

60 LET KONCEPTU LESNÍ VEGETAČNÍ STUPŇOVITOSTI V ČESKÝCH ZEMÍCH

60 YEARS OF CONCEPT OF FOREST VEGETATION ZONATION IN CZECH

Antonín Kusbach, Jan Šebesta, Michal Friedl, Václav Zouhar, Tomáš Mikita

*Ústav lesnické botaniky, dendrology a geobiocenologie, Lesnická a dřevařská fakulta,
Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 3, e-mail: kusbach@mendelu.cz*

ABSTRACT

Expert knowledge-based land classifications have been working around the globe for more than 60 years. We assessed Forest Vegetation Zones, important landscape-level units delineated within a territory of the Czech Republic. We analyzed 11,885 plots after considering as many as 49,000 plots with vegetation and 25,000 plots with environmental data. Classification of the environment provided better results than the classification of vegetation for both the Hercynicum and Carpaticum phytogeographic part of the Czech Republic. Taking into account significance of the environment in our analysis, a delimitation of Forest Vegetation Zones via explicit a priori stratification by tree species without consideration of environmental limits would not be supported by our results. We suggest not relying only on vegetation in classification analyses, but also including the significant environmental factors for direct classification of Forest Vegetation Zones and units in particular in altered vegetation composition setting such as the central European forests. We propose a novel interpretation of Forest Vegetation Zones via appropriate vegetation stratification throughout the environment used in conjunction with the zonal concept. Understanding of coarse-scaled vegetation-environmental relationships is not only fundamental in forest ecology and forest management but is also essential for improving lower classification levels.

Key words: ecological land classification; forest classification; forest vegetation zone; potential natural vegetation; vegetation zonation; zonal concept

Úvod

Vegetace byla vždy klíčovým komponentem tradičních ekologických krajinných klasifikací (DAUBENMIRE, 1987; KUSBACH et al., 2014). ‘Východní’ a ‘západní’ klasifikační systémy založené na konceptu potenciální přirozené vegetace (PPV) (TÜXEN, 1956) odrážely trendy v environmentálních vědách využívajících konceptů lesního typu (CAJANDER, 1926) fytosociologie (BRAUN-BLANQUET, 1928), ekosystému a polyklimaxu (TANSLEY, 1935), a biogeocenologie (SUKACHEV a DYLLIS, 1968). V české a slovenské klasifikaci lesů vychází koncept ze Zlatníkovy teorie typu geobiocénu, potažmo geobiocenologie (ZLATNÍK, 1976). Z teorie vzešla ‘česká’ lesnická typologie označovaná jako lesnicko-typologický klasifikační systém, LTKS (VIEWEGH et al., 2003) a slovenská klasifikace lesních typů (ZLATNÍK, 1959, HANČINSKÝ, 1972).

Tyto ekologické systémy založené na tehdejších expertních znalostech nebyly nikdy aktualizovány ani vyhodnoceny (formálně kvantifikovány) s použitím moderních analytických metod. Ve světě neexistuje mnoho pokusů jako např. KUPFER a FRANKLIN (2000), DELONG et al. (2010) o posouzení ekologických klasifikačních systémů. Rigorózní zhodnocení cestou kvantifikace prostorově i kvalitativně rozsáhlých dat fakticky chybí (CHYTRÝ et al. 2011). Ekologové, biogeografové a ochrana přírody postupně ztrácí důvěru ve spolehlivost systémů, které se stávají zastaralými (HAEUSSLER, 2011).

Schéma LTKS se nezměnilo od jeho publikace v r. 1971. S výjimkou obecného vyhodnocení (KUBOŠOVÁ et al., 2010), jednotky systému nebyly testovány pro ekologickou

správnost, jak jsou robustní v reflexi vegetačně-environmentálních vztahů, tedy jak jsou schopny rozlišovat environmentální podmínky. LTKS byl kritizován pro přílišný detail, obtížně pochopitelnou strukturu neumožňující účinný management. Formální kritika doporučovala systémovou revizi (MIKESKA, 2000; VIŠŇÁK, 2001; VOLAŘÍK, 2010; ŠAMONIL, 2012). Struktura LTKS je nesystémová a systém je zastaralý (KUSBACH, 2012; ŠAMONIL, 2012; ZOUHAR, 2012a). Například, manažeři, praktičtí lesní hospodáři a ochránci přírody s botaniky argumentují nejednotností v označování jednotek v různých oblastech ČR. Vágní struktura přináší problémy nejen do lesnického managementu, ale také do genetiky lesních dřevin a přenosu reprodukčního materiálu, a určitě i do jiných oblastí využívajících LTKS.

Lesní hospodář by měl mít k dispozici stabilní ekologickou klasifikaci k účinnému managementu. Pro praktického lesníka by klasifikace měla být především účinným nástrojem pro 'chytrou' správu lesů. Místo toho naráží na nepřehlednost a překombinovanost systému, čímž se skvělá myšlenka lesnické typologie v očích lesnické veřejnosti znevěrohodňuje.

V této studii jsme využili rozsáhlé lesnické typologické databáze (ZOUHAR, 2012b) k posouzení expertního konceptu lesní vegetační stupňovitosti (LVS). Použili jsme dostupná vegetační a environmentální data a půdní jednotky k posouzení diferenciace LVS, identifikaci slabých míst a návrhu řešení. Především apelujeme na zjednodušení vyjasnění jeho struktury vedoucí k minimalizaci problému zejména v lesnické praxi. Výsledky této studie byly již prezentovány v odborném časopise (KUSBACH et al., 2017). Tímto příspěvkem bychom řešenou problematiku rádi představili v českém jazyce, zejména pro zájemce z praxe.

Cílem studie bylo: (i) určit, zda vegetační i environmentální podmínky odpovídají klasifikaci LVS; (ii) vyšetřit správnost rozlišení LVS na základě vegetace a environmentálních faktorů. Tato studie pomůže minimalizovat problémy v aplikaci systému v budoucnu tím, že poskytne lepší systémovou, jednotkově-specifickou ekologickou informaci.

MATERIÁL A METODIKA

Lesnicko-typologický klasifikační systém

Lesnicko-typologický klasifikační systém (LTKS) slouží jako národní lesnický standard více než 50 let (VIEWEGH et al. 2003). Jeho základem je subjektivní design, tzn., že vzorkovací plochy byly vybrány účelově na základě expertní znalosti preferující plochy s vegetací ve stadiu optima korespondující s centrálním konceptem PPV. Systém je složen ze tří úrovní: nadstavbové, základní a nižší.

