrovne osvetlenia koruny, čo umožnilo eliminovať nežiaduce anizotropné efekty medzi obrazovými prvkami v rámci jednej koruny, resp. jedného druhu dreviny. Nakoniec je dôležité tiež uviesť, že LiDAR je v súčasnosti kľúčovým zdrojom údajov pre aplikácie zamerané na delináciu korunových projekcií a tým aj na objektovo-orientované klasifikačné postupy (JAKUBOWSKI et al. 2013).

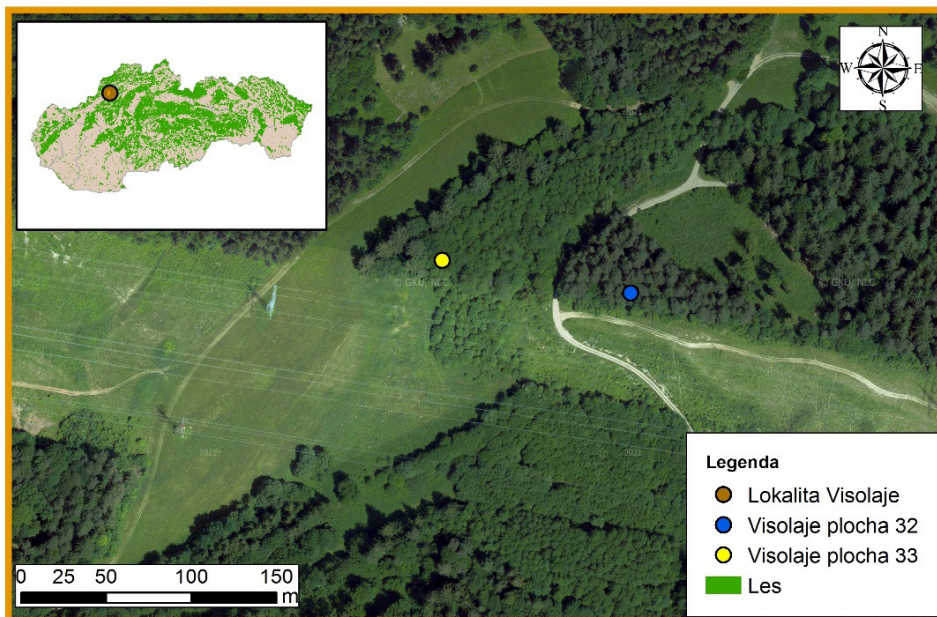
Cieľom práce je porovnať správnosť viacerých parametrických a neparametrických metód strojového učenia pre účely klasifikácie druhov drevín na úrovni jednotlivých stromov rastúcich v špecifických podmienkach v bezprostrednom okolí elektrických vedení, kde sa výrazne prejavuje okrajový efekt. Zameranie na porasty v okolí elektrických vedení vyplýva z cieľov projektu HYSPEED (Výskum aplikácie prostriedkov umelej inteligencie pri analýzach a klasifikácií dát hyperspektrálneho snímkovania), ktorý sa orientuje práve na lesné porasty susediace s elektrickými vedeniami a dreviny rastúce pod týmito líniovými stavbami.

2. Materiál a metódy

2.1 Zaujímavé územie

Zaujímavým územím, v ktorom bola realizovaná kontrolovaná klasifikácia druhu drevín z hyperspektrálnych snímok je lokalita v blízkosti obce Visolaje. Lokalitou prechádza elektrické vedenie V495 a v jeho bezprostrednej blízkosti boli založené

výskumné plochy s označením Visolaje 32 a Visolaje 33 (Obrázok 1). Ide o lesné porasty, ktorých porastový okraj tvorí hranicu s ochranným pásom elektrického vedenia. Plochy sú ohraničené polygónom s výmerou 0,20 a 0,32 ha.



Obrázok 1: Lokalita Visolaje a jej poloha v rámci Slovenska
Figure 1: The location of Visolaje and its location within Slovakia

Na ploche Visolaje 32 sa nachádza 72 stromov a zastúpených je tu 8 druhov drevín. Ide o 2-etážový porast, pričom v hornej etáži sú zastúpené dreviny borovica lesná (*Pinus sylvestris* L.), smrek obyčajný (*Picea abies* L.), dub letný (*Quercus robur* L.), a v spodnej etáži je to buk lesný (*Fagus sylvestris* L.), hrab obyčajný (*Carpinus betulus* L.), javor poľný (*Acer campestre* L.), lieska obyčajná (*Corylus avellana* L.) a lipa malolistá (*Tilia cordata* Mill.). Na ploche Visolaje 33 je zastúpených 5 druhov drevín, dub letný (*Quercus robur* L.), hrab obyčajný (*Carpinus betulus* L.), jelša lepkavá (*Alnus glutinosa* Mill.), javor poľný (*Acer campestre* L.) a smrek obyčajný (*Picea abies* L.) s celkovým počtom 43 stromov a tieto sa nachádzajú v jednej etáži.

2.1 Použitý materiál

Na klasifikáciu druhov drevín zastúpených na ploche boli použité hyperspektrálne snímky a ako doplnkový zdroj údajov aj LiDAR záznamy. Záznamy boli vyhotovené 15. 6. 2023 hyperspektrálnymi kamerami Hypspec VNIR-1800 a SWIR-384

a laserovým skenerom Riegl VP-1 nesenými na palube vrtuľníka. Zalietavanie realizoval Výskumný ústav jadrovej energetiky a.s., ktorý je aj vlastníkom tohto systému pre diaľkový prieskum a je partnerom projektu, v rámci ktorého sa tento výskum realizoval. Kamera VNIR-1800 zaznamenáva elektromagnetické žiarenie vo viditeľnej a blízkej infračervenej časti, v rozsahu 400-1000 nm, kamera SWIR-384 v rozsahu 930-2500 nm, teda zachytáva krátkovlnné infračervené žiarenie. Celé zachytené elektromagnetické spektrum je rozdelené do 474 kanálov. Priestorová rozlišovacia schopnosť hyperspektrálnych záznamov pri výške letu okolo 100 m má veľkosť 0,18 m. Obidve plochy boli v rámci náletového plánu začlenené do jedného pásu obrazového záznamu. Snímky boli predspracované metódami geometrickej a rádiometrickej korekcie, takže predmetom klasifikácie boli ortorektifikované hyperspektrálne kanály snímky transformované do súradnicového systému S-JTSK s hodnotami odrazivosti povrchu.

Na plochách Visolaje 32 a 33 bola technológiou mobilného zberu údajov FieldMap (Černý et al. 2006) urobená detailná inventarizácia stromov nachádzajúcich sa na ploche. Z celého zisťovaného spektra veličín boli pre účely prípravy referenčných údajov využité údaje o polohe stredy koruny, výšky a hrúbky stromu a druhu dreviny. Pre dosiahnutie čo najväčšej druhovej bohatosti drevín, boli v okolí plochy mapované aj ďalšie stromy, ktoré z hľadiska druhu dreviny, neboli zastúpené na plochách. Ide o dreviny breza previsnutá (*Betula pendula* L.), vrba rakytová (*Salix caprea* L.) a vrba popolavá (*Salix cinerea* L.), ktoré boli tiež zahrnuté do samostatných klasifikačných tried. Celkový zoznam druhov drevín, resp. povrchov bez stromovej vegetácie zahrnutých do klasifikácie sumarizuje Tabuľka 1.

Tabuľka 1: Zoznam klasifikovaných druhov drevín a rozsah referenčných dát použitých na klasifikáciu

Table 1: List of classified tree species and sample size of reference data used for classification

	Druh dreviny	Latinský názov	Skratka ROI*	Trénovacia vzorka [px]	Validačná vzorka [px]
Listnaté	breza previsnutá	Betula pendula	BR	87	55
	buk lesný	Fagus sylvestris	BK	18	26
	dub letný	Quercus robur	DBL	1409	1305
	hrab obyčajný	Carpinus betulus	HB	914	823
	javor poľný	Acer campestre	JVP	753	339
	jelša lepkavá	Alnus glutinosa	JLL	3989	3506
	lieska obyčajná	Corylus avellana	lieska	290	357
	lipa malolistá	Tilia cordata	LPM	436	494
Ihličnaté	vŕba popolavá	Salix cinerea	VRP	179	200
	vŕba rakytová	Salix caprea	VRR	162	197
	borovica lesná	Pinus sylvestris	BO	2547	2252
Kry	smrek obyčajný	Picea abies	SM	5398	4488
	nižšia krovinná etáž	-	KR1	1431	1796
Iné	vyššia krovinná etáž	-	KR2	2744	2965
	lesná cesta	-	Cesta	2711	2381
	lúky, pasienky	-	Lúka	12380	10103

*ROI – regióny záujmu (Region of Interests)

Okrem stromovej vegetácie sme ako samostatnú triedu vyčlenili nižšiu krovinnú etáž a vyššiu krovinnú etáž, ktorá sa nachádzala predovšetkým na okraji porastovej steny, a tiež sme identifikovali ostatné nelesné povrchy, ako sú lesná cesta a lúka a pasienky. V Tabuľke 1 sú tiež uvedené skratky pre klasifikačné triedy a počet obrazových prvkov (pixelov) použitých v rámci trénovacej, resp. validačnej vzorky. Z celého rozsahu referenčných údajov získaných v rámci pozemnej kampane a vektorizáciou regiónov záujmu (ROI) na obrazovke, bolo približne 55% obrazových prvkov použitých na tréning klasifikátorov a 45% pixelov bolo použitých pre účely validácie výsledku klasifikácie.

2.2 Modelovanie zatienu obrazových prvkov s použitím LiDAR údajov

Za účelom podchytenia anisotropie odrazivosti obrazových prvkov v rámci tej istej klasifikačnej triedy spôsobenej vlastným, alebo vrhnutým tieňom, boli tieto javy modelované s použitím LiDAR údajov. Hustota laserového skenovania sa pohybovala okolo 100 bodov/m². Z mračna bodov bol v prostredí CloudCompare (<https://www.cloudcompare.org>) vytvorený rastrový digitálny model povrchu (DSM) s priestorovým rozlíšením zhodujúcim sa s rozlíšením hyperspektrálnych obrazových záznamov (0,18 m). Okrem toho, pre validovanie modelu vrhnutého tieňa bol extrahovaný obrazový súbor kanálu s vlnovou dĺžkou 620 nm. Tento bol použitý operátorom na overenie správnosti, resp. úpravu parametrov modelovacieho postupu v prípade nevyhovujúceho výsledného obrazu vrhnutého tieňa. Dôležitým údajom pre aplikáciu použitých modelov je presný dátum a čas vyhotovenia LiDAR záznamov, resp. hyperspektrálnych snímok. Tieto údaje boli dosadené do modulu Grass GIS v prostredí QGIS (r.sun.hours) (<https://landscapearchaeology.org/qgis-terrain-shading/>) a následne bol odvodený horizontálny a zenitový uhol potrebný pre tvorbu modelu vrhnutého a vlastného tieňa.

Vrhnutý tieň spôsobuje zatienu jedného objektu druhým objektom, čo modifikuje hodnoty odrazivosti tienených objektov. Pre tvorbu modelu vrhnutého tieňa bol použitý algoritmus modulu „Shadow depth“, ktorý je súčasťou zásuvného modulu „Terrain Shading“ aktivovaného v prostredí QGIS. Aplikáciou modelu na DSM sme získali výsledný obraz vrhnutého tieňa, ktorý bol porovnaný s validačnou snímkou. V prípade potreby bol korigovaný zenitový uhol a model opakovane aplikovaný až kým sa výsledok modelu nezhodoval s validačnou vrstvou.

