

VPLYV VYBRANÝCH METEOROLOGICKÝCH FAKTOROV NA NÁSTUP VŠEOBECNÉHO KVITNUTIA LESNÝCH BYLÍN

EFFECT OF SELECTED METEOROLOGICAL VARIABLES ON ONSET OF FULL FLOWERING OF THE FOREST HERBS

Martin KUBOV^{1,2}, Branislav SCHIEBER^{1*}, Rastislav JANÍK¹

¹Ústav ekológie lesa SAV, L. Štúra 2, 960 53 Zvolen
e-mail: schieber@ife.sk

²Katedra integrovanej ochrany lesa a krajiny, Lesnícka fakulta, Technická univerzita
vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen
e-mail: kubov@ife.sk

Abstract: *At present, the temperate forest ecosystems are endangered by both abiotic and biotic factors. The effects of abiotic components, e.g., meteorological variables are constantly studied. However, we still don't know the mechanisms affecting the phenology of plants in detail. Two meteorological variables (air temperature and cumulative precipitation) during the period 1995–2020 were analysed to find the factor which has more significant effect on onset of the full-flowering (FF) phenophase. The set of nine forest herbs, representing different phenological groups from the viewpoint of flowering, was examined (early spring - *Petasites albus* and *Pulmonaria officinalis*, mid-spring - *Carex pilosa* and *Dentaria bulbifera*, late spring - *Fragaria vesca* and *Galium odoratum*, early-summer - *Veronica officinalis*, mid-summer - *Mycelis muralis* and late summer - *Campanula trachelium*). In addition, temperature sum requirements as well as the temporal trends for onset of FF were studied. The research was done at Ecological Experimental Station in Kremnické vrchy Mts. (Central Slovakia) at altitude of 500 m a.s.l. Our results showed that the air temperature correlated more significantly with the dating of onset of FF ($r > 0.6$, $P < 0.001$), compared to the precipitation. Temporal trends in the onset of FF over the last 26 years confirmed the shifts to the earlier dates for most species (excepting early-spring *Petasites albus*), however the trends were statistically significant ($P < 0.05$) for five examined species (*Carex pilosa*, *Dentaria bulbifera*, *Fragaria vesca*, *Veronica officinalis* and *Mycelis muralis*).*

Key words: *air temperature sum, precipitation, flowering phenology, correlation analysis, temporal trend*

Úvod

V posledných desaťročiach sú klimatické a environmentálne zmeny považované za jednu z najdôležitejších hybných síl zmien v distribúcii a množstve rastlinných druhov v európskych lesoch (Amano et al., 2010). Klíma ovplyvňuje štruktúru a funkciu drevín, najmä rast a produktivitu lesných ekosystémov (Boisvenue, Running, 2006). Zmena

klímy môže spôsobiť geografické alebo vertikálne posuny biotopov pre niektoré druhy rastlín (Kozyr, 2014; Cheddadi et al., 2016; Ďurský et al., 2006). Rastúca teplota vo všeobecnosti predlžuje vegetačné obdobie (Montgomery et al., 2020). V zásade by to mohol byť pozitívny jav na zvýšenie produktivity a nových možností výsadby v lesných podmienkach. Na druhej strane existuje možné nebezpečenstvo neskorých jarných mrazov (Schieber et al., 2017) alebo zvyšujúce sa riziko škôd zapríčinených škodcami, suchom, horúcimi vlnami a s nimi súvisiacimi požiarimi a pod. (Sierota et al., 2019; Lukasová et al., 2020, 2021).

Ak sa zameriame na európske lesné ekosystémy, naše poznatky sa týkajú najmä vplyvov klímy a lesného hospodárstva na stromovú zložku (Kirschbaum, 2020). Vplyv globálnej zmeny klímy je však viditeľný aj na lesných druhoch bylinnej vrstvy, ktoré sú citlivejšie na zmeny prostredia v porovnaní s dlhovekými stromami (Hartl-Meier et al., 2014). Z tohto dôvodu sa kvitnutie bylín považuje za dôležitý bioindikátor súčasných zmien prebiehajúcich v ekosystémoch (Rafferty, 2020). Podľa Bottlíkovej (1975) predstavuje kvitnutie rastlín fázu životného cyklu rastlín, ktorá sa vo všeobecnosti považuje za dobrý indikátor ekologických podmienok prostredia. Kvitnutie môže odrážať individuálnu kondíciu rastlín a biodiverzitu prostredníctvom biologických aktivít, ako je opelenie, šírenie semien a klíčenie (Davies et al., 2013). Preto je kvitnutie, ktoré predstavuje generatívnu fázu životného cyklu rastliny, nevyhnutné pre šírenie génov. Posuny v načasovaní kvitnutia lesných bylín sú dobre zdokumentované (Lee et al., 2020; Jiang et al., 2021). Vo všeobecnosti je kvitnutie determinované vonkajšími faktormi, ako aj vnútornou periodicitou druhu. Túto skutočnosť podporujú niektoré štúdie, v ktorých sa uvádza, že dátumy kvitnutia významne korelovali s teplotou vzduchu (Hájková et al., 2021). Nízke teploty objavujúce sa na začiatku vegetačného obdobia zvyčajne brzdia nástup kvitnutia. Na rozdiel od vegetatívneho vývoja je kvitnutie limitované špecifickými klimatickými (environmentálnymi) a stanovištnými podmienkami. Viaceré štúdie uvádzajú, že pri kvitnutí niektorých rastlín hrajú dôležitú úlohu aj iné faktory ako sú napr. fotoperiódou alebo jarovizácia (Song et al., 2015). Podľa Chauhan et al. (2019) je kvitnutie ovplyvnené aj vlhkosťou vzduchu a pôdy. McMaster a Wilhelm (1998) zistili, že vlhkosť a teplota pôdy ovplyvnili skoro kvitnúce druhy. Len obmedzený počet štúdií sa zamerail na dlhodobé trendy vo fenológii kvitnutia bylín (Mo et al., 2017). Fenologické údaje z konkrétnej lokality môžu byť cenné, ak existujú ako súčasť relatívne dlhého obdobia (zvyčajne viac ako 20 rokov). Analýza týchto údajov by mohla potvrdiť silu a smer posunov nástupu kvitnutia bylín v čase.