Nadstavbové LVS jsou číslovány 1–9: (1) *Quercus*, (2) *Fagus-Quercus*, (3) *Quercus-Fagus*, (4) *Fagus*, (5) *Abies-Fagus*, (6) *Picea-Fagus*, (7) *Fagus-Picea*, (8) *Picea*, (9) *Pinus mugo* (ZLATNÍK, 1959; PLÍVA, 1971; KUSBACH et al., 2017). Jsou zásadním ekologickým rámcem pro základní a nižší jednotky systému, rámcové směrnice hospodaření (PRŮŠA, 2001) a lesnickou legislativu. V každém LVS, potenciální přirozená vegetace, reprezentovaná klimaxovou dřevinou je nepřímým vyjádřením výškových (makroklima) a expozičních (mezoklima) podmínek (např., RANDUŠKA et al., 1986). Lesní vegetační stupně jsou reprezentovány přirozeným společenstvem ovlivněným makro a mezoklimatickými změnami (ZLATNÍK, 1976). Koncept LVS spojuje makro a mezoklima a posuzuje jejich kombinovaný vliv na vegetaci. Zatímco výšková (makroklimatická) změna je relativně dobře prostudovaná, mezoklima (lokální topografie) často kombinovaná s půdními zvláštnostmi představuje složitý komplex vlhkostních a tepelných změn. Praktickým výsledkem je mapování tzv. zonálních, prostorově homogenních ploch ovlivněných zejména makroklimatickou změnou a azonálních segmentů (teplejších/sušších nebo chladnějších/vlhčích, vnořených uvnitř zonálních LVS) roztroušených v krajině a ovlivněných zejména mezoklimatem.

Základní (soubory lesních typů) a nižší (lesní typy) systémové jednotky nesoucí informaci LVS (VIEWEGH et al., 2003) slouží jako ekologický rámec pro tvorbu

hospodářských souborů, jednotek pro diferenciaci lesního hospodaření. Tato hospodářská struktura postavená na jednotkách přírodních podmínek umožňuje standardizovat hospodaření v lesích napříč všemi typy lesů a vlastnictví v České republice. Vedle lesnictví slouží tento systém v ochraně přírody, oceňování půdy, vyměřování daně z nemovitosti, ochraně půdy a všude tam, kde je potřebná ekologická informace o lesním stanovišti.

Data

Lesnická typologická databáze (ZOUHAR, 2012b) spravovaná Ústavem pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem (ÚHÚL) obsahuje téměř 49 tisíc vegetačních a přes 25 tisíc environmentálních a půdních měření a pozorování na území ČR (78,000 km²) za období 1950 – 2007. Z důvodu výše zmíněného subjektivního výběru ploch, není jejich distribuce na území ČR pravidelná. Metodika sběru dat se měnila během tohoto období minimálně. Na kruhových plochách (500 m²) byly pořízeny až tři záznamy. V analýze dat jsme použili nejmladší záznam na téže ploše. Byly odstraněny plochy s méně než 10 záznamy a plochy bez klimatických dat. Byla provedena kontrola kompletnosti a správnosti dat, např. kontrola extrémních odlehlých hodnot. (směrodatná odchylka > 5). Po těchto úpravách jsme použili 11 885 ploch s vegetačními a environmentálními záznamy v následujících analytických krocích.

Environmentální a půdní data

Pro každou plochu jsme s použitím digitálního modelu terénu vytvořeného nad digitálním reliéfem terénu 4. generace vypočítali běžné geomorfologické indexy (Tab 1).

Expozice svahu v azimutových stupních byla přepočítána na aspect value (av) v hodnotách 0–1 jako míra radiace (ROBERTS a COOPER, 1989). Půdní vlastnosti byly analyzovány ve formě taxonomického označení půdních typů a subtypů (NĚMEČEK a KOZÁK, 2001) (Tab 1).

Klimatická data

Použili jsme extrapolace základních klimatických faktorů (průměrné roční teploty, průměrných ročních srážek a vegetační doby) z databáze Českého hydrometeorologického ústavu na plochy ÚHÚL (HADAŠ, 1997). Bylo využito dat tzv. 2. klimatického normálu 1961–1990. (Tab 1).

Vegetační data

Použili jsme záznam pokryvností dřevnatých, bylinných, travnatých a travinám podobných druhů (graminoids) v osmi vertikálních patrech od semenáčků k nadúrovňovým stromům (ZLATNÍK, 1976). Vyloučili jsme mechy, lišejníky a invazivní druhy (PYŠEK et al. 2012). Celkově bylo použito 1508 druhů a agregátů vegetace.

Skladba vegetace střední Evropy není přirozená (např. CHYTRÝ et. al., 2013). V těchto změněných podmínkách je obtížné určení PPV. Relativně přirozená společenstva byla v této studii reprezentována klimaxovými dřevinami (ZLATNÍK, 1976). Ze šestistupňové škály přirozenosti (MACKŮ, 2012) jsme zvolili stupně 4-6 pro největší přiblížení k předpokladu PPV v konceptu LVS. Vyloučili jsme tedy plochy s majoritním zastoupením introdukovaných dřevin, smrkové a borové monokultury druhé generace, vývojová a přechodová stadia (ekotony).

Vzorkovacím plochám jsme přiřadili označení devíti lesních vegetačních stupňů a dvou fytogeografických oblastí, Hercynicum a Carpaticum (H/C). LVS a H/C jsou dále považovány za analytické třídy.

Analýza dat

(1) Použili jsme Random Forests klasifikaci (RF) (BREIMAN, 2001) nad externími environmentálními faktory za účelem: (1) rozlišení mezi třídami H/C a FVZ, a (2) identifikace faktorů významně asociovaných s těmito třídami. Použili jsme celý data set

(11 885 ploch) k ověření odlišnosti H/C (KUSBACH, 2012), a poté dílčí data sety H a C k určení rozdílu mezi LVS uvnitř H a C. Z analýzy jsme odstranili 9. LVS (41 ploch) pro Hercynicum, a 7. (21 ploch) a 8. LVS (1 plochu) pro Carpathicum subset z důvodu podvzorkování. Tento přístup se ukázal jako vhodnější než „umělé“ vyvažování setů cestou down/up weighting.

Výsledky jsou prezentovány jak pro všechny třídy, tak i pro srovnání mezi třídami (partial misclassification errors produkované RF confusion matrix). Významné faktory byly RF algoritmem uspořádány v analýze významnosti (parametr *importance*) podle Mean Decrease Accuracy (MDA) a Mean Decrease Gini (MDG). Pro machine-learning trenovací proces (to grow a ‘forest’), jsme použili *ntree* = 500 a 1000 (počet stromů jako funkce v R) a *mtry* = 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20 (počet proměnných náhodně použitých v každém rozčlenění stromu) (LIAW a WIENER, 2002).