Vlastný tieň je výsledok interakcie expozície a sklonu povrchu (korún stromov) so zdrojom osvetlenia, ktorým je Slnko. Tento druh zatienu obrazových prvkov vyhodnocujeme pomocou modelovania dopadu slnečného žiarenia na povrch korún. Výsledkom je rastrový súbor obsahujúci hodnoty kosínusu uhla dopadu slnečného žiarenia na povrch.

Oba výsledné súbory modelu tieňov boli začlenené do porovnávaných klasifikačných postupov, formou doplnujúcich rastrových vrstiev ku optickým hyperspektrálnym kanálom snímky. Rozsah hodnôt v týchto súboroch sme normalizovali na priemerný rozsah hodnôt odrazivosti povrchu v kanáloch hyperspektrálnych snímok.

2.3 Klasifikácia drevinového zloženia

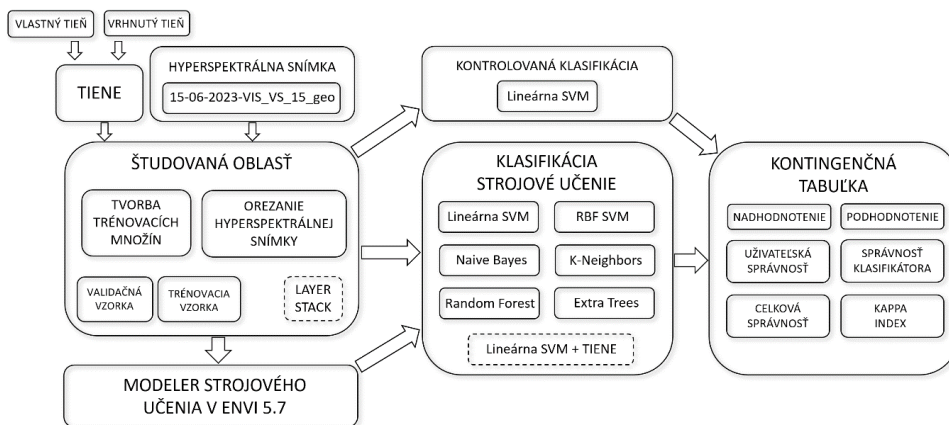
S ohľadom na povahu použitých obrazových záznamov, obsah a rozsah referenčných obrazových prvkov, sme za najvhodnejšie pre klasifikáciu druhov drevín považovali použitie parametrických a neparametrických metód strojového učenia. Použili sme na to nástroje a pracovné prostredie na digitálne spracovanie obrazu so zvlášť

rozvinutými funkcionalitami na spracovanie hyperspektrálnych údajov, softvér ENVI 5.7 (RESEARCH SYSTEM, INC., 2023). Porovnávané boli nasledovné metódy:

- Linear Support Vector Machine (LSVM) – parametrická metóda
- Radial Basis Function Support Vector Machine (RBF_SVM) – neparametrická metóda
- Naive Bayes (NB) – parametrická metóda
- K-Neighbours (KN) – neparametrická metóda
- Random Forest (RF) – neparametrická metóda
- Extra Trees (ET) – neparametrická metóda

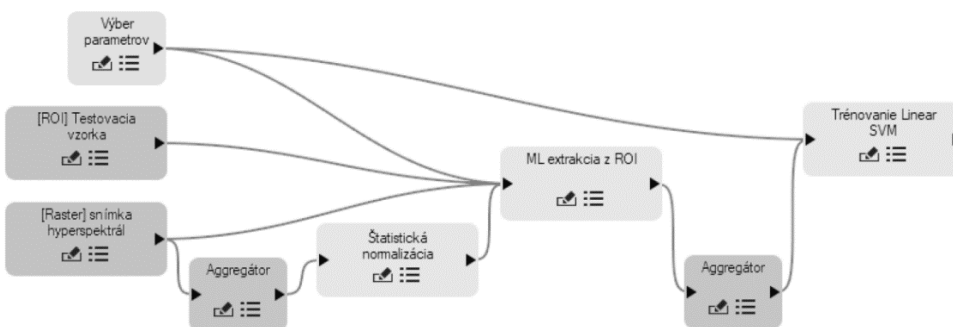
Dizajn štúdie popisuje schéma na Obrázku 2 a môžeme ho rozdeliť do 4 na seba naväzujúcich fáz: i) Predpríprava snímok a tvorba regiónov záujmu (ROI), ii) Konštrukcia modelu strojového učenia, iii) Realizácia riadenej klasifikácie snímky a iv) Vyhodnotenie a interpretácia výsledkov.

V prvej fáze sme orezali dodaný pás hyperspektrálnej snímky a vytvorené rastre tieňov na veľkosť územia, ktoré zachytávalo výskumné plochy Plot 32 a 33 a ich najbližšie okolie. Účelom bolo zmenšiť množstvo spracovávaných údajov len na územie s dostupnými referenčnými údajmi získanými počas pozemnej kampane. Ďalej sme na podklade rôznych typov farebných kompozícií hyperspektrálnej snímky vytvorili ROI pre všetky klasifikačné triedy (Tabuľka 1). Vytvorené ROI sme rozdelili na 2 podskupiny, trénovacia vzorka (55%) a validačná vzorka (45%). Zo 474 kanálov hyperspektrálnej snímky a 2 doplnujúcich súborov tieňov, sme vo formáte aplikácie ENVI vytvorili súbor skupiny obrazov tzv. Layer stack. Prerušovaná čiara na Obrázku 2 identifikuje druh klasifikačného algoritmu aplikovaného na tento rozšírený súbor údajov.



Obrázok 2: Postup spracovania hyperspektrálnych údajov
Figure 2: Workflow of hyperspectral data processing

V druhej fáze spracovania sme vytvorili model v prostredí ENVI Modeler. Vytvorený model je znázornený na Obrázku 3 a popisuje chronologickú následnosť importovania, spracovania a exportovania výstupných súborov do cieľového adresára. Ukážka na Obrázku 3 sa týka použitia klasifikátora Linear Support Vector Machine (SVM), ale veľmi podobná architektúra modelu bola použitá aj pri ostatných klasifikátoroch. Takýto postup sa v prostredí ENVI viaže na použitie nástroja Machine Learning, ktorý zároveň umožňuje vytvorený klasifikačný model uložiť a následne použiť aj na inú snímku z iného územia, a to aj bez potreby získania referenčných údajov z tohto územia. Nevýhodou je, že pri použití nástroja Machine Learning nie je možné meniť nastavenia klasifikačných algoritmov (používajú sa prednastavené parametre). Preto sme metódu Linear SVM v tretej fáze postupu aplikovali aj samostatne, mimo nástroja Machine Learning, kde už bolo možné nastavenia klasifikátora alternovať. Nevýhodou tohto postupu však bola niekoľkonásobne väčšia spotreba času na samotný proces klasifikácie (cca. 10 hod., pri konfigurácii PC: RAM 34 GB, procesor Intel Core i7-12700K, GPU grafická karta NVIDIA GeForce RTX 3080)



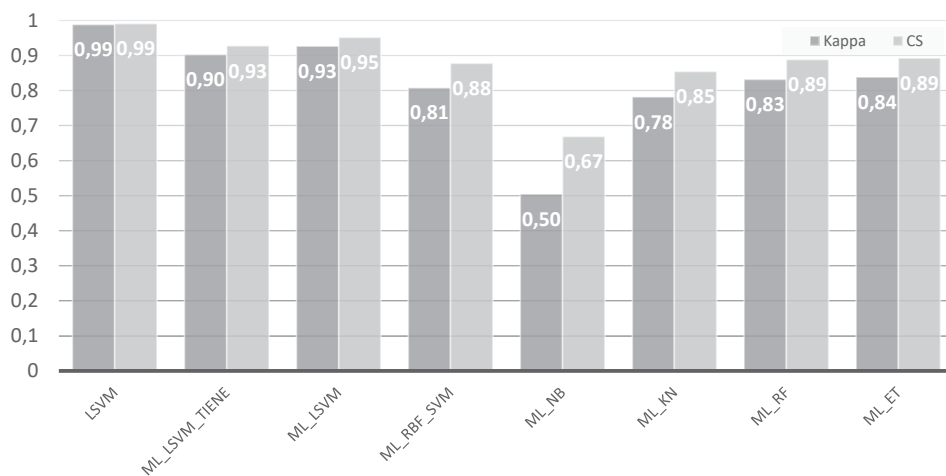
Obrázok 3: Schéma použitého modelu zostrojeného v ENVI Modeler
Figure 3: Diagram of the used model built in ENVI Modeler

V tretej fáze sme postupne aplikovali jednotlivé neparametrické metódy strojového učenia (ML) na obrazové údaje hyperspektrálnej snímky, resp. rozšírený „Layer stack“. V prípade „Layer stack“ sme použili len metódu Linear SVM v rámci modulu Machine Learning (ďalej označovaná ako ML_LSVM_TIENE).

V poslednej fáze sme vytvorili sadu kontingenčných tabuliek pre každý klasifikačný algoritmus. Pre zachovanie nezávislosti všetkých štatistických ukazovateľov sme na výsledok klasifikácie aplikovali validačnú vzorku ROI, ktoré neboli použité pri tréningu modelov. Na základe týchto kontingenčných tabuliek sme vypočítali celkovú správnosť (CS), Kappa index (Kappa), ďalej hodnotu chyby z nadhodnotenia (C) a podhodnotenia (O) klasifikácie a užívateľskú správnosť (U) a producentská správnosť (P).

3. Výsledky

Pre porovnanie kvality klasifikácii sme pre každý klasifikátor vytvorili kontingenčnú tabuľku s popisom celkovej správnosti klasifikácie a indexom Kappa, ktorý eliminuje správnosť, ktorú by sme dosiahli náhodným klasifikátorom. Pri zohľadnení interpretácie výsledkov je vhodné brať na zreteľ rozdiel v počte obrazových prvkov (zastúpení) jednotlivých klasifikačných tried, napr. BK 18 – 26 pixelov verus JLL 3 506 - 3 989 pixelov a najviac zastúpené boli referenčné prvky pre triedu lúky, pasienky 10103-12380 (Tabuľka 1).



Obrázok 4: Celková správnosť (CS) a Kappa index (Kappa) použitých klasifikačných algoritmov (Linear Support Vector Machine (LSVM), RBF Support Vector Machine (RBF_SVM), Naive Bayes (NB), K-Neighbours (KN), Random Forest (RF), Extra Trees (ET), ML = vytvorenie modelu v rámci nástroja Machine Learning)

Figure 4: Overall accuracy (CS) and Kappa index (Kappa) of all classification algorithms (Linear Support Vector Machine (LSVM), RBF Support Vector Machine (RBF_SVM), Naive Bayes (NB), K-Neighbors (KN), Random Forest (RF), Extra Trees (ET), ML = creating a model within the Machine Learning tool)

Na Obrázku 4 je znázornený celkový výsledok pre všetky klasifikátory, ktoré sme aplikovali na hyperspektrálnu snímku a na „Layer stack“ - kanály hyperspektrálnej snímky doplnené o rastre vlastného a vrhnutého tieňa. Celkovú správnosť (CS) v grafe uvádzame ako podiel správne klasifikovaných obrazových prvkov k celkovému počtu prvkov patriacich jednotlivým triedam v intervale 0-1. Podobne aj Kappa index nadobúda hodnoty od 0 (0% správnosť klasifikácie) po 1 (100% správnosť klasifikácie). Vidíme, že najlepší výsledok dosiahli postupy využívajúce klasifikátor Linear SVM (Kappa = 0,90 – 0,99). Vysokými hodnotami Kappa (nad 0,8) boli ohodnotené výsledky ešte pre ďalšie 3

metódy Random Forest (Kappa = 0,83) a Extra Trees (Kappa = 0,84) a RBF SVM (Kappa = 0,81). Ostatné metódy dosiahli nižšie hodnoty Kappa ako 0,8, najnižšia správnosť bola dosiahnutá pri metóde Naive Bayes (Kappa = 0,50).