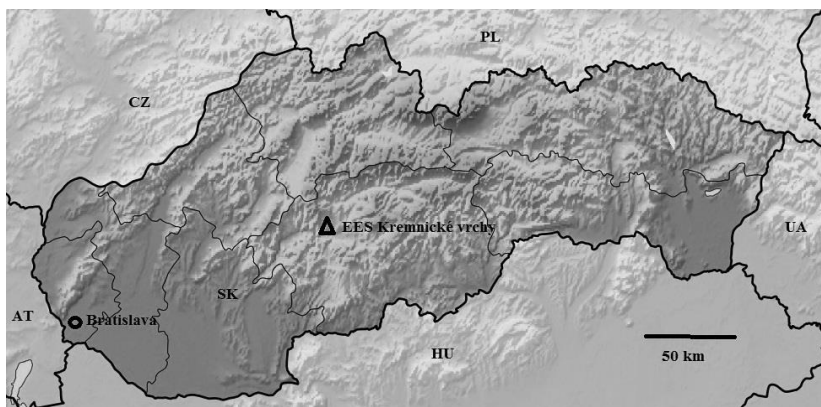
Naša hypotéza bola nasledujúca: (1) teplota vzduchu má výraznejší vplyv na nástup všeobecného kvitnutia (VK) v porovnaní so zrážkami pri všetkých skúmaných druhov a (2) časový posun nástupu VK je rovnaký vo všetkých fenologických skupinách. Hlavné ciele tohto príspevku boli nasledovné: (1) analyzovať nástup VK vybraných lesných bylín, reprezentujúcich rôzne fenologické skupiny, v období rokov 1995 – 2020; (2) nájsť vzťahy medzi dvoma meteorologickými premennými (teplota vzduchu a zrážky) a nástupom VK a (3) vyhodnotiť trend nástupu VK pre skúmané druhy v rokoch 1995 – 2020.

Použité metódy

Popis lokality

Výskum sa uskutočnil na Ekologickej experimentálnej stanici (EES) Kremnické vrchy (Západné Karpaty, Slovensko), ktorá bola založená v roku 1986 (obr. 1). V súčasnosti je súčasťou medzinárodnej siete pre dlhodobý ekologický výskum (LTER). EES sa nachádza v Suchej doline (48°38'N, 19°04'E) s nadmorskou výškou 450 – 520 m n.m. na juhozápadnom svahu 5 – 15°. Pôdny typ je kambizem andozemná s vysokým obsahom skeletu (20 – 60 %) a mierne kyslou reakciou (pH 5,4 – 6,4). Lesná vegetácia patrí k dvom lesným typom – *Querceto-Fagetum* a *Fagetum pauper inferiora*. Dominantnou drevinou (85 – %) na lokalite je 125-ročný buk (*Fagus sylvatica* L.). Pridruženými druhmi sú jedľa (*Abies alba* Mill.), hrab (*Carpinus betulus* L.), lipa (*Tilia cordata* Mill.) a dub (*Quercus dalechampii* Ten). K stálym druhom bylinného poschodia patria druhy ako *Carex pilosa* Scop., *Dentaria bulbifera* L., *Galium odoratum* (L.) Scop., *Pulmonaria officinalis* L., *Fragaria vesca* L. a *Veronica officinalis* L. (Križová, 1993). Viac informácií o EES je uvedených v práci Kubov et al. (2019).

Obr. 1: Lokalizácia výskumnej plochy v rámci Slovenska



Oblasť EES patrí do mierne teplej oblasti a mierne teplej a vlhkej pahorkatinnej podoblasti (Lapin et al., 2002). Dlhodobé klimatické údaje za obdobie rokov 1951–1980 a 1995–2020 boli prevzaté z najbližšej profesionálnej meteorologickej stanice Sliac, ktorú spravuje Slovenský hydrometeorologický ústav. Dlhodobý priemer (1951–1980) ročnej teploty vzduchu je približne 7,8 °C, s mesačným priemerom 18,1 °C v najteplejšom mesiaci (júl) a –4,0 °C v najchladnejšom mesiaci (január). Priemerný ročný úhrn zrážok je 698 mm (Střelec, 1992). V posledných desaťročiach bola pozorovaná rastúca kladná odchýlka od priemernej ročnej teploty vzduchu o +1,3 °C (od 7,8 °C do 9,1 °C). Ročné zrážky sa však výrazne nezmenili, pozorovali sa oscilácie okolo dlhodobého priemeru (Schieber et al., 2017). Od roku 2010 sú vybrané meteorologické veličiny (teplota vzduchu a pôdy, globálna radiácia, zrážky) merané vlastnými klimatickými mikrostanicami, ktoré sú vybavené dataloggermi Minikin (výrobca: EMS Brno, ČR) a zrážkovými kolektormi.

Fenologické pozorovania

Pozorovali sme deväť druhov bylín z rôznych fenologických skupín (podľa Bottlikovej, 1975): skoré jarné druhy – *Petasites albus* a *Pulmonaria officinalis*, druhy plnej jari - *Carex pilosa* a *Dentaria bulbifera*, neskoré jarné druhy – *Fragaria vesca* a *Galium odoratum*, skorý letný druh – *Veronica officinalis*, druh plného leta – *Mycelis muralis* a neskorý letný druh – *Campanula trachelium*. Druhy, ktoré sme do analýz vybrali, museli spĺňať podmienku dostatočného počtu jedincov, ich dobrej vitality a perzistencie počas celého obdobia výskumu na sledovanej lokalite. Kritériá pre výber druhov boli nasledovné: Druhové názvoslovie je uvedené podľa Marholda a Hindáka (1998).

Fenologický výskum začínal vždy na začiatku jari v závislosti od topenia snehovej pokrývky v období 1995 – 2020. Pozorovania sa zvyčajne robili dvakrát alebo trikrát týždenne na súbore 30 jedincov z každého druhu s dobrou vitalitou. Metodika fenologických pozorovaní bola vytvorená podľa metodiky používanej SHMÚ pre dlhodobý monitoring lesných rastlín (Braslavská, Kamenský, 1996). Za nástup fenofázy VK sa považoval dátum, keď aspoň 50 % jedincov (alebo výhonkov) malo takmer všetky otvorené kvety. Táto fáza je totožná s fázou BBCH 65 v škále BBCH navrhnutej Meierom (2001). Za jedinca sa považoval jeden výhonok (*Dentaria bulbifera*, *Galium odoratum*, *Veronica officinalis*) alebo jedna rastlina (*Pulmonaria officinalis*, *Mycelis muralis*, *Campanula trachelium*). Kalendárne dátumy nástupu VK sa pretransformovali na juliánske dni – deň v roku (DOY).

Metóda výpočtu súm priemernej mesačnej teploty a kumulovaných zrážok

V korelačnej analýze, zameranej na vzťah medzi VK a teplotou vzduchu za obdobie 1995 – 2020 sme použili kumulovanú pozitívnu priemernú mesačnú teplotu vzduchu (CPAMAT) vypočítanú za rôzne obdobia relevantných mesiacov s ohľadom na fenologický vývoj jednotlivých druhov (Braslavská, Borsányi, 1996). Kumulované zrážky predstavujú súčet mesačných úhrnov zrážok za konkrétne obdobie.