Climatic Factors	Character	Abbreviation	Units/Values
Annual total precipitation	R	Syr	mm
Annual mean temperature	D	Tyr	°C
Monthly mean precipitation (January–December)	D	S01–S12	mm
Monthly mean temperature (January–December)	D	T01–T12	°C
Vegetation period 10 °C	I	V10	days
Vegetation period 8 °C	I	V8	days
Physiographic/geomorphic factors			
Altitude	I	alt	meters
Slope gradient	I	slope	degrees
Slope aspect value	I	av	values 0–1 (ROBERTS a COOPER, 1989)
Topographic exposure	I	Topex	values 0–255
Mass Balance Index	I	MBI	values –0.7–2
Positive Openness	I	PO	values 0–2
Topography Wetness Index	I	TWI	values 0–26
Saga Wetness Index	I	SAGA	values 0–12
Topographic Position Index	I	TPI	values –11.9–12
Terrain Roughness Index	I	TRI	values 0–60
Solar Radiation	I	Solrad	values 635,000–1,400,000
Vertical Distance to Channel Network	I	VertD	values 0–762
Convergence Index	I	CI	values –87–89
Relative slope position	I	RSP	values 0–1
Valley depth	I	VD	meters/ 0–600
Terrain Classification Index for lowlands	I	TCIlow	values 0–1
Gradient	I	Grad	values 0–1
Gradient Difference	I	GradD	values –0.5–0.3
Normalized Height	I	HNO	values 0–1
Slope Height	I	SH	meters/0–450
Diurnal Anisotropic Heating	I	Diur	values –0.6–0.5
Texture	I	Texture	values 0–0.9
Local convexity	I	Convex	values 0–0.8
Standardized Height	I	HST	meters/0–1500
Geologic/Soil Factors			
Geology	I	geol	NA, categorical
Soil substrate	R	substr	NA, categorical
Soil type	R	stype	NA, categorical
Soil subtype	R	ssubtype	NA, categorical

Pozn.: D—přímý faktor; I—nepřímý faktor; R—zdrojový faktor (AUSTIN a SMITH, 1989).

Tab. 1: Environmentální faktory použité v analýze.

(2) Použili jsme principal components analysis (PCA) jako volnou ordinační techniku pro interpretaci hlavních komponentů (principal components, PC) (gradientů v environmentálním prostoru) sdruženými s významnými faktory definovanými v RF klasifikaci pro Hercynicum a Carpathicum. Volili jsme korelační matici (data byla centralizována a standardizována) a ortogonální rotaci k získání nezávislých, vzájemně nekorelovaných PC (LATTIN et al. 2003). Faktory s $|\text{skewness}| > 1$ byly transformovány pro získání multivariační normality a snížení korelace mezi faktory. Významnost PC (gradientů) byla testována Monte Carlo testem s 1000 opakováními. Místo tradičních p-values jsme vypočetli lineární (parametric Pearson’s *r*) a rank (nonparametric Kendall’s tau) korelační

koeficienty (loadings) jako vztah mezi ordinačními skoré (osami) a environmentálními faktory. Práh pro r a τ jsme stanovili > 0.4 (HAIR et al., 2013).

(3) Protože je vegetace klíčem k vylišení LVS, testovali jsme schopnost floristických elementů nepřímo indikovat makro a mezoklimatické podmínky.

(a) Použili jsme ‘unconstrained-free nonmetric multidimensional scaling’ (NMS) vegetačních dat za účelem: (i) vyhledat schéma v komplexním a bohatém druhovém prostoru, a (ii) vyvarovat se nelineárních vztahů mezi druhy (PECK, 2010). Vyloučili jsme druhy s výskytem menším než na 1 % vzorkovacích ploch. Provedli jsme logaritmickou transformaci druhových pokryvností (procento pokryvnosti bylo použito jako původní jednotka). Data byla standardizována binární relativizací s ohledem k mediánu za účelem vybalancování běžných a vzácných druhů, a zdůraznění optimální části druhových výskytů (MCCUNE a GRACE, 2002). V NMS ordinaci jsme použili Sørensen distance a Monte Carlo randomizační test s 250 permutacemi (MCCUNE a MEFFORD, 2011). Vytvořili jsme vizuální simulaci ploch přiřazených k LVS a konstruovali obálky (convex hulls). Obdobně jako u PCA jsme vypočetli r a τ loadings. Osy NMS nejsou interpretovatelné jako osy PCA (PECK, 2010). Proto bylo nutno vytvořit vztah mezi vegetací a environmentální ordinací (PCA).

Pozice LVS v druhovém prostoru byla testována pomocí funkce *adonis* k provedení vícerozměrné analýzy s Bray–Curtis distanční maticí. K otestování disperze ploch uvnitř LVS (vzdáleností mezi plochami a těžištěm LVS) jsme použili analýzu rozptylu (ANOVA).

(b) Použili jsme RF vegetačních dat (stejných jako v NMS) za účelem: (i) rozlišení tříd LVS, a (ii) identifikace druhů významně sdružených s těmito třídami. Pro machine-learning trénovací proces jsme použili $ntree = 500$ a $mtry = 10–40$.

Pro RF analýzu jsme použili RandomForest package, R version 3.0.0 (R CORE TEAM, 2014) a PC-ORD 6 (MCCUNE a MEFFORD, 2011). Pro PCA a NMS ordinaci a *adonis* analýzu jsme použili *vegan* package (OKSANEN et al., 2016). ArcGIS 10.3 (ESRI, Redlands, LA, USA) software a SAGA GIS software (Institute of Geography, University of Hamburg, Hamburg, Germany) byly použity pro výpočet geomorfických indexů.

VÝSLEDKY

(1) Klasifikace celého environmentálního data setu (11,885 ploch, 58 faktorů) za supervize tříd H/C odhalila obecnou klasifikační chybu 0.2 % ($mtry = 4–8$, $ntree = 500$ nebo 1000). Obě třídy H/C měly chybovost 0.06 a 0.63 % respektive. Tento výsledek je konzistentní s předešlým šetřením Kusbach (2012) a robustní rozdělení do dílčích data setů H/C bylo použito dále.