Zaujímavé je porovnanie metód ML LSVM a ML LSVM TIENE, na ktorom vidíme, že doplnenie rastrových vrstiev tieňov nepomohlo zvýšiť správnosť klasifikácie, naopak hodnota Kappa klesla o 0,03. Pri porovnaní najlepšej klasifikácie vytvorenej pomocou Machine Learning (ML) nástroja (ML LSVM) s klasifikáciou, kde bol použitý ten istý klasifikátor, ale mimo prostredie nástroja ML (LSVM), pozorujeme vyššiu správnosť (Kappa vyššia o 0,06) pri LSVM klasifikátore. Rozdiel bol tiež v počte zaradených obrazových prvkov do niektorej z tried, resp. počte neklasifikovaných pixelov. Pri postupe s použitím klasifikátora ML LSVM bol vyklasifikovaný približne o 7 % väčší počet obrazových prvkov, ako pri klasifikátore LSVM. Rozdiel medzi klasifikátormi bol ten, že LSVM mal na rozdiel od LM SVM klasifikátora možnosť nastavenia parametra „Classification Probability Threshold“, a tento sme nastavili podľa odporúčaní ENVI Guide na hodnotu 0.9. Alternovanie nastavení pri jednotlivých klasifikátoroch aplikovaných v rámci ML bolo obmedzené len na nastavenie parametra „Balance classes“ využívanom v prípade nerovnomerného zastúpenia jednotlivých tried.

V ďalšej časti podrobnejšie analyzujeme výsledky dvoch klasifikácií, ktoré spomedzi všetkých dosiahli najvyššie ukazovatele dosiahnutej správnosti, metódu Linear Support Vector Machine aplikovanú mimo nástroj ML (LSVM) a v rámci ML nástroja (ML LSVM).

Celková správnosť klasifikácie LSVM je 99.07% a Kappa index má hodnotu 0.988. Tabuľka 2 zobrazuje výsledok porovnania klasifikácie hyperspektrálnej snímky s referenčnými údajmi validačnej vzorky samostatne pre jednotlivé klasifikačné triedy. Z výsledkov môžeme vidieť problém klasifikátora vzájomne rozlíšiť listnaté dreviny od seba v prípade jelše s lipou a javorom. Pri javore prekvapivo najväčší podiel na chybe z podhodnotenia klasifikácie, ktorá bola na úrovni 40% malo zaradenie 43 obrazových prvkov do triedy smrek. Taktiež prekvapilo, že na podhodnotení klasifikácie triedy lipa (chyba z podhodnotenia takmer 52%) malo najväčší podiel (17 pixelov) nesprávne priradenie triedy borovica. Pri triede buk nebol žiaden z obrazových prvkov zaradený správne, ale z klasifikovaných pixelov len 4 predstavovali v rámci validačnej vzorky túto triedu, takže takýto výsledok, z dôvodu nižšieho zastúpenia triedy nie je možné zovšeobecňovať. Naopak až v 13 triedach zo 16 klasifikovaných bola chyba z podhodnotenia menšia ako 3%, čo pri výrazne vyššom zastúpení validačnej vzorky v týchto triedach prispelo k celkovo najlepšiemu výsledku uvedeného klasifikačného postupu.

Najviac nadhodnotenými boli triedy javor (chyba z nadhodnotenia 13%), hrab (12%) a lipa (9%). Pri javore to bolo nadhodnotenie na úkor tried jelša, dub, ale aj smrek. Pri hrabe dominovalo nadhodnotenie na úkor triedy jelša. Počet klasifikovaných obrazových prvkov vo všetkých triedach spolu je 645403 pixelov, čo predstavuje 38 % zo všetkých obrazových prvkov obsahujúcich hodnoty odrazivosti povrchu v rámci použitého výrezu hyperspektrálnej snímky.

Tabuľka 2: Kontingenčná tabuľka pre výsledok klasifikácie druhov drevin s použitím lineárneho SVM klasifikátora s nastavením „probability threshold“ 0.9. Na diagonále sú zaznamenané počty správne klasifikovaných obrazových prvkov; C – chyba z nadhodnotenia, O – chyba z podhodnotenia, U – užívateľská správnosť, P – producentská správnosť (priradenie druhu drevin k označeniu tried je uvedené v Tabuľke 1)

Table 2: Error matrix for the result of the classification of tree species using a Linear SVM classifier with a probability threshold of 0.9. The number of accurately classified pixels is recorded on the diagonal; C – Commission O – Omission, U – User accuracy, P – Producer accuracy (assignment of tree species to the label of classes is shown in Table 1)

Klasifikácia		Referenčné údaje																			
LSVM		Cesta	Lúka	BK	Lieska	HB	JVP	LPM	JLL	DBL	BO	SM	KR1	KR2	BR	VRR	VRP	Suma	C [%]	U [%]	
Výsledok klasifikácie		2361	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2361	0	100	
		Lúka	10066	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10067	0.01	99.99	
		BK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Lieska	0	0	159	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	162	1.85	98.15	
		HB	0	0	0	585	1	0	69	0	0	0	6	0	0	0	0	661	11.5	88.5	
		JVP	0	0	4	0	111	1	5	4	0	3	0	0	0	0	0	128	13.28	86.72	
		LPM	0	0	0	0	0	29	0	0	3	0	0	0	0	0	0	32	9.38	90.62	
		JLL	0	0	0	0	25	11	2680	6	0	0	0	1	0	0	0	2723	1.58	98.42	
		DBL	0	0	0	0	5	0	0	769	0	0	0	0	0	0	0	774	0.65	99.35	
		BO	1	0	0	0	0	17	0	0	1810	5	0	1	0	0	0	1834	1.31	98.69	
		SM	0	1	0	0	43	2	0	0	1	3617	2	0	0	0	0	3666	1.34	98.66	
		KR1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	767	0	0	0	0	767	0	100	
		KR2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	7	1608	0	0	0	1616	0.5	99.5	
		BR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	15	0	100	
		VRR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	74	2	77	3.9	96.1	
		VRP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	95	95	0	100	
		Suma	2363	10067	4	160	585	185	2754	779	1814	3625	785	1611	15	74	97	24978			
		O [%]	0.08	0.01	100.00	0.63	0.00	40.00	51.67	2.69	1.28	0.22	2.29	0.19	0.00	0.00	2.06				
		P [%]	1.00	1.00	0.00	0.99	1.00	0.60	0.48	0.97	1.00	1.00	0.98	1.00	1.00	1.00	0.98				

Tabuľka 3: Kontingenčná tabuľka pre výsledok klasifikácie druhov drevín s použitím lineárneho SVM klasifikátora v rámci Machine Learning nástroja (ML_LSVM). Na diagonále sú zaznamenané počty správne klasifikovaných obrazových prvkov; C – chyba z nadhodnotenia, O – chyba z podhodnotenia, U – užívateľská správnosť, P – producentská správnosť (priradenie druhu dreviny k označeniu tried je uvedené v Tabuľke 1)

Table 3: Error matrix for the result of the classification of tree species using a Linear SVM classifier within Machine Learning tool. The number of accurately classified pixels is recorded on the diagonal; C – Commission O – Omission, U – User accuracy, P – Producer accuracy (assignment of tree species to the label of classes is shown in Table 1)

Klasifikácia ML_LSVM		Referenčné údaje																		
		Cesta	Lúka	BK	Lieska	HB	JVP	LPM	JLL	DBL	BO	SM	KRI	KR2	BR	VRR	VRP	Suma	C [%]	U [%]
Cesta	937	5	0	0	2	0	2	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	950	1.37	98.63
Lúka	5	9779	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	9796	0.17	99.83
BK	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	100	0
Lieska	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	100
HB	0	0	1	5	280	3	1	71	1	0	0	8	12	0	0	0	0	382	26.7	73.3
JVP	0	3	3	2	2	93	2	3	6	1	8	2	3	0	0	0	0	128	27.34	72.66
LPM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
JLL	0	0	2	15	89	63	29	2170	44	0	9	0	77	2	39	1	2540	14.57	85.43	
DBL	0	0	1	0	0	21	0	6	593	0	0	0	0	0	0	1	622	4.66	95.34	
BO	1	0	6	0	22	9	57	8	0	811	28	0	11	0	0	0	953	14.9	85.1	
SM	0	1	0	0	5	6	11	2	0	27	1223	0	2	0	0	0	1277	4.23	95.77	
KRI	0	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	136	2	0	4	2	151	9.93	90.07	
KR2	0	0	0	17	20	0	6	4	0	1	1	36	927	0	2	0	1014	8.58	91.42	
BR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
VRR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	100
VRP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	65	68	4.41	95.59	
Suma	945	9790	13	44	424	195	108	2264	644	843	1270	182	1046	2	48	69	17887			
O [%]	0.01	0.11	100.00	97.73	33.96	52.31	100.00	4.15	7.92	3.80	3.70	25.27	11.38	100.00	97.92	5.80				
P [%]	0.99	1.00	0.00	0.02	0.66	0.48	0.00	0.96	0.92	0.96	0.96	0.75	0.89	0.00	0.02	0.94				

Celková správnosť klasifikácie ML SVM je 95.13% a Kappa index je 0.927. Počet klasifikovaných obrazových prvkov zo všetkých tried je 691 770 pixlov, 41% zo všetkých obrazových prvkov obsahujúcich hodnoty odrazivosti. Z Tabuľky 3 môžeme opäť vyhodnotiť správnosť klasifikácie na úrovni jednotlivých tried. Aj keď celková správnosť klasifikácie je vysoká je to do veľkej miery vďaka vysokej správnosti klasifikácie vysoko zastúpených tried cesta, lúka, jelša, smrek a kroviny 2. Celkovo môžeme v tejto klasifikácii pozorovať väčšie chyby klasifikátora vzájomne rozlíšiť listnaté dreviny od seba navzájom ale aj kroviny z vyššej etáže s jelšou. Okrem tried lipa, javor, buk sa vyskytli vysoké chyby z podhodnotenia aj v triedach breza, vrba rakyta a hrab. Pri hrabe ide o chybnú klasifikáciu s triedou jelša. Javor bol pri tejto klasifikácii spoľahlivo odlíšený od triedy smrek, na druhej strane nesprávne zaradenie triedy lipa do triedy borovica sa ešte zvýraznilo. 57 pixelov z celkového počtu 108 pixelov z validačnej vzorky bolo nesprávne zaradených do triedy borovica a celkovo trieda lipa na pozíciách validačnej vzorky v referenčných údajoch nebola klasifikovaná (chyba z podhodnotenia 100%). Miera chyby z podhodnotenia v porovnaní so správnosťou klasifikátora je najvyššia pri listnatých drevinách s nízkym počtom trénovacích vzoriek, ako napr. buk, vrba rakyta, breza alebo lieska.

Výraznejšie nadhodnotenou triedou v klasifikácii bola trieda javor, kde ale nedošlo k nadhodnoteniu na úkor jednej konkrétnej triedy, ale väčšieho počtu tried listnatých drevín. Miera chyby z nadhodnotenia triedy v porovnaní s užívateľskou správnosťou triedy je okrem javora nepriaznivá aj pri triede hrab, kde dominuje nadhodnotenie na úkor triedy jelša (71 nesprávne klasifikovaných obrazových prvkov).