Štatistické analýzy

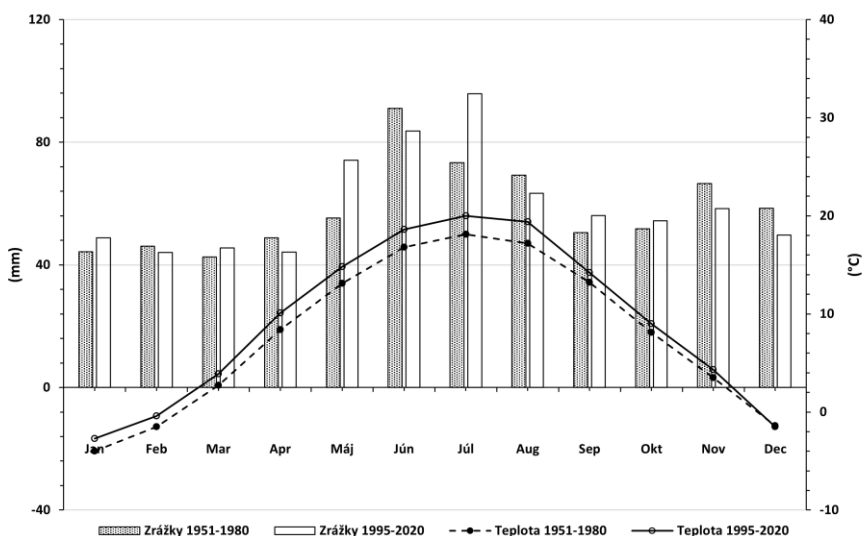
Štatistické analýzy boli robené v programe R (R Core Team, 2017). Významnosť rozdielov bola hodnotená pomocou metódy ANOVA, po ktorej nasledoval post hoc test (Tukeyho HSD test, s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$). Homogenita rozptylu bola hodnotená Bartlettovým testom. Miera korelácie dvoch premenných, dátum VK (ako DOY) *verzus* teplota alebo zrážky počas relevantných období, bola vyjadrená Pearsonovým korelačným koeficientom a bolo určené obdobie s najvyššou mierou korelácie (Evans, 1996). Štatistickú významnosť časových trendov sme posúdili pomocou Mann-Kendallovho trendového testu.

Výsledky

Analyza teploty a zrážok

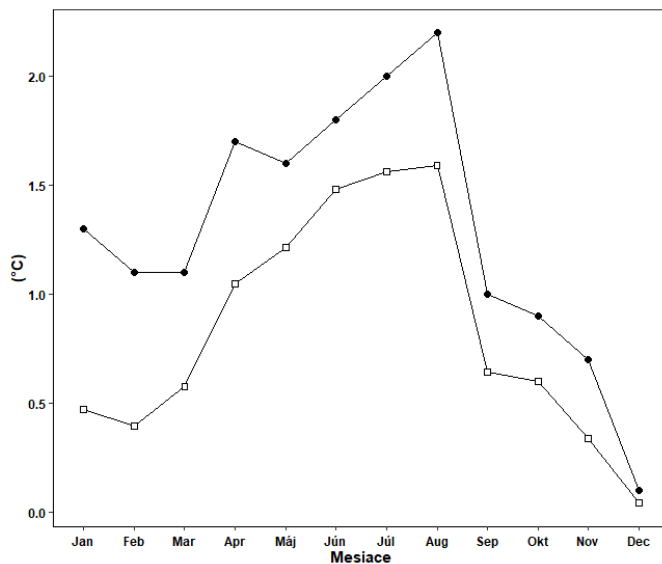
Na obr. 2 sú znázornené zmeny priemernej mesačnej teploty vzduchu a mesačných úhrnov zrážok medzi dvoma obdobiami 1951–1980 (dlhodobý priemer) a sledovaným obdobím 1995 – 2020. Analýza údajov ukázala, že priemerná ročná teplota sa v rokoch 1995 – 2020 v porovnaní s dlhodobým obdobím zvýšila o 1,3 °C. Vo všetkých mesiacoch v období apríl – august bola mesačná teplota vzduchu výrazne vyššia ($p > 0,05$) v rokoch 1995 – 2020.

Obr. 2: Časové zmeny priemernej mesačnej teploty vzduchu a priemerných mesačných úhrnov zrážok medzi rokmi 1951 – 1980 a sledovaným obdobím 1995 – 2020 na stanici Sliac

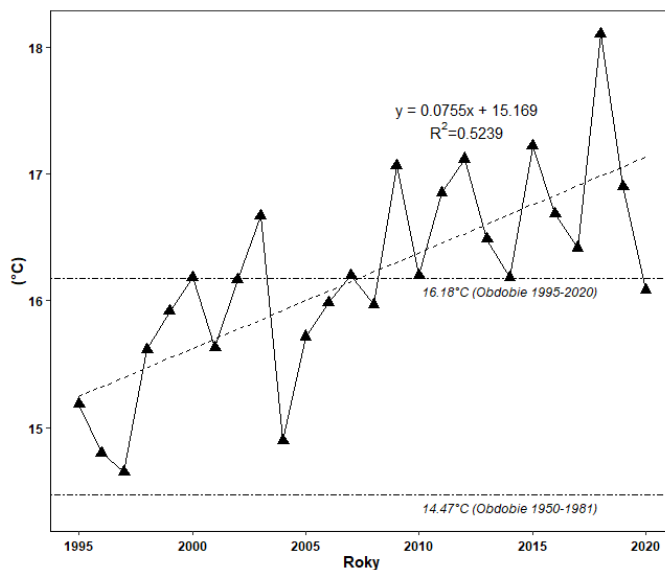


Hodnoty priemernej mesačnej teploty vzduchu sa kladne odchyľovali od dlhodobého priemeru u všetkých mesiacov roka (obr. 3). Navyše, trend teploty počas vegetačného obdobia (od 1. apríla do 30. septembra) ukázal nárast o 1,7 °C (obr. 4). Ročné úhrny zrážok počas sledovaného obdobia stúpili o 4,18 % (30,3 mm). Naproti tomu mesačné úhrny zrážok v sledovanom období 1995 – 2020 boli štatisticky nevýznamne nižšie v siedmich mesiacoch (február, apríl, jún, august, november a december) v porovnaní s obdobím 1951 – 1980. Kumulatívne úhrny zrážok vo vegetačnom období boli vyššie o 7,84 % (32,8 mm).

Obr. 3: Absolútna (Δ , horná čiara) a štandardizovaná ($\Delta / \text{STD.}$, dolná čiara) odchýlka medzi priemernou mesačnou teplotou vzduchu (1995 – 2020) a dlhodobým priemerom (1951 – 1980) na Sliachi



Obr. 4: Lineárny trend priemernej teploty vzduchu počas vegetačného obdobia (apríl – september) na Sliachi od roku 1995 do roku 2020