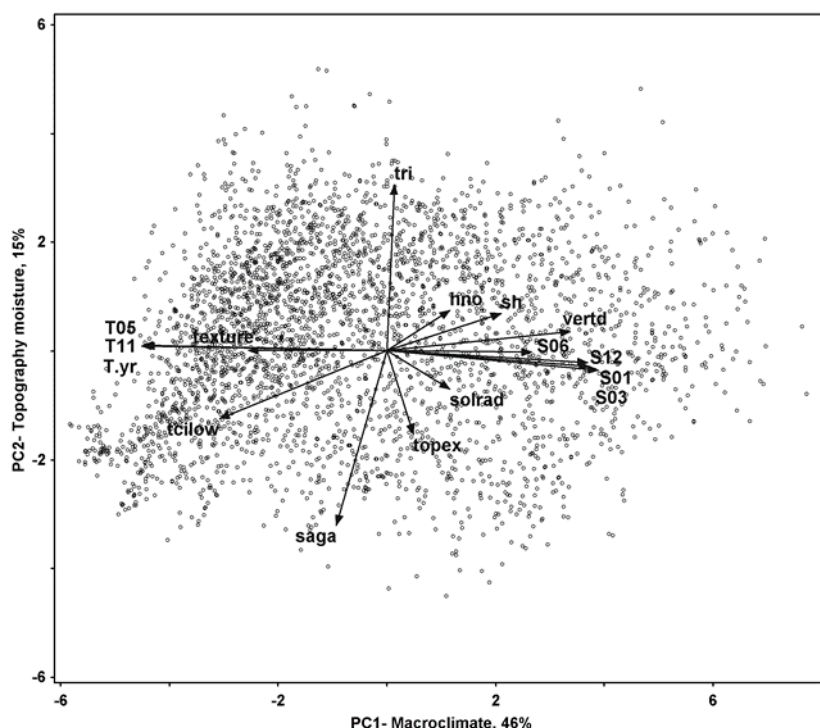
Klasifikace environmentálního data setu pro Hercynicum (9308 ploch, 58 faktorů) za supervize tříd LVS odhalila obecnou klasifikační chybu 23 % ($mtry = 16$, $ntree = 500$ nebo 1000). Mean Decrease Accuracy funkce významnosti faktorů poukázala na makroklimatické faktory (srážky a teploty pro MDG) a půdu jako nejvýznamnější v rozlišení mezi LVS (Tab 2). Klimatické faktory a půda jsou lepší prediktory LVS než geomorfické indexy pro Hercynicum.

Klasifikace environmentálního data setu pro Carpaticum (2514 ploch, 58 faktorů) za supervize tříd LVS odhalila obecnou klasifikační chybu 16 % ($mtry = 16$, $ntree = 500$ nebo 1000). Zatímco RF confusion matrix ukázala pro LVS 1, 3 and 5 chybovost velmi dobrou (7.6, 11.8, a 8.2 %), LVS 2, 4, 6 měly chybovost 38.1, 26.5 a 24.2 % respektive. Nejvýznamnější faktory odlišující LVS pro Carpaticum ukazuje Tab 2. Klimatické faktory jsou lepší prediktory LVS než geomorfické indexy a půda pro Carpaticum.

		FVZ	
		MDG	MDA
Hercynicum	01 mean precipitation	-	61
	03 mean precipitation	-	63
	06 mean precipitation	-	78
	03 mean temperature	285	-
	05 mean temperature	288	-
	11 mean temperature	396	-
	Annual mean temperature	336	-
	Soil subtype	291	75
	Soil type	-	66
Carpathicum	05 mean precipitation	159	43
	06 mean precipitation	125	42
	08 mean precipitation	-	33
	12 mean precipitation	113	38
	03 mean temperature	99	-
	05 mean temperature	91	-
	Terrain roughness index	-	33

Tab.2: Nejlepší RF prediktory na bázi MDG a MDA pro Hercynicum and Carpathicum.

(2) Ordinace PCA pro Hercynicum (4500 ploch, 20 významných faktorů z RF klasifikace) vyjádřila tři hlavní komponenty PC (gradienty) ($p = 0.001$), vysvětlující 46, 15 a 11 % celkové variability klimatických a geomorfických dat. Nejvýznamnější komponent-gradient PC1 byl interpretován jako makroklima. PC2 byl interpretován jako topograficky podmíněný půdně-vlhkostní gradient. PC3 byl interpretován jako gradient teplotní inverze (Obr. 1, PC3 není zobrazen).



Obr. 1: Biplot vzorkovacích ploch s významnými faktory a PCA gradienty pro fytogeografický region Hercynicum. Viz Tab 1 pro zkratky faktorů.

Ordinace PCA pro Carpathicum (2535 ploch, 21 významných faktorů z RF klasifikace) vyjádřila tři PC (gradienty) ($p = 0.001$), vysvětlující 44, 16 a 11 % celkové variability klimatických a geomorfických dat. Nejvýznamnější komponent-gradient PC1 byl

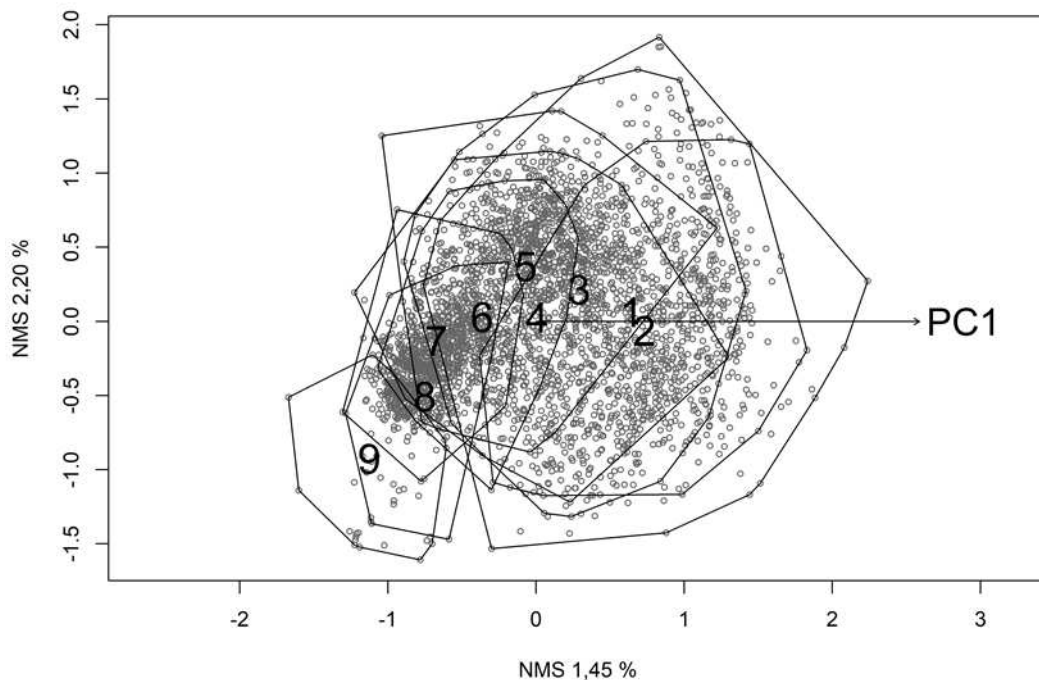
interpretován jako makroklima. PC2 byl interpretován jako gradient teplotní inverze. PC3 byl interpretován jako expoziční-radiační gradient. (Obr. není prezentován).