Keď z hľadiska celkovej správnosti oboch klasifikácií je len malý rozdiel percentuálnych bodov, na základe porovnania správnosti na úrovni jednotlivých tried konštatujeme, že SVM priniesla pre väčší počet málo zastúpených tried výrazne lepšiu správnosť klasifikácie. Výnimočne vysoké hodnoty Kappa indexu, resp. celkovej správnosti sú ovplyvnené aj veľkou výmerou nestromových povrchov, najmä v triede lúky a pasienky. Táto trieda sa dala pomocou hyperspektrálnych údajov spoľahlivo odlíšiť od ostatných, čo sa pri veľkom počte obrazových prvkov vo validačnej vzorke tejto triedy prenieslo aj na výsledné metriky správnosti klasifikácie. Z toho dôvodu bol urobený výpočet Kappa indexu aj pre výsledok klasifikácie zahŕňajúci len 14 tried reprezentujúcich druhy drevín. Takto upravená Kappa nadobúda pre klasifikáciu s použitím SVM hodnotu 0,98 a pre klasifikáciu s použitím LM SVM klasifikátora hodnotu 0,89.

Záver a diskusia

V práci bolo porovnaných 6 parametrických a neparametrických metód strojového učenia použitých na klasifikáciu 14 druhov drevín a 2 povrchov v mierke na úrovni jednotlivých stromov, pričom bolo overených celkovo 8 postupov klasifikácie. Z klasifikácie šiestimi metódami strojového učenia, pri použití 474 kanálov

hyperspektrálnych snímok sme zistili, že štyri metódy nadobúdajú vysokú správnosť klasifikácie (Kappa index > 0.8) a z nich najvyššiu správnosť dosiahla parametrická metóda Linear SVM (LSVM). Tento výsledok korešponduje s viacerými prácami, v ktorých najčastejšie porovnávanými metódami je metóda Random Forest (RF) a Support Vector Machine (SVM), pričom vo výsledkoch čiastočne dominuje prevaha dosiahnutia vyššej správnosti pri metóde SVM (MÄYRÄ et al. 2021, ZAGAJEWSKI et al. 2021), či už v jeho parametrickej (linear SVM), alebo neparametrickej podobe (non-linear SVM). SVM je preto často voleným klasifikátorom, čo dokumentuje aj jeho aplikácia pri klasifikácii druhov drevín z hyperspektrálnych a LiDAR údajov v prácach ZHANG et al. (2022), DALPONTE et al. (2014). BALLIANTI et al. (2016) nezistil pri určitej úrovni trénovacích množín rozdiel v dosiahnutej správnosti pri porovnaní SVM a RF klasifikátorov. Po zväčšení trénovacej vzorky však SVM klasifikátor prekonal správnosť RF. Podobne vyrovnanú úroveň správnosti klasifikácie druhov drevín pre uvedené klasifikátory konštatuje na základe svojich výsledkov GHOSH et al. (2014), a naopak lepší výsledok dosiahol RF klasifikátor po začlenení vegetačných indexov do klasifikácie. Z toho vyplýva, že vhodnosť použitej metódy strojového učenia závisí aj od druhu charakteristík zahrnutých do klasifikácie.

Po vyhodnotení LSVM klasifikátora ako najlepšieho spomedzi 6 klasifikátorov aplikovaných v rámci nástroja Machine Learning (ML) v softvéri ENVI, boli s použitím LSVM aplikované ešte dva ďalšie postupy klasifikácie. Prvým bolo použitie LSVM mimo ML nástroja, čo prinieslo výnimočne vysokú úroveň správnosti klasifikácie s hodnotou Kappa indexu 0,99, po vylúčení 2 tried reprezentujúcich nestromové povrchy hodnotu 0,98. Rozdiel v oboch postupoch bol v tom, že samostatne aplikovaný LSVM umožňuje nastavenie parametra „probability threshold“, ML LSVM takúto možnosť nemá. Z toho usudzujeme, že to by mohol byť jeden z dôvodov rozdielneho výsledku klasifikácie. Nevýhodou samostatne aplikovaného LSVM je niekoľkonásobne väčšia spotreba času na proces tvorby modelu a samotnú klasifikáciu, a tiež, že výsledný klasifikačný model nie je možné uložiť, ako je to pri použití ML nástroja. Tým sa LSVM model nedá aplikovať na iné územie bez získania referenčných údajov a opätovného trénovania modelu. Tento aspekt hodnotenia je však do veľkej miery viazaný na konkrétny použitý softvérový nástroj (ENVI), preto ho nemožno zovšeobecňovať. Čo sa týka časovej náročnosti, ako sľubné sa javí použitie transformačných metód (PCA, ICA, MNF) na redukcii dimenzií vstupných charakteristík (ZHONG et al. 2022).

Druhý postup klasifikácie s alternatívnym použitím LSVM klasifikátora bolo zahrnutie rastrových súborov pre vlastný a vrhnutý tieň do vstupných charakteristík pre klasifikáciu. Predpokladali sme, že postupom strojového učenia by mohlo dôjsť k takému začleneniu uvedených charakteristík do klasifikačného modelu, ktoré by pomohlo znížiť anizotropiu obrazových prvkov v rámci tej istej klasifikačnej triedy, prirodzene vyplývajúcu zo svetelných podmienok v čase snímania. Tento predpoklad sa však nepotvrdil a hodnota Kappa indexu klesla o 0,03 v porovnaní s klasifikáciou bez použitia charakteristík tieňa

odvodených z LiDAR údajov. Na základe výsledkov práce KORPELA et al. (2014) však v overovaní tohto predpokladu plánujeme pokračovať, ale plánujeme overiť komplexnejšie prístupy, ktoré sú uvedené v citovanej práci. V našom postupe nebola tiež realizovaná priestorová koregistrácia hyperspektrálnych snímok s rastrovými obrazmi tieňov odvodenými z LiDAR údajov, čo môže byť jedna z príčin nenaplnenia predpokladu.

V ďalšom výskume plánujeme začleniť aj ďalšie charakteristiky odvodené z LiDAR údajov, pri ktorých bol dokumentovaný pozitívny vplyv na výsledok klasifikácie druhov drevín. DALPONTE et al. 2012 uvádza napr. výškové charakteristiky mračna bodov, ALONZO et al. 2014 metriky založené na separácii jednotlivých korún, čo už ale súvisí s objektovo-orientovanou klasifikáciou, a to si už vyžaduje komplexnejšiu úpravu použitých metód. Typ odrazu a intenzita LiDAR signálu bola vyhodnotená ako užitočná charakteristika na odlíšenie ihličnatých a listnatých drevín ZHONG et al. (2022), čo by mohlo pomôcť zlepšiť správnosť klasifikácie medzi triedami smrek a javor, resp. borovica a lipa, pri ktorých sme identifikovali chyby klasifikácie pri najlepšej z porovnávaných metód (LSVM). Použitie charakteristik vychádza z predpokladu, že spektrálne podobné triedy sa líšia v štruktúre vegetačných orgánov, čo je typický prípad ihličnatých a listnatých drevín. Rovnako na uvedenom predpoklade plánujeme využiť charakteristiky textúry odvodené z optických údajov hyperspektrálnej snímky.

Na záver konštatujeme, že kombinácia hyperspektrálnych údajov s veľmi vysokým priestorovým rozlíšením, LiDAR záznamov a metód strojového učenia je perspektívnym prístupom na dosahovanie vysokej správnosti klasifikácie druhov drevín na úrovni jednotlivých stromov.

Pod'akovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Výskum aplikácie prostriedkov umelej inteligencie pri analýzach a klasifikácií dát hyperspektrálneho snímkovania (313011BWC9) spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- ALONZO, M., BOOKHAGEN, B., ROBERTS, D.A., 2014. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. *Remote Sens. Environ.* 148, 70–83
- BALLANTI L., BLESUS L., HINES E. AND KRUSE, B., 2016: Tree Species Classification Using Hyperspectral Imagery: A Comparison of Two Classifiers. *Remote Sens.* 2016, 8, 445; doi:10.3390/rs8060445
- Černý, M., BUKŠA, I. F., PASTERNAK, V.P., 2006. Usage of field technology Field-Map in forest management and nature protection. *Geoinformatics*, Kiev, Ukraine
- DALPONTE, M., BRUZZONE, L., GIANELLE, D., 2012. Tree species classification in the Southern Alps based on the fusion of very high geometrical resolution multispectral/hyperspectral images and LiDAR data. *Remote Sens. Environ.* 123 (0), 258–270
- DALPONTE, M., Ørka, H.O., ENE, L.T., GOBAKKEN, T., NÆSSET, E., 2014. Tree crown delineation and tree species classification in boreal forests using hyperspectral and ALS data. *Remote Sens. Environ.* 140, 306–317

- DALPONTE, M., Ørka, H. O., GOBAKKEN, T., GIANELLE, D., & NÆSSET, E. 2013. Tree species classification in boreal forests with hyperspectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(5), 2632–2645. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2012.2216272>
- GHOSH, A., FASSNACHT, F.E., JOSHI, P.K., KOCH, B., 2014. A framework for mapping tree species combining hyperspectral and LiDAR data: Role of selected classifiers and sensor across three spatial scales. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 26, 49–63
- JAKUBOWSKI, M.K., LI, W., GUO, Q., KELLY, M., 2013. Delineating individual trees from Lidar data: a comparison of vector- and raster-based segmentation approaches. *Remote Sens.* 5, 4163–4186
- KORPELA, I., MEHTÄTALO, L., SEPPÄNEN, A., KANGAS, A., 2014. Tree species identification in aerial image data using directional reflectance signatures. *Silva Fennica* 48 (3), article id1087
- LA ROSA, L. E. C., SOTHE, C., FEITOSA, R. Q., DE ALMEIDA, C. M., SCHIMALSKI, M. B., AND OLIVEIRA, D. A. B. (2021). Multi-task fully convolutional network for tree species mapping in dense forests using small training hyperspectral data. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens.* 179, 35–49. doi:10.1016/j.isprsjprs.2021.07.001).
- LASSALLE, G., FERREIRA, M. P., LA ROSA, L. E. C., DE SOUZA FILHO, C. R., 2022. Deep learning-based individual tree crown delineation in mangrove forests using very-highresolution satellite imagery. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens.* 189, 220–235. doi:10.1016/j.isprsjprs.2022.05.002)
- LEE, K., COHEN, E., KENNEDY, R.E., MAIERSPERGER T.K., GOWER, S.T., 2004: Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. In *Remote Sensing of Environment*. [online], Vol 91.Issues 3-4, p. 508-520. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.04.010>
- MALENOVSKY, Z., 2002: Investigation of Functional Parts and Status of Norway Spruce Crowns Using Spectral Remote Sensing Information In Thesis Report GIRS-2002-25 of the Laboratory of Geo-Information Science and Remote Sensing, Wageningen University, Wageningen (The Netherlands) pp. 74, <https://edepot.wur.nl/297047>
- MARTIN, M., NEWMAN, S., ABER, J., AND CONGALTON, R., 1998. Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* 65, 249–254. doi:10.1016/S0034-4257(98)00035-2)
- MÄYRÄ, J., KESKI-SAARI, S., KIVINEN, S., TANHUANPÄÄ, T., HURSKAINEN, P., KULLBERG, P., POIKOLAINEN, L., VIINIKKA, A., TUOMINEN, S., KUMPULA, T. AND VIHVERVAARA, P., 2021. Tree species classification from airborne hyperspectral and LiDAR data using 3D convolutional neural networks. *Remote Sensing of Environment*, 256, pp. 112322.
- NAIDOO, L., CHO, M.A., MATHIEU, R., ASNER, G., 2012. Classification of savanna tree species, in the Greater Kruger National Park by integrating hyperspectral and LiDAR data in a random forest data mining environment. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 69, 167–179
- PANT, P., HEIKKINEN, V., HOVI, I.A., KORPELA, HAUTA-KASARI M., TOKOLA, T., 2013. Evaluation of simulated bands in airborne optical sensors for tree species identification. *Remote Sens. Environ.* 138 (0), 27–37)
- PEÑA, M.A., CRUZ, P., ROIG, M., 2013. The effect of spectral and spatial degradation of hyperspectral imagery for the Sclerophyll tree species classification. *Int. J. Remote Sens.* 34 (20), 7113–7130
- RESEARCH SYSTEM, INC. 2023: ENVI 5.7 User's Guide
- QUAN, Y., LI, M., HAO, Z., LIU, J., WANG, B., 2023: Tree species classification in a typical natural secondary forest using UAV-borne LiDAR and hyperspectral data. *GISCIENCE & REMOTE SENSING 2023, VOL. 60, NO. 1*, 2171706 <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2171706>
- SOTHE, C., DE ALMEIDA, C.M., SCHIMALSKI, M.B., LA ROSA, L.E.C., CASTRO, J.D. B., FEITOSA, R.Q., DALPONTE, M., LIMA, C.L., LIESENBERG, V., MIYOSHI G.T., TOMMASSELLI, A.M.G., 2020. Comparative performance of convolutional neural network, weighted and conventional support vector machine and random forest for classifying tree species using hyperspectral and photogrammetric data, *GIScience & Remote Sensing*, 57:3, 369-394, DOI: 10.1080/15481603.2020.1712102
- XI, Y., REN, C., TIAN, Q., REN, Y., DONG, X., AND ZHANG, Z. 2021. Exploitation of time series sentinel-2 data and different machine learning algorithms for detailed tree species classification. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sens.* 14, 7589–7603. doi:10.1109/jstars.2021.3098817
- YANG, G., HUANG, K., SUN, W., MENG, X., MAO, D., AND GE, Y. 2022. Enhanced mangrove vegetation index based on hyperspectral images for mapping mangrove. *ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens.* 189, 236–254. doi:10.1016/j.isprsjprs.2022.05.003)