Medziročná variabilita a časové trendy nástupu VK v období 1995 – 2020

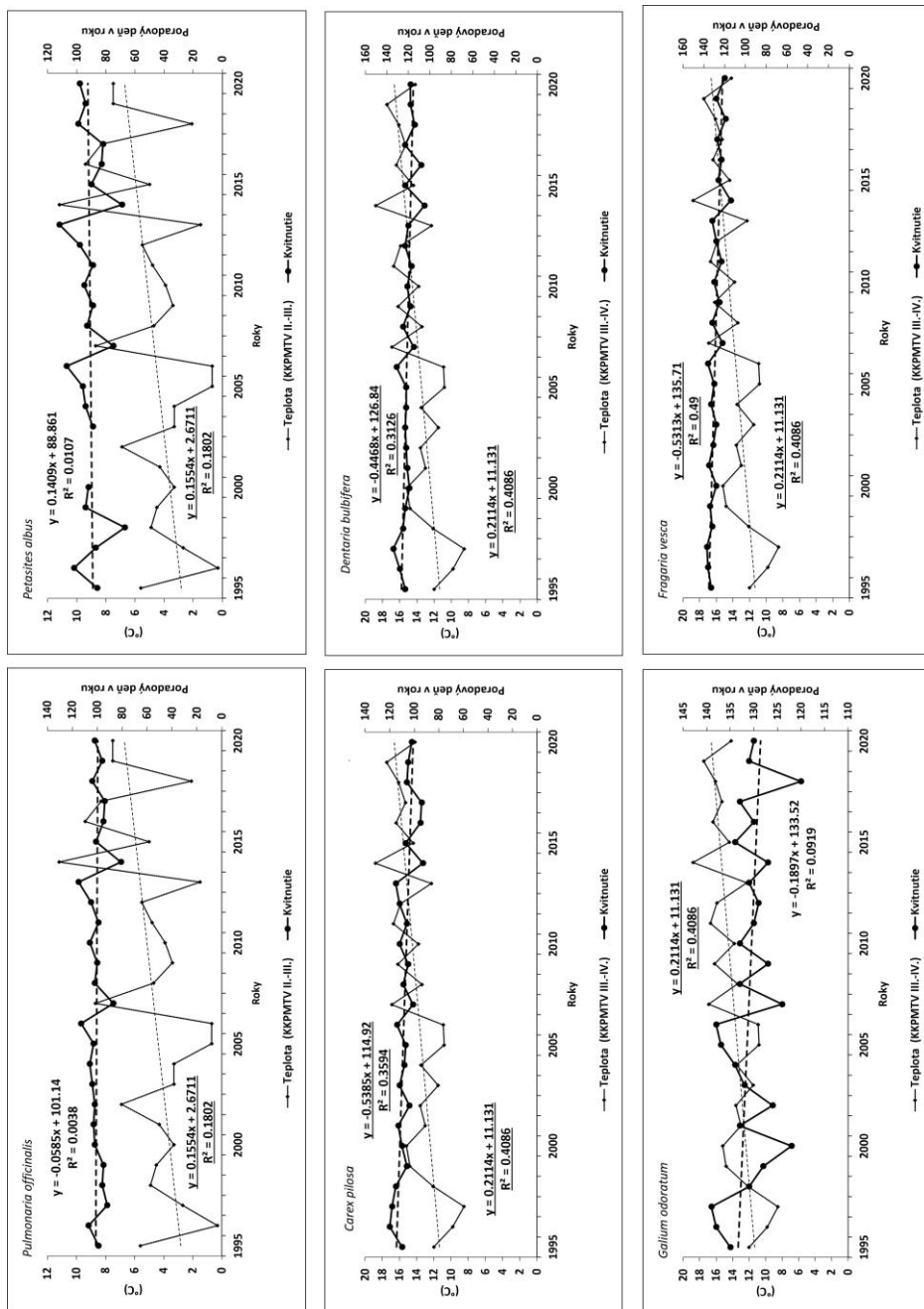
Základné štatistické údaje nástupu VK sú uvedené v tabuľke 1. Najskorší nástup bol v priemere pozorovaný u *Petasites albus* (91. DOY), zatiaľ čo najneskorší bol zistený u *Campanula trachelium* (203. DOY). Najvyššia hodnota variačného rozpätia bola zistená u *Petasites albus* (45 dní), najnižšia u *Galium odoratum* (19 dní). Podobne najvyššia medziročná variabilita v nástupe VK bola pozorovaná u *Petasites albus* (CV = 11,63 %). Táto variabilita sa medzi fenologickými skupinami postupne znižovala, najnižšiu hodnotu CV dosiahol letný druh – *Mycelis muralis* (CV = 2,68 %).

Tab. 1: Základné štatistické charakteristiky nástupu všeobecného kvitnutia počas obdobia 1995–2020. (DOY = poradový deň v roku, STDE = štandardná chyba, VR = variačné rozpätie, CV = variačný koeficient)

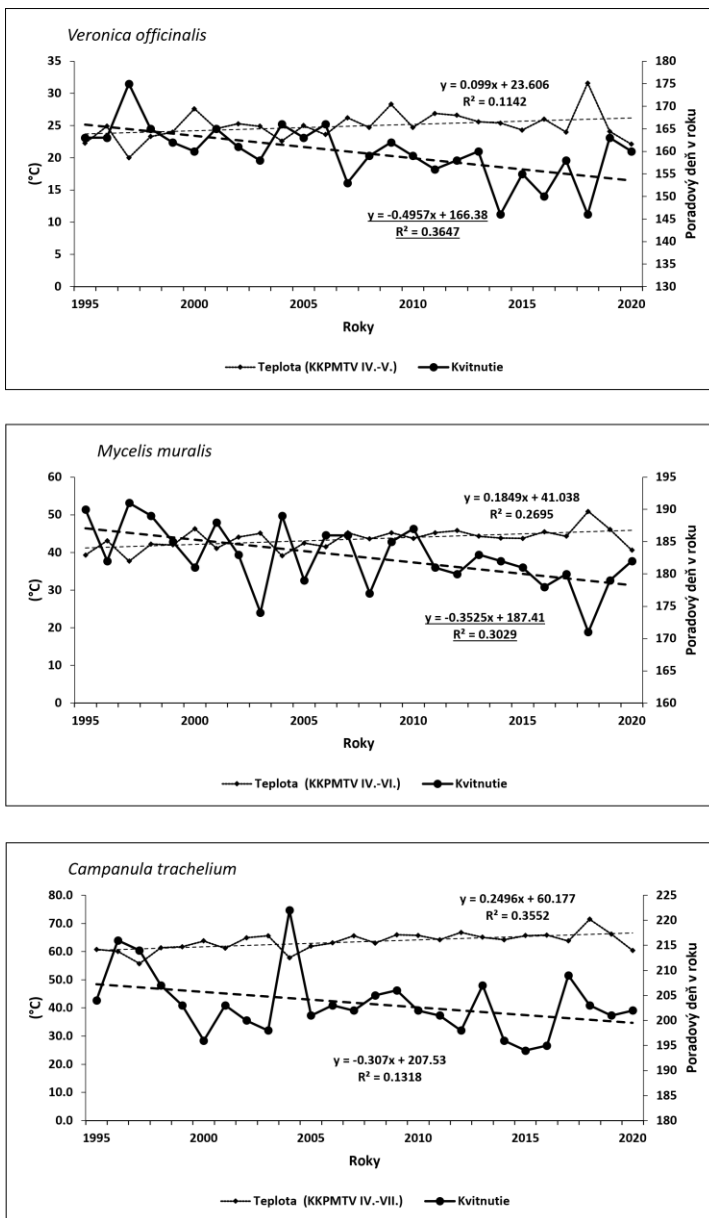
Fenologická skupina	Druhy	Najskorší nástup DOY (roky)	Najneskorší nástup DOY (roky)	Priemer (DOY)	STDE (days)	VR (days)	CV (%)
Skorá jar	<i>Petasites albus</i>	67 (1998)	112 (2013)	90,83	10,57	45	11,63
	<i>Pulmonaria officinalis</i>	81 (2014)	115 (2013)	100,35	7,26	34	7,24
Plná jar	<i>Carex pilosa</i>	93 (2014)	120 (1996)	107,65	6,87	27	6,38
	<i>Dentaria bulbifera</i>	105 (2014)	134 (1997)	120,81	6,11	29	5,06
Neskorá jar	<i>Fragaria vesca</i>	114 (2014)	137 (1997)	128,54	5,81	23	4,52
	<i>Galium odoratum</i>	120 (2018)	139 (1997)	130,96	4,79	19	3,66
Skoré leto	<i>Veronica officinalis</i>	146 (2018)	175 (1997)	159,69	6,28	29	3,93
Plné leto	<i>Mycelis muralis</i>	171 (2018)	191 (1997)	182,65	4,90	20	2,68
Neskoré leto	<i>Campanula trachelium</i>	194 (2015)	222 (2004)	203,38	6,47	28	3,18