(3a) V ordinaci NMS, pro Hercynicum (3222 ploch, 317 species), byly v konečném řešení po 78 opakováních, stresu 18.5 ($p = 0.004$) a nestabilitě 0.0 navrženy dvě dimenze (vegetační gradienty) reprezentující 65 % 'after-the-fact amount of variation' (1. osa 45, 2. osa 20 %). Pro Carpathicum je řešení podobné.

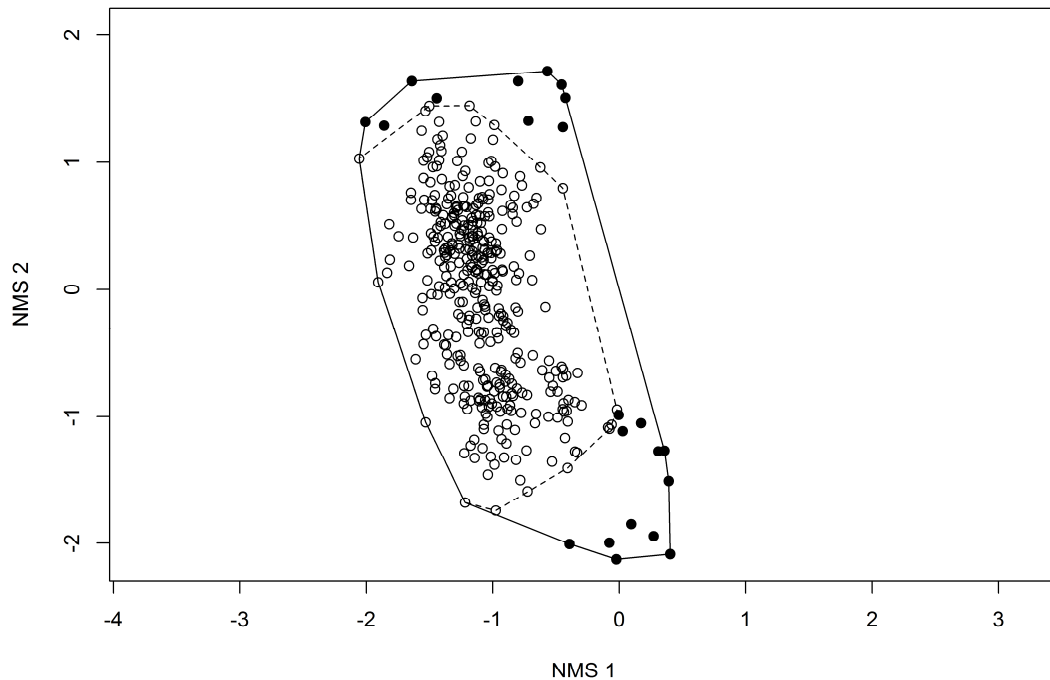
Našli jsme statisticky významný vztah mezi vegetací a environmentem reprezentovaným makroklimatem (PC1 gradient). PC1 byl významně asociovaný s NMS1 pro Hercynicum i Carpathicum ($r = -0.7$, $\tau = -0.5$). Pro Hercynicum byly tyto statisticky významné druhy asociované s NMS1 a makroklimatem: *Picea abies*, *Vaccinium myrtillus*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Vaccinium uliginosum*, *Calamagrostis villosa*, *Avenella flexuosa* pro chladnější a vlhčí část gradientu. Pro teplejší a sušší část to byly: *Poa nemoralis*, *Galium odoratum*, *Viola reichenbachiana*, *Melica nutans* a *Mercurialis perennis*. Pro Carpathicum byly statisticky významné druhy asociované s NMS1 a makroklimatem: *Fagus sylvatica*, *Brachypodium sylvaticum*, *Luzula luzuloides*, *Vaccinium myrtillus* pro chladnější a vlhčí část gradientu. Pro teplejší a sušší část to bylo *Geum urbanum*. Nenašli jsme jiný vztah mezi vegetací, indikátory LVS a dalšími gradient interpretovanými v PCA.

Pro vizuální vyjádření LVS v druhovém prostoru byly konstruovány obálky. LVS byly v NMS biplotech seřazeny podle makroklimatu vypočteným v PCA a RF (Obr. 2).

Pro LVS v oblasti Hercynicum s nejhorším výsledkem v adonis testu jsme indikovali odlehle hodnoty jako azonální plochy reflektující mezoklima více než makroklima. Odstranění těchto ploch zvýšilo homogenitu a robustnost příslušného LVS (Obr. 3).



Obr. 2: Biplot vzorkovacích ploch s významnými environmentálními gradienty pro fyto geografický region Hercynicum. Arabské číslice označují relativní pozici těžišť jednotlivých LVS, obálky vizualizují jejich rozsah. PC1 je makroklimatický gradient vypočtený v PCA.



Obr. 3: Grafická indikace odlehlých hodnot (outliers) pro 1. LVS pro Hercynicum. Odlehlé hodnoty jsou označeny plným kolečkem.

(3b) Klasifikace vegetačního data setu pro Hercynicum (3222 ploch, 317 taxonů) za supervize tříd LVS odhalila obecnou klasifikační chybu 35 % ($mtry = 20$, $ntree = 1000$).

Statisticky významné taxony byly podle MDA hodnot: *Fagus2*, *Calamagrostis villosa*, *Picea3*, *Fagus3*, *Vaccinium myrtillus*, *Abies2*, *Avenella flexuosa*, *Quercus petraea9*, *Galium odoratum*, *Poa nemoralis*; *Mercurialis perennis*. Podle MDG hodnot: *Calamagrostis villosa*, *Fagus2*, *Picea3*, *Fagus3*, *Vaccinium myrtillus*, *Avenella flexuosa*, *Poa nemoralis*, *Quercus petraea9*, *Abies2*, *Galium odoratum*, *Mercurialis perennis*. Klimaxové dřeviny byly potvrzeny jako dobré indikátory LVS pro Hercynicum. Obdobné výsledky byly dosaženy pro Carpathicum vegetační data set (2514 ploch, 340 taxonů).

Statisticky významné taxony včetně bylinných druhů byly obdobné v obou analýzách NMS i RF.