- YEL, S.G., TUNC GORMUS, E., 2023. Exploiting hyperspectral and multispectral images in the detection of tree species: A review. *Front. Remote Sens.* 4:1136289. doi: 10.3389/frsen.2023.1136289
- ZAGAJEWSKI, B., KLUCZEK, M., RACZKO, E., NJEGOVEC, A., DABJA, A., KYCKO, M., 2021. Comparison of Random Forest, Support Vector Machines, and Neural Networks for Post-Disaster Forest Species Mapping of the Krkonoše/Karkonosze Transboundary Biosphere Reserve. *Remote Sens.* 2021, 13, 2581. <https://doi.org/10.3390/rs13132581>
- ZARCO-TEJADA, P.J., MILLER, J.R., MORALES, A., BERJÓN A., AHUERA, J., 2004. Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops [online]. *Remote Sensing of Environment* 90 (2004) 463–476. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.01.017>
- ZHONG, H., LIN, W., LIU, H., MA, N., LIU, K., CAO, R., WANG, T. AND REN, Z., 2022: Identification of tree species based on the fusion of UAV hyperspectral image and LiDAR data in a coniferous and broad-leaved mixed forest in Northeast China. *Front. Plant Sci.* 13:964769. doi: 10.3389/fpls.2022.964769

Adresa autorov:

Ing. Roman Sitko, PhD.¹

Ing. Matúš Pivovar²

Ing. et Ing. Šimon Saloň PhD.¹

Ing. Roman Kadlečík, PhD.¹

Ing. Miroslav Sivák, PhD.¹

doc. Ing. František Chudý, CSc.¹

prof. Ing. Ľubomír Scheer, CSc.¹

Ing. Daniel Tunák, PhD.¹

Ing. Milan Mistrík¹

Ing. Zuzana Parobeková, PhD.¹

Ing. Ivana Sarvašová, PhD.¹

¹ Katedra plánovania lesných zdrojov a informatiky

Lesnícka fakulta

² Fakulta ekológie a environmentalistiky

Technická univerzita vo Zvolene

T. G. Masaryka 24, 960 53, Zvolen

ZOSTAVA FIELD-MAP AKO ZDROJ ÚDAJOV PRE RASTOVÝ SIMULÁTOR SIBYLA

Peter VALENT – Julián TOMAŠTÍK – Šimon SALOŇ – Marek FABRIKA - Ján TUČEK -
Milan KOREŇ – Miroslav Kardoš – Róbert SEDMÁK – Ján BAHÝĽ

VALENT, P., TOMAŠTÍK, J., SALOŇ, Š., FABRIKA, M., TUČEK, J., KOREŇ, M., Kardoš, M., SEDMÁK, R., BAHÝĽ, J.: The Field-Map assembly as a data source for the SIBYLA growth simulator, Acta Facultatis Forestalis, Zvolen

ABSTRACT

The different level of input data which are needed for the SIBYLA growth simulator provides us a wide selection of applicable resources. Whether it is data from forest inventory or data acquired by technologies and methods allowing it. One of the possibilities is the application of information obtained through a specialized Field-Map set, which ensures the acquisition and recording of information at the highest level of detail. The Field-Map includes the most realistic capture of the conditions - the structure of the stand (tree positions and selected tree characteristics). The article is devoted to the proposal and assessment of the methodology for using the Field-Map in the data acquisition at the individual tree level for the SIBYLA growth simulator. The publication contains a description of terrestrial data measurement procedure, as well as methodology for importing the measured data into the growth simulator. As part of methodology, the data structure of the import file, its connections to the growth simulator and mutual relations are characterized in detail. For these purposes, two plots within site Visolaje were mapped by the Field-Map. Coordinates of the tree trunk and the centre of tree crown, tree height and diameter at breast height, as well tree species were recorded within the plots. Measured positions of individual trees with the corresponding information were georeferenced into the S-JTSK coordinate system. Within the first plot (marked 32) with an area of 0.20 hectares 72 trees were measured. Second plot was (marked 33) established with an area of 0.32 hectares where 43 trees were measured. Within the plot 32 we recorded 8 tree species, plot 33 was occupied by 5 tree species. The measured and processed data were subsequently visualized in the ArcMap program (positions of trunks and tree crowns), and later were also visualized in the environment of the SIBYLA growth simulator. Based on the results, we can demonstrate the application of the Field-Map with the LTI Mapstar electronic compass and the Impulse LR 200 length meter in data acquisition that provides the required level of detail for the needs of the growth simulator.

Key words: mapping, database, growth model, forest structure

1. Úvod a problematika

Zber údajov o lesnom prostredí patrí medzi náročné činnosti, čo vyplýva z niekoľkých faktorov. Sem patria napr. samotná rozmanitosť lesného prostredia z hľadiska

biodiverzity, komplikovaný terén v porovnaní s inými typmi krajiny, ale aj nepriaznivé vplyvy na rozličné meračské metódy – napr. problematická viditeľnosť medzi susednými bodmi alebo blokovanie a odraz signálov globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS). Dlhodobým trendom je preto zisťovanie čo najväčšieho rozsahu potrebných údajov bezkontaktnými metódami, najmä metódami leteckého a družicového diaľkového prieskumu Zeme (DPZ). Štandardnými metódami pre lesnícke mapovanie na Slovensku sú letecká fotogrametria a letecké laserové skenovanie, ktoré sa vzhľadom na 10-ročný cyklus obnovy programov starostlivosti o les (PSL) vykonávajú na zhruba 1/10 výmery lesov Slovenska. Vzhľadom na parametre, použité pre účely mapovania väčších území, vyššie uvedené metódy nie sú schopné poskytnúť informácie na úrovni jednotlivého stromu. Tie sú potrebné v procese inventarizácie, evidencie, ale často aj ako vstupy do modelov a simulácií procesov v lesnom prostredí. Informácie na úrovni jednotlivého stromu sú preto často zisťované pozemnými metódami, alebo v súčasnosti aj metódami leteckej fotogrametrie a laserového skenovania, kde nosičom senzoru je diaľkovo pilotovaný letecký systém – dron. Z pomôcok pre zisťovanie stromových charakteristík zostávajú štandardom výškomer a priemerka – samozrejme už často v elektronickom vyhotovení, pri určovaní polohy stromov je už evidentný ústup od jednoduchých pomôcok, t. j. výtyčiek a meračského pásma. Trendom je používanie metód, ktorých produktom je bodové mračno (LIANG ET AL., 2022). Jedná sa najmä o použitie laserových skenerov (LIDAR). Tie bývajú použité v „klasickom“, statickom móde, prípadne ako súčasť mobilných skenovacích systémov. Prvotné testovanie použiteľnosti v lesníctve prebehlo už aj pre skenery, ktoré sú súčasťou „smart“ zariadení. V oblasti fotogrametrie sa jedná najmä o použitie tzv. Structure-From-Motion (SfM) postupov, kde senzorom môžu byť kamery a fotoaparáty v rozpätí od profesionálneho fotografického vybavenia až po nízko nákladové senzory používané v mobilných zariadeniach. V prípade uvedených zariadení (LIDAR, SfM) sú stromové charakteristiky získavané až počas spracovania bodových mračen pri kancelárskom vyhodnotení. Výhodou je, že lesné prostredie je zachytené vo svojej komplexnosti, potrebné atribúty (napr. výška, hrúbka, poloha stromu) sú získané z jedného zdroja a je možné neskôr získavať aj atribúty, ktoré neboli pri prvotnom vyhodnotení považované za potrebné. Z toho vyplývajúcou nevýhodou je ale určitá nadbytočnosť informácií, ktorá vedie ku komplikáciám pri spracovávaní takýchto údajov. Polohu stromov je možné určiť aj štandardnými geodetickými metódami, ktoré ale majú rôzne praktické nevýhody. Použitie GNSS je rýchle, ale aj prijímače najvyššej kategórie majú problém pod clonou porastu pri rýchlych metódach merania spoľahlivo určiť polohu s dostatočnou presnosťou. Použitie totálnych staníc (elektronických teodolitov) vyžaduje pomerne vysoké vstupné náklady a je prácne, ale poskytuje z uvádzaných metód najpresnejšie výsledky. Ako určitý kompromis medzi vstupnými nákladmi, prácnosťou a presnosťou určenia polohy sa v oblasti výskumu a inventarizácie lesov už dlhšiu dobu používa zostava Field-Map. Tá používa buzolové meranie s využitím elektronických pomôcok – elektronického kompasu

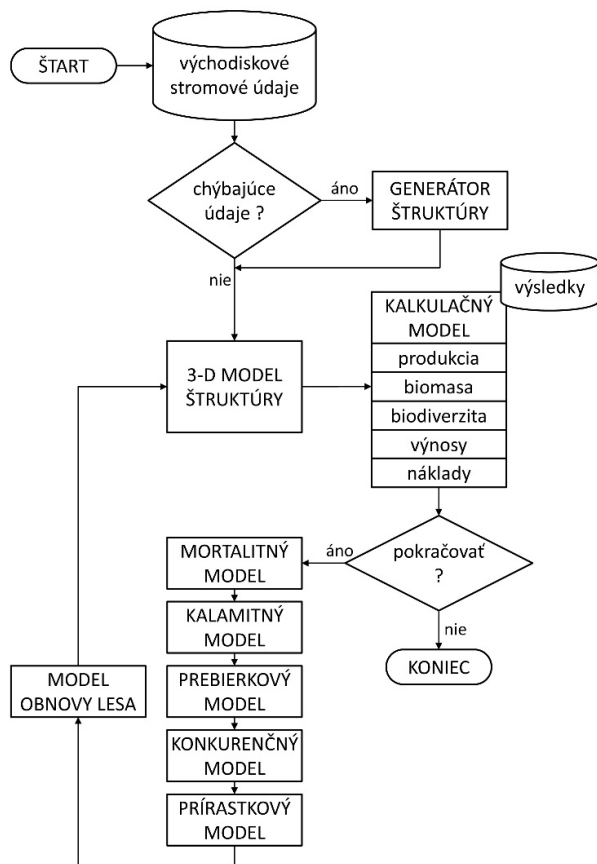
a dĺžkometra. Výraznou výhodou je zakomponovanie softvéru, ktorý je cielene navrhnutý pre účely inventarizácie a priamo komunikuje s elektronickými meračskými pomôckami, vrátane priemerky a výškometru (ŠEBEŇ ET AL., 2006). Výsledkom práce sú databázy v zvolenej štruktúre, prípadne grafické mapové výstupy.