Najskoršie výskyty nástupu boli väčšinou zistené v rokoch 2014 alebo 2018, zatiaľ čo najneskoršie boli najčastejšie pozorované v roku 1997. Časové trendy nástupu VK za obdobie 1995 – 2020 potvrdili posuny ku skorším dátumom pre všetky druhy (okrem *Petasites albus*). Najmenší posun bol zistený pri druhu *Pulmonaria officinalis* (2 dni), pri ostatných jarných druhoch to bolo 4 – 8 dní. V prípade letných druhov sa nástup kvitnutia posunul k skorším termínom výraznejšie, pri *Campanula trachelium* o 7 dní, pri *Mycelis muralis* o 8 dní a pri druhu *Veronica officinalis* o 12 dní (obr. 5 – 6).

Obr. 5: Trendy nástupu všeobecného kvitnutia jarných druhov a priebeh kumulovanej teploty v obdobiach rozhodujúcich pre nástup kvitnutia v rokoch 1995 až 2020. Štatisticky významné ($P < 0,05$) trendy sú označené podčiarknutím



Obr. 6: Trendy nástupu všeobecného kvitnutia letných druhov a priebeh kumulovanej teploty v obdobiach rozhodujúcich pre nástup kvitnutia v rokoch 1995 až 2020. Štatisticky významné ($P < 0,05$) trendy sú označené podčiarknutím



Nástup kvitnutia vo vzťahu ku kumulovanej kladnej priemernej mesačnej teplote vzduchu (CPAMAT)

Vzťahy medzi nástupom VK a CPAMAT sú uvedené v tabuľke 2. V rámci tejto korelácie boli medzi fenologickými skupinami zistené relatívne malé rozdiely. Čo sa týka skorých jarných druhov, analýza potvrdila silnú negatívnu koreláciu medzi nástupom fenofázy a CPAMAT, korelačný koeficient (r) sa pohyboval od 0,66 (*Petasites albus*) do 0,75 (*Pulmonaria officinalis*). Obidva extrémne dátumy nástupu VK, najskorší a najneskorší, boli pozorované v rokoch s najvyššími (resp. takmer najvyššími) alebo najnižšími (resp. takmer najnižšími) sumami CPAMAT za príslušné obdobie február–marec. Najskorší začiatok kvitnutia u *Pulmonaria officinalis* bol zistený v roku 2014, v ktorom bola vypočítaná najvyššia hodnota CPAMAT (11,2 °C). Na druhej strane, najneskorší nástup bol pozorovaný v rokoch 2006 a 2013, kedy bol CPAMAT najnižší (0,7 °C, resp. 1,5 °C). Podobne to bolo aj u druhého skoro-jarného druhu *Petasites albus*. V prípade druhov plnej jari (*Carex pilosa* a *Dentaria bulbifera*) bol vzťah medzi nástupom VK a teplotou vzduchu ešte tesnejší (silná alebo veľmi silná korelácia) v porovnaní so skorými jarnými druhmi. Korelačné koeficienty dosahovali hodnoty 0,75 (*Carex pilosa*) a 0,82 (*Dentaria bulbifera*). U oboch druhov bol pozorovaný najskorší termín kvitnutia v tom istom roku, v ktorom bola zaznamenaná najvyššia suma CPAMAT za obdobie marec–apríl (rok 2014, 18,8 °C). Najneskorší výskyt fenofázy bol pozorovaný v rokoch 1996 (*Carex pilosa*) a 1997 (*Dentaria bulbifera*), kedy sme zistili najnižšie sumy CPAMAT (9,8 °C, resp. 8,5 °C). Čo sa týka neskorých jarných druhov, koreláciu možno definovať ako silnú, korelačné koeficienty sa pohybovali od 0,72 (*Galium odoratum*) do 0,78 (*Fragaria vesca*). Najskorší výskyt kvitnutia pre oba druhy nebol zaznamenaný v tom istom roku, ale najneskorší bol zistený v roku s najnižšou hodnotou CPAMAT (rok 1997, 8,5 °C). Čo sa týka letnej fenologickej skupiny, korelácia medzi teplotou a začiatkom kvitnutia bola tiež silná, korelačný koeficient (r) dosiahol hodnoty 0,62 (*Campanula trachelium*), 0,67 (*Veronica officinalis*) a 0,77 (*Mycelis muralis*). Najskorší výskyt kvitnutia u dvoch letných druhov (*Veronica officinalis* a *Mycelis muralis*) bol zaznamenaný v roku 2018, kedy bola zaznamenaná najvyššia hodnota CPAMAT za príslušné obdobie. Na druhej strane, najneskorší nástup bol zaznamenaný v roku 1997 s najnižšou sumou mesačných teplôt. Druh *Campanula trachelium* sa odlišoval, extrémne dátumy kvitnutia boli zistené v iných rokoch v porovnaní s vyššie uvedenými druhmi. Vzťah medzi CPAMAT a extrémnymi hodnotami nástupu VK bol však podobný ako to bolo v prípade predchádzajúcich druhov.

Nástup kvitnutia vo vzťahu ku kumulovaným zrážkam

V tabuľke 2 sú uvedené aj korelácie medzi nástupom fenofázy VK a kumulovanými zrážkami počas rôznych období pred nástupom priemerného dátumu kvitnutia jednotlivých druhov. Zistili sme nízku koreláciu medzi kumulovanými zrážkami a nástupom VK v rámci druhov skorej a plnej jari. Na druhej strane, neskoré jarné druhy (*Galium odoratum* a *Fragaria vesca*) medzi dátumom kvitnutia a kumulatívnymi zrážkami v apríli mali stredný stupeň korelácie ($r > 0,4$). Čo sa týka letných druhov, stredný stupeň korelácie sme za obdobie apríl – jún zaznamenali len u neskorého letného druhu – *Campanula trachelium*. Termíny kvitnutia u druhov skorého (*Veronica officinalis*) a plného leta (*Mycelis muralis*) korelovali so zrážkami len slabô.