DISKUZE

Klasifikace RF vykazala stejné výsledky jako obě ordinace a testy pro statistickou významnost LVS a jejich homogenitu. Makroklima je nejlepším prediktorem lesní vegetační stupňovitosti v obou regionech H/C (Obr. 2).

Níže položené LVS nicméně vykazaly v naší studii horší výsledek než horské LVS v obou regionech (výsledky nejsou prezentovány). Klasifikační výsledky podpořené detekcí azonálních ploch ukázaly na limitované prostorově-funkční, vegetačně environmentální vztahy, které vyplývají z konceptu LVS postaveném na vegetaci. Vágnost těchto vztahů může být vysvětlena těmito důvody:

(1) Disturbanční šum. Existující vegetace je značně odlišná od PPV v celé střední Evropě. (např., CHYTRÝ et al., 2013). V oblasti Hercynicum byla většina analyzovaných ploch označena stupněm přirozenosti 4, protože ko-dominanty jako *Picea abies*, *Pinus sylvestris* a *Larix decidua* doprovázející *Quercus petraea* a *Fagus sylvatica* v LVS 1-3 a *Picea abies* doprovázející *Fagus sylvatica* výše (LVS 4-5) nejsou v uvedených LVS přirozené. Toto je

pravděpodobně důvod, proč byla *Picea abies* jediná statisticky významná dřevina asociovaná s makroklimatem na stejném konci makroklimatického gradientu. Výsledky pro *Pinus mugo* mohou být zkresleny podvzorkováním LVS 9 a obtížemi s odlišením LVS 8 od LVS 9 z důvodu historického pastevectví a posunu horní stromové hranice (TREML et al., 2008). Výskyt *Abies alba* v oblasti Hercynicum a Carpaticum byl silně ovlivněn intenzivní lidskou činností od časného středověku (KOZÁKOVÁ et al., 2011), a v moderní době trpěla hynutím jako důsledek emisí síry v 70. a 80. letech (ELLING et al., 2011).

V případě oblasti Carpaticum, *Fagus sylvatica* byl jedinou statisticky významnou dřevinou asociovanou s makroklimatem s podrostem *Brachypodium sylvaticum*, *Luzula luzuloides* a *Vaccinium myrtillus*. Dalšími významnými dřevinami byly klasifikovány *Quercus petraea* a *Abies alba*. Podíl výskytu *Fagus* a *Quercus* v NMS byly pravděpodobně ovlivněny historickými praktikami, zejména intenzivním pařezovým hospodařením (např. MÜLLEROVÁ et al., 2015).

Lepší výsledek vegetační klasifikace pro Carpaticum potvrdil přirozenější floristickou skladbu karpatských lesů a větší lidské ovlivnění struktury a složení Hercynských lesů, zejména v níže položené zemědělské krajině. Vegetační klasifikace potvrdila vedoucí roli klimaxových dřevin (edifikátorů) *Quercus petraea*, *Fagus sylvatica*, *Abies alba* a *Picea abies* ve vegetační zónaci (ZLATNÍK, 1976).

(2) Pouze první dvě statisticky významné dimenze (NMS1, NMS2) reprezentují v naší analýze širokou vegetační informaci (317 druhů). 45 % (NMS1 pro Hercynicum) a 38 % (NMS 2 pro Carpaticum) informací je fakticky odpovědí ke třem významným environmentálním gradientům (Obr. 1). Zbytek vegetační informace je prezentován jako šum, nebylo možno ji korelovat s daty přírodních podmínek. Makroklima bylo nejdůležitějším prediktorem LVS pro H/C ve všech analýzách. Mezoklima hraje minoritní roli v krajinném pojetí lesní vegetační stupňovitosti.

Koncept LVS implicitně kombinuje výškovou změnu makroklimatických faktorů s mezoklimatem cestou explicitního označení LVS ústředními dřevinami (generalisty). Tato kombinace vedla k vylišení zonálních (řízených makroklimatem) a azonálních (řízených mezoklimatem) LVS. V naší studii bylo mezoklima určeno jako nezávislé na makroklimatu (PCA a obr. 1).

Výsledky vegetační i environmentální analýzy byly konzistentní v obou RF klasifikacích i NMS ordinaci. Navíc, klasifikace environmentu poskytla lepší výsledek než klasifikace vegetace pro oba regiony Hercynicum a Carpaticum. Vezmeme-li v úvahu důležitost environmentu v naší analýze, tvrdíme, že LVS by neměly být vylišovány explicitně edifikátory bez zvážení environmentálních limitů (jako je například nezávislost významných environmentálních gradientů). Navrhujeme využití krajinného pojetí vegetační zónace cestou 'jednoduché vegetační odpovědi', tzn. odpovědi na pouze jeden gradient, tj. makroklima. Mezoklima není v našem krajinném analytickém pojetí statisticky významné. Náš přístup předpokládá vhodnou stratifikaci vegetace i environmentu například cestou využití zonálního konceptu (POJAR et al., 1987). Koncept je schopen vyřešit problém azonality a přímo zvážit 'zonální' environment. Azonalita by měla být vyjmuta z konceptu LVS, protože snižuje přesnost krajinného pojetí zónace. Zonální stratifikace je výhodná, protože může použít environmentální limity (POJAR et al., 1987) včetně půdních podmínek aplikované přímo na stanovišti (KUSBACH et al., 2014). Použití těchto limitů dohromady s vyvinutou (dospělou) vegetací posílí použití konceptu PPV. Oba koncepty (zonální i PPV) jsou vyzkoušeny praxí v Biogeoklimatické ekosystémové klasifikaci v Britské Kolumbii. Byly rovněž aplikovány v Modoc National Forest v severní Kalifornii (SMITH a DAVIDSON, 2003) a v centrálních Rocky Mountains (KUSBACH et al., 2014).

Relativně nové metody kvartérní paleoekologie jako je pedoantrakologie kombinované s rutinní dendrochronologií mohou být užitečné v rekonstrukci krajinné historie

v žádoucím čase s přihlédnutím k dynamice historického gradientu (disturbancím) a jeho vztahu k relativně statickému fyzickému prostředí (stanovišti). Zahrnutí paleo studií jako např. KOZÁKOVÁ et al. (2011), NOVÁK et al. (2015) bude, podle našeho názoru, nezbytné k obhájení přístupu k PPV přinejmenším v kontextu klasifikace lesů střední Evropy (ROBIN et al., 2013).