Rastový simulátor SIBYLA

Rastový simulátor SIBYLA (FABRIKA, 2005) je priestorovo explicitný (distančne závislý) stromový rastový simulátor pracujúci s informáciami o jednotlivých stromoch (pozície, hrúbky, výšky, parametre korún, parametre kvality). Z pohľadu vstupných údajov o štruktúre lesa je možné pracovať:

- s porastovými charakteristikami (napr. PSL),
- so zistenými hrúbkovými početnosťami a k nim reprezentatívnymi výškami (celoplošné priemerkovanie porastu resp. výskumnej plochy), ktoré môžu vystihovať i kvalitatívnu štruktúru a poškodenie,
- s Liocourtovým alebo Meyerovým modelom výberkového lesa pre generovanie výberkovej štruktúry,
- s detailnými stromovými údajmi získanými terénymi meraniami (terénne súpravy na zber údajov o jednotlivých stromoch - napr. systém Field-Map).

Jednotlivé typy vstupných údajov možno charakterizovať rôznym stupňom náročnosti ich získania no na druhej strane rozdielnou úrovňou reprezentatívnosti voči skutočnej štruktúre lesa. Vo všeobecnosti tu platí - čím je metóda získania údajov prácnejšia, tým vierohodnejšie sú údaje pre generovanie štruktúry lesa v rastovom simulátore SIBYLA a naopak. Pri použití metód u ktorých nie sú známe niektoré z nepovinných vstupných charakteristík sa využíva generátor štruktúry lesa, ktorý tieto charakteristiky vypočíta pri generovaní štruktúry. Zadaná alebo vygenerovaná štruktúra lesa sa následne zobrazí pomocou 3D modelu štruktúry lesa. Kalkulačný model dopočíta z parametrov stromov a priestorovej štruktúry porastu všetky dôležité výstupy vzťahujúce sa na produkciu, biomasu, biodiverzitu, výnosy a náklady. Model SIBYLA v sebe kombinuje prvky empirických a eko-fyziologických stromových rastových modelov a je schopný realisticky napodobniť prakticky akúkoľvek štruktúru porastu na rozličných typoch stanovišť v stredoeurópskych prírodných podmienkach. Simulátor pracuje v ročnom simulačnom cykle a bol parametrizovaný pre 5 hlavných drevín stredoeurópskych lesov (buk lesný, dub letný alebo zimný, smrek obyčajný, jedľa biela a borovica lesná). Na výstupe poskytuje široké spektrum veľmi podrobných informácií o vývoji štruktúry, objemu a kvality drevnej produkcie, biomase, ekologickej stabilite a biodiverzite lesa a o ekonomike lesnej výroby. Základná koncepcia simulátora SIBYLA vychádza z rastového simulátora SILVA 2.2 (PRETZSCH et al., 2002). Simulátor sa skladá z niekoľkých základných modulov, ktorých činnosť na seba logicky nadväzuje (obr. 1).



Obr. 1: Funkčný princíp a architektúra rastového simulátora SIBYLA (FABRIKA, 2005)
Fig. 1: Functional principle and architecture of the SIBYLA growth simulator (FABRIKA, 2005)

Cieľ práce

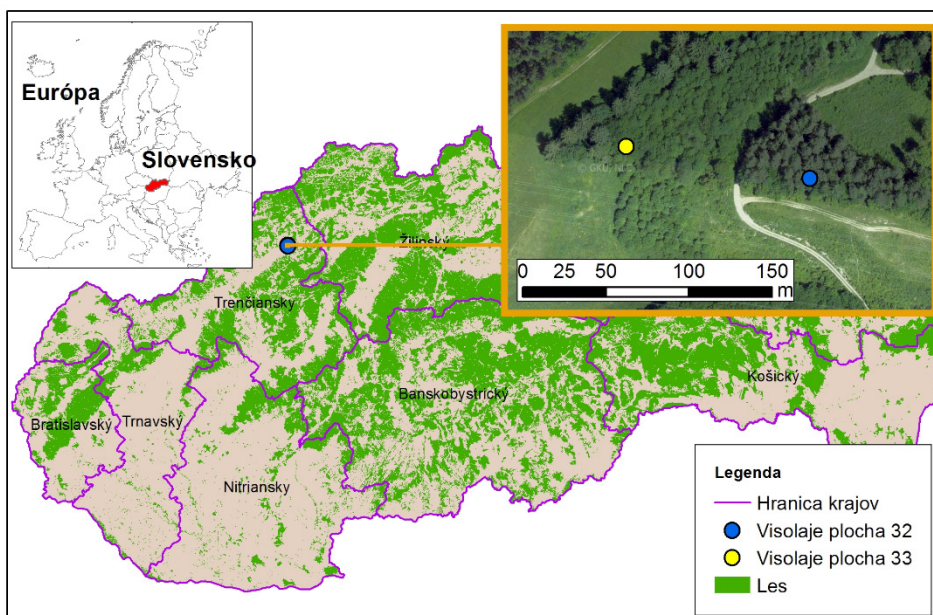
Cieľom práce bolo navrhnuť a posúdiť metodiku využitia zostavy Field-Map ako zdroja údajov pre napĺňanie databáz rastového simulátora SIBYLA údajmi o jednotlivých stromoch.

2. Materiál a metódy

Výskumné plochy a merané charakteristiky

V rámci záujmového územia Visolaje boli založené 2 výskumné plochy s označením 32 a 33, ktorých poloha je vizualizovaná na obrázku 2. Zber dát bol zameraný na zisťovanie

vybraných stromových charakteristík (druh dreveny, výška – h, hrúbka d 1.30 – DBH) a polohopisných informácií jednotlivých stromov (pozícia kmeňa a koruny – hodnoty súradníc x, y) nachádzajúcich sa na založených výskumných plochách.



Obr. 2: Lokalizácia výskumných plôch v záujmovom území Visolaje
Fig. 2: Localisation of research plots within the area of interest Visolaje

Odhadovaný stred plochy 32 sa nachádza na $49^{\circ}05'30.64493''\text{N}$ $18^{\circ}21'57.21328''\text{E}$. Na ploche o rozlohe 0,20 ha sa vyskytovalo 8 druhov drevín o celkovom počte 72 kusov. Z druhov drevín tu boli zastúpené buk lesný (*Fagus sylvatica* L.), borovica lesná (*Pinus sylvestris* L.), dub letný (*Quercus robur* L.), hrab obyčajný (*Carpinus betulus* L.), javor poľný (*Acer campestre* L.), lieska obyčajná (*Corylus avellana* L.), lipa malolistá (*Tilia cordata* Mill.) a smrek obyčajný (*Picea abies* L.). Plocha 33 sa nachádza na $49^{\circ}05'30.32762''\text{N}$ $18^{\circ}22'02.73180''\text{E}$. Plocha mala rozlohu 0,32 ha a vyskytovalo sa na nej 5 druhov drevín: dub letný (*Quercus robur* L.), hrab obyčajný (*Carpinus betulus* L.), jelša lepkavá (*Alnus glutinosa* Mill.), javor poľný (*Acer campestre* L.) a smrek obyčajný (*Picea abies* L.) o celkovom počte 43 kusov.

Prípravné práce, meranie a spracovanie údajov

Pred samotným meraním bolo potrebné realizovať prípravné práce. V rámci tejto fázy bol skontrolovaný a doplnený číselník drevín a upravená štruktúra

databázy zostavy Field-Map, ktorá by umožňovala zaznamenávať hodnoty vybraných charakteristík uvedených v kapitole 1.1. V lesnom teréne boli vytyčené rohy záujmových plôch výtyčkami. Následne bol navrhnutý dizajn rozmiestnenia stanovísk, z ktorých bolo meranie vykonané. Poloha stanovísk umiestnených v lesnom prostredí bola určená geodetickým prístrojom totálnou stanicou Topcon GPT-3000. Na zhustenie bodového poľa, ktoré slúžilo ako východisko pri zameraní pozícií stanovísk v lese, bol použitý GNSS prijímač pri aplikácii korekcií prostredníctvom Slovenskej priestorovej observačnej služby SKPOS. Pri zhustovaní bodového poľa prostredníctvom GNSS zariadenia boli dodržané všetky podmienky merania. Zamerané polohy stanovísk slúžili v neskoršom procese na georeferencovanie nameraných údajov prostredníctvom zostavy Field-Map. Pri stanovení polohy kmeňov bol použitý digitálny kompas (LTI Mapstar) a laserový diaľkomer (Impulse LR 200). Uvádzaná uhlová presnosť kompasu je $\pm 0.3^\circ$ a dĺžková presnosť diaľkomeru $\pm 3\text{cm}/50\text{m}$. Na signalizáciu polohy bolo použité zrkadlo na výtyčke. Pri výpočte polohy kmeňa stromu bolo zohľadnené odsadenie výtyčky. Odsadenie reprezentovalo polovicu hrúbky nameraného kmeňa (DBH). Na meranie hrúbky (DBH) v milimetroch bola využitá elektronická priemerka, ktorá bola cez bluetooth prepojená na Field-Map, kam odosiela namerané dáta. Na meranie výšky stromov (h) bol použitý výškomer Vertex II. Namerané výšky boli manuálne editované v rámci programového rozhrania Field-Mapu. Pri meraní hrúbok a výšok boli dodržané stanovené metodické postupy. Namerané pozície s prislúchajúcimi údajmi boli v procese spracovania georeferencované a upravené do vyhovujúcej databázovej štruktúry, ktorá zabezpečuje integritu prenosu potrebných dát do rastového simulátora SIBYLA.

Import údajov do rastového simulátora SIBYLA

Stromové údaje získané systémom Field-Map je možné do rastového simulátora SIBYLA importovať dvomi spôsobmi. Buď to manuálne cez dialógové okno modulu generátor kde je potrebné zvoliť typ zdrojových údajov "stromy" a následne editovať formulárové polia po jednotlivých drevinách. Tento spôsob je však pri často krát veľkom počte stromov na výskumnej ploche nepoužiteľný z hľadiska časovej náročnosti, prácnosti a s tým spojeného rizika generovania chýb z nepozornosti užívateľa pri editácii. Oveľa vhodnejším je prístup, kedy je import údajov realizovaný externe priamo do databázy rastového simulátora SIBYLA mimo jeho programové rozhranie. Databáza rastového simulátora SIBYLA (ETOOLS, 2008) je typu MS Access vo formáte súboru *.mdb. Databázová štruktúra na úrovni jednotlivých tabuliek a ich zodpovedajúcich atribútov je v uvedenom zdroji veľmi detailne popísaná. Ide o relačnú databázu v ktorej je potrebné naplniť tabuľky generátora vstupov. Pri údajoch získaných po jednotlivých stromoch pôjde o tabuľky STRUGEN, DESCRIPTION a INDIVIDUAL. Tabuľka STRUGEN definuje na úrovni porastu základné údaje pre generované simulačné plochy. V tabuľke

DESCRIPTION sú to údaje na úrovni jednotlivých etáží a drevín porastu zahŕňajúce všetky potrebné základné informácie pre generovanie štruktúry. Napokon tabuľka INDIVIDUAL definuje na úrovni etáží charakteristiky jednotlivých stromov, pričom všetky neznáme charakteristiky sa dogenerujú. Tento prístup je veľmi flexibilným z pohľadu užívateľa, ktorý nemusí mať k dispozícii vždy komplexné údaje v zmysle všetkých databázových atribútov po jednotlivých stromoch.