Tab. 2: Korelácia (*r*- hodnoty) medzi nástupom VK a vybranými meteorologickými premennými v období 1995 – 2020 (hladina významnosti - *** $P < 0,001$, ** $P < 0,1$, * $P < 0,05$)

Fenologická skupina	Druhy	Obdobie	Teplota	Zrážky
Skorá jar	<i>Petasites albus</i>	II.–III.	-0,658***	0,207
		III.	-0,542**	0,204
	<i>Pulmonaria officinalis</i>	II.–III.	-0,745***	0,08
		III.	-0,682***	0,164
Plná jar	<i>Carex pilosa</i>	III.–IV.	-0,751***	0,255
		IV.	-0,289	0,309
	<i>Dentaria bulbifera</i>	III.–IV.	-0,816***	0,114
		IV.	-0,617***	0,357
Neskorá jar	<i>Galium odoratum</i>	III.–IV.	-0,719***	0,087
		IV.	-0,663***	0,443*
	<i>Fragaria vesca</i>	III.–IV.	-0,78***	0,322
		IV.	-0,55**	0,484*
Skoré leto	<i>Veronica officinalis</i>	IV.–V.	-0,672***	0,108
		V.	-0,43*	0,076
Plné leto	<i>Mycelis muralis</i>	IV.–VI.	-0,771***	0,357
		V.–VI.	-0,735***	0,288
		VI.	-0,597**	0,28
Neskoré leto	<i>Campanula trachelium</i>	IV.–VI.	-0,488*	0,515**
		IV.–VII.	-0,612***	0,268
		V.–VII.	-0,619***	0,121
		VII.	-0,492*	0,347

Diskusia

Predpokladáme, že medziročná variabilita v načasovaní nástupu VK druhov je odrazom prirodzenej medziročnej variability v meteorologických podmienkach medzi rokmi, ako aj globálnej (lokálnej) zmeny klímy počas sledovaného obdobia (1995 – 2020). Najskoršie výskyty VK boli zaznamenané u väčšiny druhov za posledných 10 rokov (2011–2020). Môže to súvisieť so skutočnosťou, že toto desaťročie bolo najteplejším zaznamenaným desaťročím v pretrvávajúcom dlhodobom trende klimatických zmien (WMO, 2020). Naše zistenia sú v súlade s týmto faktom. V skúmanej lokalite bola priemerná teplota vzduchu za toto obdobie 9,9 °C, pričom počas prvej dekády pozorovaní (1995 – 2004) to bolo len 8,5 °C. Meteorologické podmienky prvej pentády (1995 – 1999) boli v porovnaní s posledným desaťročím drsnejšie (relatívne chladno a vlhko). Môže to byť jeden z dôvodov, prečo sme najneskorší nástup VK u väčšiny druhov pozorovali v rokoch 1996 a 1997. Najvyššiu variabilitu v nástupe VK zaznamenali skoré jarné druhy *Pulmonaria officinalis* (CV = 11,63 %) a *Petasites albus* (CV = 7,24) %. Podobné zistenie uvádza Fitter et al. (1995), keď skupina skoro kvitnúcich druhov bola najvariabilnejšia (štandardná odchýlka bola vyššia ako 4,8 dňa). Na druhej strane sme zistili, že variabilita

kontinuálne klesala smerom k letným druhom ($CV < 4\%$). Toto zistenie nekorešponduje s výsledkami Miller-Rushinga et al. (2008), ktorí zistili, že skoro kvitnúce druhy pozorované v Massachusetts (USA) vykazovali menšiu medziročnú variabilitu v porovnaní s neskoro kvitnúcimi druhmi. Na základe Bottlíkovej (1975) sme predpokladali, že táto vlastnosť môže byť spôsobená menej premenlivými klimatickými podmienkami počas jari v porovnaní s podmienkami v strednej Európe. Klíma strednej Európy sa vyznačuje pomerne silnými a rýchlymi zmenami meteorologických podmienok počas jarného obdobia s náhlymi prílevmi studenej vzdušnej hmoty zo severných zemepisných šírok. Napriek tomu, že skoré jarne druhy sú dobre adaptované na špecifické podmienky prostredia, napr. znášajú nízko-teplotný režim, produkujú väčšie viacročné orgány alebo majú vyššiu rýchlosť fotosyntézy (Shorina, Smirnova, 1995; Lapointe, Lerat, 2006), vyššie uvedené drsné podmienky sa môžu prejavovať vyššou variabilitou v nástupe VK v rámci tejto fenologickej skupiny. Naše zistenie, že časové trendy nástupu VK boli pre všetky druhy (okrem *Petasites albus*) posunuté k skorším dátumom, je v súlade s výsledkami publikovanými v práci Chmielewski et al. (2004). Predpokladáme, že to súviselo so stúpajúcou teplotou vzduchu počas vegetačného obdobia (obr. 4). Na druhej strane skoré jarne druhy boli viac ovplyvnené zvýšenou medziročnou variabilitou teploty vzduchu na začiatku vegetačného obdobia. Publikované štúdie sa predovšetkým zameriavali na dreviny mierneho klimatického pásma, ktoré si vyžadujú určité obdobie s nízkymi teplotami, po ktorom nasleduje obdobie s vyššími teplotami (Babálová et al., 2018). Tento chod teploty vyústí do pučania, rozvitia listov a kvitnutia (Lee et al., 2020). Avšak práce študujúce zmeny v načasovaní nástupu VK u bylín počas vegetačného obdobia sú zriedkavé. Načasovanie kvitnutia bylín je do značnej miery neznáme, ale môže relatívne úzko súvisieť s teplotou a zrážkami, prípadne s ich vzájomnými interakciami (Gordo, Sanz, 2005). Naše výsledky ukázali, že obdobie, rozhodujúce pre načasovanie kvitnutia, je špecifické pre každú fenologickú skupinu. Napríklad CPAMAT za obdobie február až marec koreluje s nástupom VK u skorých jarých druhov lepšie, ako je to v prípade, keď sa do analýzy zahrnie len jeden mesiac (marec). Ak sú priaznivé klimatické podmienky, skoré jarne druhy často začínajú svoju fyziologickú aktivitu už koncom zimy. Pokiaľ ide o druhy skorej a neskorej jari, najvyššia korelácia ($r > 0,7$) medzi CPAMAT a nástupom VK bola zistená za obdobie marec–apríl. Podľa (Fitter, Fitter, 2002) druhy kvitnúce na jar bývajú silne ovplyvnené teplotou, pretože pri vyšších jarých teplotách urýchľujú svoju reprodukčnú fenológiu. Naša korelačná analýza ukázala, že v prípade letných druhov bol zistený tesnejší vzťah ($r > 0,6$) pre nasledujúce obdobia: apríl – máj pre druh *Veronica officinalis*, apríl–jún pre druh *Mycelis muralis* a máj – júl pre neskoro-letný druh *Campanula trachelium*. Podobné zistenie uvádzajú Moore a Lauenroth (2017), ktorí analyzovali fenológiu kvitnutia 21 druhov stepných tráv. Zistili, že dátum kvitnutia druhov bol ovplyvnený špecifickým načasovaním teplejších a vlhkejších podmienok počas vegetačného obdobia. Schieber (2007) analyzoval vzťah medzi teplotou/zrážkami a načasovaním nástupu kvitnutia rovnakého druhu bylín na tej istej lokalite za obdobie desiatich rokov (1995 – 2004). Jeho analýza potvrdila úzky vzťah teploty a nástupu VK pre druhy všetkých fenologických skupín (s výnimkou skorého jarého druhu *Pulmonaria officinalis*). Na druhej strane zrážky významne korelovali len pri dvoch letných druhoch (*M. muralis* a *C. trachelium*). Tieto zistenia zodpovedajú našim