ZÁVĚR

Klasifikace a ordinace dostupných vegetačních a environmentálních dat v prostředí regionů Hercynicum a Carpathicum nepotvrdila homogenost LVS. Klasifikace environmentu poskytla lepší výsledek než klasifikace vegetace v obou regionech. Při použití konceptu PPV, navrhuje (i) nespolehat jen na vegetaci a její odpověď ve změněném prostředí střední Evropy, (ii) nový přístup k LVS cestou stratifikace vegetace skrze fyzický environment s použitím zonálního konceptu. Porozumění širších vegetačně-environmentálních vztahů je zásadní nejen v ekologii a managementu lesů, ale i ve zpřesnění nižších jednotek klasifikačního systému. Vzhledem k širokému praktickému a teoretickému uplatnění, významu pro legislativu a současněmu Pan Evropskému procesu, doporučujeme revizi konceptu LVS na bázi nových dat jako je např. databáze Národní inventarizace lesů; (ii) pedoatrachologie jako slibný zdroj historických dat; a (iii) potenciálního mezoklimatického modelingu. Cenná expertní znalost by měla být kombinována s pokročilou formální kvantifikací dlouhodobě akceptovaných, ale přežitých klasifikačních struktur.

PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů v Brandýse nad Labem za poskytnutí dat. Tato studie byla podpořena projekty “Building and development of the multidisciplinary team on a platform of landscape ecology, CZ.1.07/2.3.00/20.0004” a “Internal Grant Agency of the Faculty of Forestry and Wood Technology Mendel University in Brno, LDF_PSV_2017006”.

LITERATURA

- BRAUN-BLANQUET, J. (1928): Pflanzensoziozoologie: Grundzüge der Vegetationskunde, 1st ed.; Biologische Studienbücher. 7; Julius Springer: Berlin, Germany, 1928. 330 s.
- BREIMAN, L. (2001): Random forests. *Mach. Learn.* 2001, 45, 5–32, doi:10.1023/A:1010933404324.
- CAJANDER, A.K. (1926): The theory of forest types. *Acta For. Fenn.* 1926, 29, 1913–1929.
- CHYTRÝ, M. [ed.] (2013): Vegetace České Republiky 4, Lesní a křovinná vegetace (Vegetation of the Czech Republic 4. Forest and Scrub Vegetation). Academia: Praha, 551 s. ISBN 978-80-200-2299-8.
- CHYTRÝ, M.; SCHAMINÉE, J.H.J.; SCHWABE, A. (2011): Vegetation survey: A new focus for Applied Vegetation Science. *Appl. Veg. Sci.* 2011, 14, 435–439, doi:10.1111/j.1654-109X.2011.01154.x.
- DAUBENMIRE, R. (1989): The roots of a concept (keynote). In *Proceedings, Land Classifications Based on Vegetation: Applications for Resource Management*, Moscow, ID, November 17–19, 1987; Ferguson, D.E., Morgan, P., Johnson, F.D., Eds.; U.S. Department of Agriculture Forest Service Intermountain Research Station: Ogden, UT, USA, 1989. 3–6 s.
- DELONG, C.S.; GRIESBAUER, H.; MACKENZIE, W.; FOORD, V. (2010): Corroboration of biogeoclimatic ecosystem classification climate zonation by spatially modelled climate data. *BC J. Ecosyst. Manag.* 2010, 10, 49–64.
- ELLING, W.; DITTMAR, C.; PFAFFELMOSER, K.; RÖTZER, T. (2009): Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of silver fir (*Abies*

alba Mill.) in Southern Germany. *For. Ecol. Manag.* 2009, 257, 1175–1187, doi:10.1016/j.foreco.2008.10.014.

HAEUSSLER, S. (2011): Rethinking biogeoclimatic ecosystem classification for a changing world. *Environ. Rev.* 2011, 19, 254–277, doi:10.1139/a11-008.

HADAŠ, P. (1997): Speciální program pro odvození klimatických dat pro oblast Moravskoslezských Beskyd (The special program for derivation of climatic data for the territory of Moravian-Silesian Beskydy). In *Zpravodaj Beskydy: Vliv Imisí na Lesy a Lesní Hospodářství Beskyd* (The Beskids Bulletin: Influence of Air-Pollution on Forests and Forestry in the Beskids); Tesař, V., Kula, E., Eds.; Mendelova Zemědělská a Lesnická Univerzita v Brně: Brno, Czech Republic. 229–234 s.

HAIR, J.F.J.; HULT, T.G.H.; RINGLE, C.; SARSTEDT, M. (2013): *A Primer on Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)*; SAGE Publications, Inc.: Thousand Oaks, CA, USA, 2013. 307 s. ISBN 9781452217444.

HANČINSKÝ L., (1972): *Lesné typy Slovenska. Príroda*, Bratislava. 307 s.

KOZÁKOVÁ, R.; ŠAMONIL, P.; KUNEŠ, P.; NOVÁK, J.; KOČÁR, P.; KOČÁROVÁ, R. (2011): Contrasting local and regional Holocene histories of *Abies alba* in the Czech Republic in relation to human impact: Evidence from forestry, pollen and anthracological data. *Holocene* 2011, 21, 431–444, doi:10.1177/0959683610385721.

KUBOŠOVÁ, K.; KOMPRDA, J.; BEDNÁŘOVÁ, Z.; HÁJEK, O.; SÁŇKA, M.; JARKOVSKÝ, J.; MATOUŠKOVÁ, P.; KALÁBOVÁ, T. (2010): Vyhodnocení dat Databáze Lesnické Typologie a Úpravy Typologického Systému ÚHÚL, 1. Část (Data Evaluation of Forest Typology Database and Modifications of the Czech Forest Ecosystem Classification—Part 1); Research Centre for Toxic Compounds in the Environment, Brno, Czech Republic, 2010. 100 s.

KUPFER, J.A.; FRANKLIN, S.B. (2000): Evaluation of an ecological land type classification system, Natchez Trace State Forest, western Tennessee, USA. *Landsc. Urban Plan.* 2000, 49, 179–190, doi:10.1016/S0169-2046(00)00070-0.

KUSBACH, A. (2012): Klasifikace lesů dvou kontinentů: Jak dál v lesnické typologii? (Forest classification in two continents: What next with that?). *Lesn. Práce* 2012, 91, 30–33 (554–557).

KUSBACH, A.; FRIEDL, M.; ZOUHAR, V.; MIKITA, T.; ŠEBESTA, J. (2017): Assessing Forest Classification in a Landscape-Level Framework: An Example from Central European Forests. *Forests*. sv. 8, č. 12, ISSN 1999-4907. URL: <https://doi.org/10.3390/f8120461>

KUSBACH, A.; LONG, J.N.; VAN MIEGROET, H.; SHULTZ, L.M. (2012): Fidelity and diagnostic species concepts in vegetation classification in the Rocky Mountains, Northern Utah, USA. *Botany* 2012, 90, 678–693, doi:10.1139/b2012-033.