Praktické napĺňanie spomínaných tabuliek po jednotlivých atribútoch prebiehalo formou importu do tabuliek zo súborov typu *.dbf obsahujúcich štruktúrované dáta zo súpravy Field-Map. Bola využitá syntax jazyka SQL pre tvorbu databázových dopytov, ktoré zabezpečili napĺňanie databázy údajmi. Z pohľadu rastového simulátora je kľúčové aby boli naplnené vyššie spomínané tabuľky a v nich povinné atribúty. Do tabuľky STRUGEN boli importované základné informácie o ploche z pohľadu jej jedinečného identifikátora - názvu plochy (stand) a výmer (area, orgArea). Atribút zmiešanie (mixture) v tomto prípade nemá na výsledok generovania vplyv pretože máme dostupné informácie o presných pozíciách stromov. Pri atribúte opakovanie (repeatStructure) by sa medzi jednotlivými iteráciami generovania štruktúry prejavili rozdiely medzi nimi iba v atribútoch, ktoré sú dogenerované simulátorom (vopred neznáme). Atribút filter bol nastavený na hodnotu 1 t. j. porast vybraný pre generovanie štruktúry. V tabuľke DESCRIPTION boli naplnené atribúty porast (stand), etáž (storey), drevina (species) a zdroj (source) na základe získaných údajov. Atribút zdroj (source) priamo rozhoduje akým spôsobom sa bude pri generovaní štruktúry porastu postupovať. Preto bol nastavený na hodnotu TREE, čo reprezentuje údaje o jednotlivých stromoch. Ďalšie atribúty tabuľky už nie je potrebné zvlášť editovať nakoľko nie sú ďalej pri tejto metóde vstupu údajov využívané. Napokon bola naplnená i tabuľka INDIVIDUAL obsahujúca detailné charakteristiky na úrovni jednotlivých stromov. Povinnými atribútmi sú: číslo stromu (number), drevina (species) a hrúbka stromu (dbh), ktoré musia byť bezpodmienečne vyplnené. Ostatné atribúty dokáže v prípade ich absencie dogenerovať priamo SIBYLA. Datasetsy z terénnych meraní pomocou zostavy Field-Map poskytli údaje pre naplnenie nasledovných atribútov: stand (označenie porastu), storey (etáž), number (číslo stromu), species (drevina), dbh (hrúbka), h (výška), cd (priemer koruny), ch (výška nasadenia koruny), t (vek), x (súradnica stromu x), y (súradnica stromu y), z (nadmorská výška päty stromu), quality (kvalita), damage (poškodenie), mark (označenie), mortality (vek odumretia stromu). Atribúty cd, ch, t, quality a damage neboli v teréne merané, resp. hodnotené, preto boli naplnené východiskovou hodnotou 0 pri atribútoch cd, ch, t. Pre atribút quality to bol symbol “?” a pri poškodení hodnota -1. Hodnoty týchto 5 neznámych charakteristik boli preto generované rastovým simulátorom SIBYLA. Po naplnení databázy bol spustený modul Generátor, ktorý importované údaje doplnené o chýbajúce (generované) charakteristiky použil na naplnenie tabuliek vstupov rastového simulátora SIBYLA. Terén simulačných plôch bolo možné vytvoriť vďaka informáciám o nadmorskej

výške päty stromov, z ktorých následne modul generátor vytvára reprezentatívny terén simulačnej plochy.

Výsledky

Tabuľky 1 a 2 ponúkajú prehľad spracovaných údajov merania, ktoré poskytujú informácie o výskyte druhov drevín v rámci výskumných plôch, ich počte a základných štatistických charakteristikách. Ako vidieť, plocha 32 disponuje väčšou drevinovou druhovou pestrosťou. Namerané pozície kmeňov a korún stromov sú vizualizované na obr. 3.

Tabuľka 1: Nameraný priemer kmeňa stromu vo výške d 1.30 (DBH) na výskumných plochách
Tab. 1: Average diameter measured at breast height (DBH) within the research plots

Číslo plochy	Druh dreviny (lat.)	Druh dreviny (SK)	Počet	min	max	avg	std
Visolaje 32	<i>Fagus sylvatica</i> L.	Buk lesný	1	26.70	26.70	16.70	0.00
	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Borovica lesná	20	19.40	50.90	37.94	7.94
	<i>Quercus robur</i> L.	Dub letný	8	12.20	22.80	15.80	3.55
	<i>Carpinus betulus</i> L.	Hrab obyčajný	5	11.50	20.20	15.72	3.09
	<i>Acer campestre</i> L.	Javor poľný	6	7.60	17.10	11.28	3.90
	<i>Corylus avellana</i> L.	Lieska obyčajná	1	8.50	8.50	8.50	0.00
	<i>Tilia cordata</i> Mill.	Lipa malolistá	12	7.80	23.40	15.73	4.79
	<i>Picea abies</i> L.	Smrek obyčajný	19	5.70	48.90	26.46	12.44
Visolaje 33	<i>Quercus robur</i> L.	Dub letný	1	35.80	35.80	35.80	0.00
	<i>Carpinus betulus</i> L.	Hrab obyčajný	1	24.60	24.60	24.60	0.00
	<i>Alnus glutinosa</i> Mill.	Jelša lepkavá	24	14.20	43.40	29.57	6.49
	<i>Acer campestre</i> L.	Javor poľný	9	8.90	39.10	26.50	10.90
	<i>Picea abies</i> L.	Smrek obyčajný	8	8.50	91.00	54.30	26.59

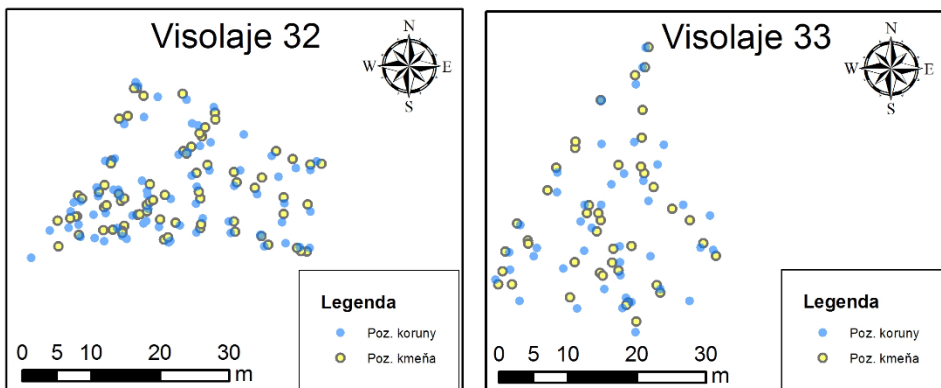
Min, max - minimálna a maximálna nameraná hodnota, avg - priemer, std - smerodajná odchýlka.

Tabuľka 2: Nameraná výška stromu (h) v m na výskumných plochách

Tab. 2: Measured tree height (h) in meters within research plots

Číslo plochy	Druh dreveny (lat.)	Druh dreveny (SK)	Počet	min	max	avg	std
Visolaje 32	<i>Fagus sylvatica</i> L.	Buk lesný	1	19.00	19.00	19.00	0.00
	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Borovica lesná	20	15.40	33.00	25.93	3.92
	<i>Quercus robur</i> L.	Dub letný	8	7.30	14.20	10.73	2.43
	<i>Carpinus betulus</i> L.	Hrab obyčajný	5	9.50	15.20	11.58	2.26
	<i>Acer campestre</i> L.	Javor poľný	6	5.90	12.80	9.98	2.98
	<i>Corylus avelana</i> L.	Lieska obyčajná	1	9.30	9.30	9.30	0.00
	<i>Tilia cordata</i> Mill.	Lipa malolistá	12	8.30	17.40	12.90	2.83
	<i>Picea abies</i> L.	Smrek obyčajný	19	9.60	30.60	20.14	6.76
Visolaje 33	<i>Quercus robur</i> L.	Dub letný	1	20.00	20.00	20.00	0.00
	<i>Carpinus betulus</i> L.	Hrab obyčajný	1	13.80	13.80	13.80	0.00
	<i>Alnus glutinosa</i> Mill.	Jelša lepkavá	24	10.70	28.20	22.06	4.10
	<i>Acer campestre</i> L.	Javor poľný	9	6.20	21.10	15.65	5.44
	<i>Picea abies</i> L.	Smrek obyčajný	8	20.60	38.00	32.24	5.48

Min, max - minimálna a maximálna nameraná hodnota, avg - priemer, std - smerodajná odchýlka.

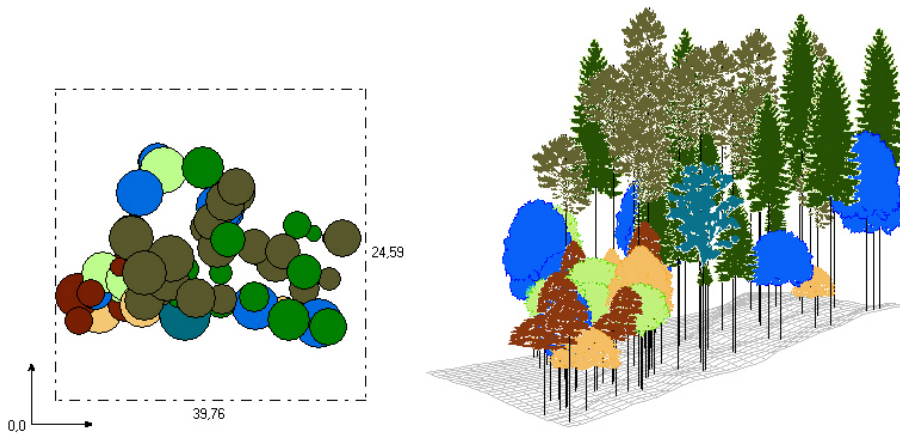


Obz. 3: Pozície kmeňov a korún stromov nameraných zostavou Field-Map

Fig. 3: Positions of trunks and crowns measured by Field-Map

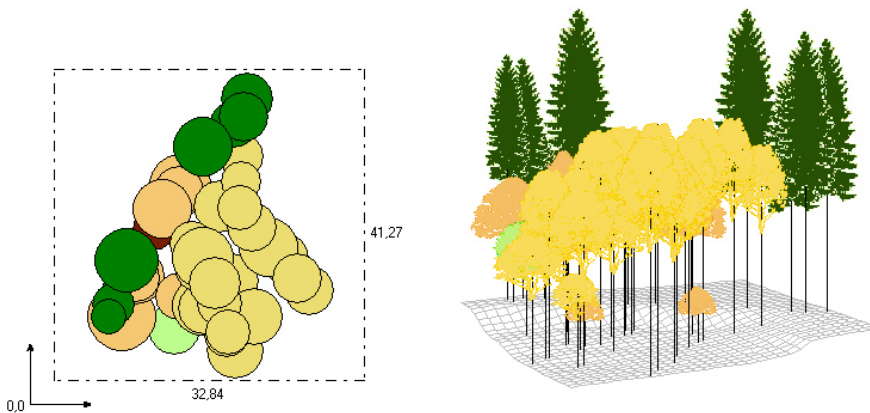
Databáza rastového simulátora SIBYLA po importe údajov a aplikácii modulu Generátor pre generovanie východiskovej štruktúry obsahuje naplnené tabuľky vstupov PLOTS, TERRAIN, SURFACE, SITES, DAMAGE, PROGNOSIS, THINNINGS a INITIAL pre výskumné plochy Visolaje 32 a Visolaje 33 v zmysle databázovej štruktúry

modelu (ETOOLS, 2008). Bol tak vytvorený základ pre ďalšie použitie týchto plôch na účely simulácií rastu lesa. Štruktúry simulačných plôch umiestnené na reprezentatívnej vzorke terénu spolu s horizontálnymi projekciami korún sú zachytené na obr. 4 a obr. 5.