najnovším výsledkom, aj keď hodnoty korelácie sú o niečo nižšie. Predpokladáme, že teplota vzduchu vo vybranom časovom období pred nástupom VK má významný vplyv, ale je zrejmé, že nie úplne postačujúci. Ak nastanú chladné jarné obdobia, po ktorých nasledujú zrážky, nástup VK jarných druhov sa môže oneskoriť. Druhý ekologický faktor, zrážky, koreloval mierne ($r > 0,4$) len pre druhy koncom jari a koncom leta. Je prekvapujúce, že kvitnutie druhov na začiatku a v polovici leta nezáviselo od zrážok. Na základe tohto zistenia môžeme konštatovať, že zrážky by mohli ovplyvniť druhy, ktoré nekvitnú na začiatku vegetačného obdobia, kedy vlhkosť nebýva limitujúcim faktorom. Zdá sa teda, že pre druhy skorej a plnej jari je teplota limitujúcejším faktorom ako sú zrážky. Predpokladáme, že zrážky predstavujú doplnkový faktor ovplyvňujúci kvitnutie niektorých neskoršie kvitnúcich druhov, kým dominantným faktorom, ktorý riadi kvitnutie väčšiny druhov, je teplota (Hájková et al., 2018).

Záver

Práca hodnotí vplyv dvoch meteorologických veličín, teploty vzduchu a zrážok na nástup fenofázy všeobecného kvitnutia (VK) vybraných lesných bylín v období 1995 – 2020. Bolo testovaných deväť bylinných druhov, reprezentujúcich z hľadiska kvitnutia rôzne fenologické skupiny (skorá jar – *Petasites albus* a *Pulmonaria officinalis*, plná jar – *Carex pilosa* a *Dentaria bulbifera*, neskorá jar – *Fragaria vesca* a *Galium odoratum*, skoré leto – *Veronica officinalis*, plné leto – *Mycelis muralis* a neskoré leto – *Campanula trachelium*). Teplota vzduchu významne korelovala s dátumom nástupu VK ($r > 0,6$, $P < 0,001$). Čo sa týka zrážok, korelácia bola slabšia ($r < 0,5$, $P < 0,01$). Pokiaľ ide o naše hypotézy, prvá hypotéza bola potvrdená, kým druhá nebola potvrdená jednoznačne – časové trendy nástupu VK za posledných 26 rokov potvrdili posuny k skorším dátumom pre väčšinu druhov, ale nie pre druh skorej jari - *Petasites albus*. Trendy nástupu VK boli štatisticky významné u piatich druhov (*Carex pilosa*, *Dentaria bulbifera*, *Fragaria vesca*, *Veronica officinalis* a *Mycelis muralis*). Na záver možno povedať, že práca odhalila potrebu ďalšieho výskumu, ktorý by pomohol lepšie vysvetliť fenologické reakcie druhov na vybrané ekologické faktory. Táto potreba je naliehavejšia v súvislosti s meniacimi sa podmienkami prostredia, ktoré v súčasnosti prebiehajú vo všetkých lesných ekosystémoch.

PodĎakovanie

Výskum bol podporený vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaR SR a SAV (VEGA), projekt č. 2/0050/21.

Literatúra

AMANO, T., SMITHERS, R. J., SPARKS, T. H., SUTHERLAND, W. J., 2010: A 250-year index of first flowering dates and its response to temperature changes. *Proc. Royal Soc. B.*, 277, p. 2451 – 2457.

BABÁLOVÁ, D., ŠKVARENINOVÁ, J., FAZEKAŠ, J., VYSKOT, I., 2018: The dynamics of the phenological development of four woody species in south-west and central Slovakia. *Sustainability*, 10, 1497.

BOISVENUE, C., RUNNING, S. W., 2006: Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century. *Glob. Change Biol.*, 2, p. 862 – 882.

BOTTLÍKOVÁ, A., 1975: Phenological characterization of selected phytocoenoses in the kettlehole of Liptov. *Biologické práce*, 21, p. 1 – 81.

BRASLAVSKÁ, O., BORSÁNYI, P., 1996: Quality control of long series of phenological data with sum of cumulated average monthly air temperatures. In: Dalezios, N.R. (Ed.): *International Symposium on Applied Agrometeorology and Agroclimatology. Proceedings Volos, Greece*, p. 305 – 310.

BRASLAVSKÁ, O., KAMENSKÝ, L., 1996: Fenologické pozorovanie lesných rastlín. *Metodický predpis. SHMÚ Bratislava*, 22 s.

CHAUHAN, Y. S., RYAN, M., CHANDRA, S., SADRAS, V. O., 2019: Accounting for soil moisture improves prediction of flowering time in chickpea and wheat. *Sci.Rep.*, 9, p. 1 – 11.

CHEDDADI, R., ARAÚJO, M. B., MAIORANO, L., EDWARDS, M., GUISAN, A., CARRÉ, M., CHEVALIER, M., PEARMAN, P. B., 2016: Temperature range shifts for three European tree species over the last 10,000 years. *Front. Plant Sci.*, 7, 1581.

CHMIELEWSKI, F. M., MÜLLER, A., BRUNS, E., 2004: Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961–2000. *Agric. For. Meteorol.*, 121, p. 69 – 78.

DAVIES, T. J., WOLKOVICH, E. M., KRAFT, N. J. B., SALAMIN, N., ALLEN, J. M., AULT, T. R., BETANCOURT, J. L., BOLMGREN, K., CLELAND, E. E., COOK, B. I., CRIMMINS, T. M., MAZER, S. J., MCCABE, G. J., PAU, S., REGETZ, J., SCHWARTZ, M. D., TRAVERS, S. E., 2013: Phylogenetic conservatism in plant phenology. *J. Ecol.*, 101, p.1520 – 1530.

ĎURSKÝ, J., ŠKVARENINA, J., MINĎÁŠ, J., MIKOVÁ, A., 2006: Regional analysis of climate change impact on Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) growth in Slovak mountain forests. *J. Forest Sci.*, 52, p. 306 – 315.

EVANS, J. D., 1996: *Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences*. Brooks/Cole Publishing; Pacific Grove, California, USA, 634 p.