Obr. 4: Vizualizácia iniciálneho stavu simulačnej plochy Visolaje 32 v prostredí rastového simulačného programu SIBYLA

Fig. 4: Visualisation of initial state of simulation plot Visolaje 32 in environment of the SIBYLA growth simulator



Obr. 5: Vizualizácia iniciálneho stavu simulačnej plochy Visolaje 33 v prostredí rastového simulačného programu SIBYLA

Fig. 5: Visualisation of initial state of simulation plot Visolaje 33 in environment of the SIBYLA growth simulator

4. Záver a diskusia

Použitá zostava Field-Map s elektronickým kompasom LTI Mapstar a dĺžkomerom Impulse LR 200 môže byť považovaná za kompromisné riešenie s ohľadom na prácnosť merania a dosahovanú presnosť určenia polohy stromov. Na základe testovania (TOMAŠTÍK, 2015) uvedené pomôcky dosahujú stredné chyby okolo 8,5 cm pri meraní dĺžok a 0,55 stupňa pri meraní azimutov. Pri štandardnom postupe použitia zostavy, kde stanoviská navzájom nadväzujú, dochádza k prenosu chýb, takže polohová chyba bodov v takýchto buzolových ťahoch môže presiahnuť 0,5 metra (TOMAŠTÍK a Žilka, 2013). Preto boli v našom prípade polohy stanovísk určené totálnou stanicou Topcon GPT-3000, takže k prenosu chýb z dôvodu reťazenia stanovísk nedochádzalo. Z praktického hľadiska ale takýto postup môže predstavovať komplikáciu, nakoľko celé meranie nie je možné uskutočniť jednou meračskou pomôckou. Údaje získané zostavou Field-Map predstavujú momentálne najdetailnejší a komplexný prístup vstupu stromových charakteristík do rastového simulátora SIBYLA. Oproti ostatným variantom vstupných údajov (PSL, celoplošné priemerovanie), je úroveň detailu pre zachytenie iniciálnej štruktúry najvyššia nakoľko pracujeme s informáciami až na úrovni jednotlivých stromov. Realistickosť výslednej štruktúry je priamo ovplyvnená množstvom zozbieraných atribútov o jednotlivých stromoch.

Ďalšie potenciálne aplikovateľné zdroje údajov pre rastový simulátor SIBYLA môžu pochádzať z dát získaných novými progresívnymi technológiami a metódami. Tie môžu byť založené na technológii LiDAR a fotogrametrii v rôznych prevedeniach (terestrické, letecké). Spomínané technológie a metódy umožňujú neselektívny zber geopriestorových údajov vo forme bodových mračien, z ktorých je možné odvodiť pozície jednotlivých stromov a vybraných dendrometrických charakteristík. Odhadu hrúbky kmeňov stromov z bodových mračien sa venovalo viacero prác (HUNČAGA et al., 2020; KOREŇ et al., 2020; KOREŇ et al., 2017). Detekciou a odvodzovaním početnosti stromov z pozemného laserového skenovania sa venoval napríklad YANG et al. 2016. Na základe uvedených článkov je zrejme, že z dostatočne detailných bodových mračien je možné odvodiť pozíciu stromu, jeho hrúbku a výšku. Otáznou ostáva stanovenie druhu dreviny ako povinného vstupného údaju pre rastový simulátor. Pre účely stanovenia druhu drevín je možné využiť hyperspektrálne záznamy. Využitím hyperspektrálnych materiálov pri klasifikácii drevinového zloženia sa podarilo klasifikovať od 3 do 17 druhov drevín (7 druhov priemerne) s celkovou správnosťou klasifikácie od 63 – 100 % (87 % priemerne) (FASSNACHT et al., 2016). Kombináciou výstupov hyperspektrálnych materiálov a výstupov odvodených informácií z bodových mračien, by bol tento nedostatok čiastočne eliminovaný. Limitom hyperspektrálnych materiálov je možnosť klasifikovania druhov drevín etáže, ktorej povrch je v čase snímania viditeľný. Nie je preto možné klasifikovať druh dreviny v spodných etážach. V nadväznosti nato by nebolo možné priradiť druh

dreveniny stromu nachádzajúceho sa v spodnej etáži, ktorý bol identifikovaný a odvodený z bodových mračien. Výstupy spomínaných technológií je možné ďalej spracovávať, spájať a odvodzovať tak stromové charakteristiky, ktoré budú taktiež aplikovateľné v rastovom simulátore SIBYLA.

Podakovanie

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Výskum aplikácie prostriedkov umelej inteligencie pri analýzach a klasifikácií dát hyperspektrálneho snímkovania (kód ITMS: NFP313011BWC9) spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Literatúra

- ETOOLS, 2008: Online manuál a popis štruktúry rastového simulátora SIBYLA. Dostupné na: <https://etools.tuzvo.sk/2008>, [navštívené 20.10.2023].
- FABRIKA, M., 2005: Simulátor biodynamiky lesa SIBYLA, koncepcia, konštrukcia a programové riešenie, habilitačná práca, Technická univerzita vo Zvolene, 328 s.
- HUNČAGA, M., CHUDÁ, J., TOMAŠTÍK, J., SLÁMOVÁ, M., KOREŇ, M., CHUDÝ, F., 2020: The Comparison of Stem Curve Accuracy Determined from Point Clouds Acquired by Different Terrestrial Remote Sensing Methods. *Remote Sensing*. 12. 10.3390/rs12172739.
- FASSNACHT FABIAN EWALD, LATIFIB HOOMAN, STEREŇCZAK KRZYSZTOF, MODZELEWSKAC ANETA, LEFSKYD MICHAEL, WASERE LARS T., STRAUBF CHRISTOPH, GHOSH ANIRUDDHA, 2016: Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 186 (2016) 64–87, Article in *Remote Sensing of Environment* · August 2016
- KOREŇ, M., MOKROS, M., BUCHA, T., 2017: Accuracy of tree diameter estimation from terrestrial laser scanning by circle-fitting methods. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 63. 122-128. 10.1016/j.jag.2017.07.015.
- KOREŇ, M., HUNČAGA, M., CHUDÁ, J., MOKROS, M., SUROVÝ, P., 2020: The Influence of Cross-Section Thickness on Diameter at Breast Height Estimation from Point Cloud. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 9. 495. 10.3390/ijgi9090495.
- LIANG, X., KUKKO, A., BALENOVIC, I., SAARINEN, N., JUNTILA, S., KANKARE, V., HOLOPAINEN, M., MOKROŠ, M., SUROVÝ, P., KAARTINEN, L., HONKAWAARA, E., NÄSI, J., HOLLAUS, M., TIAN, J., YU, X., PAN, J., CAI, SH., VIRTANEN, J., WANG, Y., HYYPPÄ, J., 2022: Close-Range Remote Sensing of Forests - The state of the art, challenges, and opportunities for systems and data acquisitions. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine (GRSM)*, 10 (3), p. 32-71.
- PRETZSCH, H., BIBER, P., Ďurský, J., 2002: The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation, *Forest Ecology and Management* 162, p. 3-21.
- Šebeň V., ŠMELKO Š., MERGANIČ J., 2006: Skúsenosti z uplatnenia technológie Field-Map v národnej inventarizácii a monitoringu lesov SR a ich zovšeobecnenie. In: *Envirofórum 2006. Odborné fórum o dostupnosti environmentálnych informácií a využívaní informačných technológií pri ich spracovaní*, 10-20.10.2006, Zvolen, p.175-185
- TOMAŠTÍK, J., 2015: Presnosť buzolového merania s využitím prístrojov používaných v zostavách Field-Map. *Zprávy lesníckeho výzkumu* 60, p. 73-80.
- TOMAŠTÍK, J., ŽILKA, M., 2013: Použitelnosť elektronických pomôcok pre buzolové meranie v lesníckom mapovaní a výskume. *Lesnícky časopis – Forestry journal* 59(2), p. 120-129.
- YANG, B., DAI, W., DONG, Z., LIU, Y., 2016: Automatic Forest Mapping at Individual Tree Levels from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds with a Hierarchical Minimum Cut Method. *Remote Sensing*. 8. 372. 10.3390/rs8050372.

Adresa autorov:
Ing. Peter Valent, PhD.
doc. Ing. Julián Tomašík, PhD.
Ing. et Ing. Šimon Saloň PhD.
prof. Ing. Marek Farbrika, PhD.
prof. Ing. Ján Tuček, CSc.
doc. Mgr. Milan Koreň, PhD.
doc. Ing. Bc. Miroslav Kardoš, PhD.
doc. Ing. Róbert Sedmák, PhD.
Ing. Ján Bahýľ, PhD.

Katedra plánovania lesných zdrojov
a informatiky
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen

ZOSTAVA FIELD-MAP AKO ZDROJ ÚDAJOV PRE RASTOVÝ SIMULÁTOR SIBYLA

Abstrakt

Rôzna úroveň detailu vstupných dát, ktoré sú potrebné pre rastový simulátor SIBYLA, nám poskytuje široký výber aplikovateľných zdrojov. Či už ide o informácie PSL, alebo informácie odvodené z dát získaných technológiami a metódami, ktoré to umožňujú. Jednou z možností je využitie informácií získaných prostredníctvom špecializovanej zostavy Field-Map, ktorá zabezpečuje zber a záznam informácií na najvyššej úrovni detailu. Tá v sebe zahŕňa najvernejšie zachytenie stavu - štruktúry porastu (pozícií stromov a vybraných stromových charakteristík). Článok sa venuje návrhu a posúdeniu metodiky využitia zostavy Field-Map pri zbere údajov a informácií na úrovni jednotlivých stromov pre rastový simulátor SIBYLA. Súčasťou publikácie je opis postupu merania údajov v teréne, ako aj metodika importu nameraných údajov do rastového simulátora. V rámci metodiky je podrobne charakterizovaná dátová štruktúra importného súboru, jeho napojenia na rastový simulátor a vzájomné súvislosti. Pre tieto potreby boli na lokalite Visolaje zostavou Field-Map zmapované dve plochy. Na plochách sa zaznamenávali súradnice pozície kmeňa a koruny stromu, druh dreviny, výška – h a hrúbka v d 1.30. Namerané pozície jednotlivých stromov s prislúchajúcimi informáciami boli georeferencované do systému jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej (S-JTSK). Na prvej ploche s označením 32 s rozlohou 0,20 ha bolo zameraných 72 pozícií stromov. Na druhej ploche s označením 33 s rozlohou 0,32 ha bolo zameraných 43 pozícií stromov. Z hľadiska počtu druhov drevín bolo na ploche 32 zaznamenaných 8 druhov drevín a na ploche 33 – 5 druhov drevín. Namerané a spracované údaje boli následne vizualizované v programe ArcMap (pozície kmeňov a korún stromov) a po ukončení importu aj v prostredí rastového simulátora SIBYLA. Na základe výsledkov možno demonštrovať využitie zostavy Field-Map s elektronickým kompasom LTI Mapstar a dĺžkomerom Impulse LR 200 pri zbere údajov, ktoré zabezpečujú požadovanú úroveň detailu pre potreby rastového simulátora.

Kľúčové slová: mapovanie, databáza, rastový model, štruktúra lesa