- FITTER, A. H., FITTER, R. S. R., 2002: Rapid changes in flowering time in British plants. *Science*, 296, p. 1689 – 1691.
- FITTER, H., FITTER, R. S. R., HARRIS, I. T. B., WILLIAMSON, M. H., 1995: Relationships between 1st flowering date and temperature in the flora of a locality in central England. *Funct. Ecol.*, 9, p. 55 – 60.
- GORDO, O., SANZ, J. J., 2005: Phenology and climate change: A long-term study in a Mediterranean locality. *Oecologia*, 146, p. 484 – 495.
- HÁJKOVÁ, L., HUBÁLEK, Z., KOŽNAROVÁ, V., BARTOŠOVÁ, L., MOŽNÝ, M., 2018: Flowering of allergenically important plant species in relation to the North Atlantic Oscillation system and thermal time in the Czech Republic. *Aerobiologia*, 34, p. 157 – 169.
- HÁJKOVÁ, L., MOŽNÝ, M., OUŠKOVÁ, V., BARTOŠOVÁ, L., DÍŽKOVÁ, P., ŽALUD, Z., 2021: Meteorological variables that affect the beginning of flowering of the winter oilseed rape in the Czech Republic. *Atmosphere*, 12, 1444.
- HARTL-MEIER, C., DITTMAR, C., ZANG, C., ROTHE, A., 2014: Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps. *Trees*, 28, p. 819 – 829.
- JIANG, Y., LI, B., YUAN, Y., SUN, Q., ZHANG, T., LIU, Y., LI, Y., LI, R., LI, F., 2021: Trends in flowering phenology of herbaceous plants and its response to precipitation and snow cover on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1983 to 2017. *Sustainability*, 13, 7640.
- KIRSCHBAUM, M. U. F., 2000: Forest growth and species distribution in a changing climate. *Tree Physiol.*, 20, p. 309 – 22.
- KOZYR, I.V., 2014: Forest Vegetation dynamics along an altitudinal gradient in relation to the climate change in Southern Transbaikalia, Russia. *Achiev. Life Sci.*, 8, p. 23 – 28.
- KRIŽOVÁ, E., 1993: Primary production of the aboveground biomass of a herb layer in selected forest types in EES Kováčová. *Acta Fac. For.*, 35, p. 99 – 107.
- KUBOV, M., SCHIEBER, B., JANÍK, R., 2019: Seasonal dynamics of macronutrients in aboveground biomass of two herb-layer species in a beech forest. *Biologia (Bratislava)*, 74, p. 1415 – 1424.
- LAPIN, M., FAŠKO, P., MELO, M., ŠŤASTNÝ, P., TOMLAIN, J., 2002: Atlas krajiny Slovenskej republiky, 1. vydanie, MŽP, Bratislava, 344 s.
- LAPOINTE, L., LERAT, S., 2006: Annual growth of the spring ephemeral *Erythronium americanum* as a function of temperature and mycorrhizal status. *Can. J. Bot.*, 84, p. 39 – 48.
- LEE, H. K., LEE, S. J., KIM, M. K., LEE, S. D., 2020: Prediction of plant phenological shift under climate change in South Korea. *Sustainability*, 12, 9276.
- LUKASOVÁ, V., VIDO, J., ŠKVARENINOVÁ, J., BIČAROVÁ, S., HLAVATÁ, H., BORSÁNYI, P., ŠKVARENINA, J., 2020: Autumn phenological response of European Beech to summer drought and heat. *Water*, 12, 2610.

- LUKASOVÁ, V., ŠKVARENINOVÁ, J., BIČÁROVÁ, S., SITÁROVÁ, Z., HLAVATÁ, H., BORSÁNYI, P., ŠKVARENINA, J., 2021: Regional and altitudinal aspects in summer heatwave intensification in the Western Carpathians. *Theoretical and Applied Climatology*, 146, p. 1111 – 1125.
- MARHOLD, K., HINDÁK, F., 1998: Zoznam nižších a vyšších rastlín Slovenska - Checklist of non-vascular and vascular plants of Slovakia. VEDA, vydavateľstvo SAV Bratislava, 687 s.
- McMASTER, G. S., WILHELM, W. W., 1998: Is soil temperature better than air temperature for predicting winter wheat phenology? *Agronomy J.*, 90, p. 602 – 607.
- MEIER, U., 2001: BBCH-Monograph: Growth Stages of Mono- and Dicotyledonous Plants, 2nd ed.; Technical Report; Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry: Bonn, Germany, 204 p.
- MILLER-RUSHING, A. J., INOUE, D. W., PRIMACK, R. B., 2008: How well do first flowering dates measure plant responses to climate change? The effects of population size and sampling frequency. *J. Ecol.*, 96, p. 1289 – 1296.
- MO, F., ZHANG, J., WANG, J., CHENG, Z. G., SUN, G. J., REN, H. X., ZHAO, X. Z., CHERUIYOT, W. K., KAVAGI, L., WANG, J. Y., XIONG, Y. C., 2017: Phenological evidence from China to address rapid shifts in global flowering times with recent climate change. *Agric.For.Meteorol.*, 246, p. 22 – 30.
- MONTGOMERY, R. A., RICE, K. E., STEFANSKI, A., RICH, R. L., REICH, P. B., 2020: Phenological responses of temperate and boreal trees to warming depend on ambient spring temperatures, leaf habit, and geographic range. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 117, p. 10397 – 10405.
- MOORE, L. M., LAUENROTH, W. K., 2017: Differential effects of temperature and precipitation on early- vs. late- flowering species. *Ecosphere*, 8, 5.
- RAFFERTY, N. E., DIEZ, J. M., BERTELSEN, C. D., 2020: Changing climate drives divergent and nonlinear shifts in flowering phenology across elevations. *Curr. Biol.*, 30, p. 432 – 441.
- R CORE TEAM, 2017: R: A language and environment for statistical computing. R foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.r-project.org/>.
- SCHIEBER, B., 2007: Changes of flowering phenology of six herbal species in a beech forest (Central Slovakia): a decade analysis. *Pol.J.Ecol.*, 55, p. 233 – 244.
- SCHIEBER, B., KUBOV, M., JANÍK, R., 2017: Effects of climate warming on vegetative phenology of the common beech *Fagus sylvatica* in a submontane forest of the Western Carpathians: two-decade analysis. *Pol. J. Ecol.*, 65, p. 339 – 51.
- SHORINA, N. I., SMIRNOVA, O. V., 1995: The population biology of ephemeroids. In: White, J. (Ed.): *The population structure of vegetation*, Dr. V. Junk Publishers: Dordrecht, The Netherlands, p. 225 – 240.

SIEROTA, Z., GRODZKI, W., SZCZEPKOWSKI, A., 2019: Abiotic and biotic disturbances affecting forest health in Poland over the past 30 years: Impacts of climate and forest management. *Forests*, 10, p.1 – 17.

SONG, Y., SHIM, J., KINMONTH-SCHULTZ, H., IMAIZUMI, T., 2015: Photoperiodic flowering: time measurement mechanisms in leaves. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 66, p. 441 – 464.

STŘELEČEK, J., 1992: Influence of cutting intervention in a beech forest stand on changes in illumination. *Les.čas.-Forestry J.*, 38, p. 551 – 558.

WMO report: 2020 closes a decade of exceptional heat.
<https://public.wmo.int/en/media/news/2020-closes-decade-of-exceptional-heat>.