KUSBACH, A.; VAN MIEGROET, H.; BOETTINGER, J.L.; LONG, J.N. (2014): Vegetation geo-climatic zonation in the rocky mountains, Northern Utah, USA. *J. Mt. Sci.* 2014, 11, 656–673, doi:10.1007/s11629-013-2793-3.

LATTIN, J.M.; CARROLL, J.D.; GREEN, P.E. (2003): *Analyzing Multivariate Data*; Thomson Brooks/Cole: Pacific Grove, CA, USA, 2003. 556 s. ISBN 0534349749.

LIAW, A.; WIENER, M. (2002): Classification and regression by randomForest. *R News*. 2002, 2/3, 18–22.

MACKŮ, J. (2012): Methodology for establishing the degree of naturalness of forest stands. *Acta Univ. Agric. Silv. Mendelianae Brun.* 2012, 60, 161–166.

MCCUNE, B.; GRACE, J.B. (2002): *Analysis of Ecological Communities*; MjM Software Design: Gleneden Beach, OR, USA, 2002. 300 s. ISBN 0-9721290-0-6.

MCCUNE, B.; MEFFORD, M.J. (2011): *PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data, Version 6.0 for Windows 2011*; MjM Software: Gleneden Beach, OR, USA, 2011.

MIKESKA, M. (2000): Návrh tvorby a členění linií geograficky zonálních vegetačních stupňů (Proposal of formation and classification of outlines of geographically zonal

vegetation tiers). In *Problematika Lesnické Typologie II* (The Question of Forest Typology II); Viewegh, J., Ed.; Česká Zemědělská Univerzita v Praze, Fakulta Lesnická, Katedra Dendrologie a Šlechtění Lesních Dřevin: Kostelec nad Černými Lesy, Czech Republic, 2000; Volume II, s 8–10.

MÜLLEROVÁ, J.; HÉDL, R.; SZABÓ, P. (2015): Coppice abandonment and its implications for species diversity in forest vegetation. *For. Ecol. Manag.* 2015, 343, 88–100, doi:10.1016/j.foreco.2015.02.003.

NĚMEČEK, J.; KOZÁK, J. (2001): The Czech taxonomic soil classification system and the harmonization of soil maps. In *Research Report No. 7*; Czech Agricultural University, Department of Soil Science and Geology, Prague, Czech Republic: 2001. 47–53 s.

NOVÁK, J.; SVOBODA, J.; ŠÍDA, P.; PROSTŘEDNÍK, J.; POKORNÝ, P. (2015): A charcoal record of Holocene woodland succession from sandstone rock shelters of North Bohemia (Czech Republic). *Quat. Int.* 2015, 366, 25–36, doi:10.1016/j.quaint.2014.08.042.

OKSANEN, J.; BLANCHET, F.G.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; MINCHIN, P.R.; O'HARA, R.B.; SIMPSON, G.L.; SOLYMOS, P.; STEVENS, M.H.H.; WAGNER, H. (2016): *Vegan: Community Ecology Package. Ordination Methods, Diversity Analysis and Other Functions for Community and Vegetation Ecologists. Version 2.3-4.*; 2016.

PECK, J.E. (2010): *Multivariate Analysis for Community Ecologists: Step-By-Step Using PC-ORD*; MjM Software: Gleneden Beach, OR, USA, 2010. 162 s. ISBN 0972129022.

PLÍVA, K. (1971): *Typologický Systém ÚHÚL* (Forest Classification System of the Forest Management Institute); Ústav pro Hospodářskou Úpravu lesů Brandýs nad Labem: Brandýs nad Labem, Czechoslovakia, 1971. 90 s.

POJAR, J.; KLINKA, K.; MEIDINGER, D.V. (1987): Biogeoclimatic ecosystem classification in British Columbia. *For. Ecol. Manag.* 1987, 22, 119–154, doi:10.1016/0378-1127(87)90100-9.

PRŮŠA, E. (2001): *Pěstování lesů na Typologických Základech* (Cultivation of Forests Based on Forest Classification), 1st ed.; Lesnická Práce s.r.o.: Kostelec nad Černými Lesy, Czech Republic, 2001. 593 s. ISBN 80-86386-10-4.

PYŠEK, P.; DANIHELKA, J.; SÁDLO, J.; CHRTEK, J.J.; CHYTRÝ, M.; JAROŠÍK, V.; KAPLAN, Z.; KRAHULEC, F.; MORAVCOVÁ, L.; PERGL, J.; et al. (2012): Catalogue of alien plants of the Czech Republic (2nd edition): Checklist update, taxonomic diversity and invasion patterns. *Preslia* 2012, 84, 155–255.

RANDUŠKA, D.; VOREL, J.; PLÍVA, K. (1986): *Fytocenológia a Lesnícka Typológia* (Phytocenology and Forest Typology), 1st ed.; Príroda: Bratislava, Czechoslovakia, 1986. 329 s.

R CORE TEAM. (2014): *R: A Language and Environment for Statistical Computing* 2014; R Core Team: Vienna, Austria, 2014.

ROBERTS, D.W.; COOPER, S.V. (1987): Concepts and techniques in vegetation mapping. In *Proceedings—Land Classifications Based on Vegetation: Applications for Resource Management*, Moscow, Idaho November 17–19, 1987; Ferguson, D.E., Morgan, P., Johnson, F.D., Eds.; General Technical Report INT, 257.; SAF Publication, 88-06; United States Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station: Ogden, UT, USA, 1989. 90–96 s.

ROBIN, V.; TALON, B.; NELLE, O. (2013): Pedoanthracological contribution to forest naturalness assessment. *Quat. Int.* 2013, 289, 5–15, doi:10.1016/j.quaint.2012.02.023.

SUKACHEV, V.N.; DYLLIS, N.V. (1964): *Fundamentals of Forest Biogeocenology*; Translated from the Russian Edition (Moscow, 1964) by J. M. MacLennan.; Oliver and Boyd: Edinburgh, Scotland, 1968. 672 s.

ŠAMONIL, P. (2012): Paradigma lesnické typologie z pohledu dynamiky přirozených lesů (Paradigm of forest typology from a view of forestry practice). *Lesn. Práce* 2012, 91, 19–21 (623–625).

SMITH, S.; DAVIDSON, B. (2003): User's Manual, Terrestrial Ecological Unit Inventory (TEUI) Land Type Associations, Modoc National Forest; R5-TP; U.S. Department of Agriculture, Forest Service: Washington, DC, USA, 2003. 268 s.

TANSLEY, A.G. (1935): The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology* 1935, 16, 284–307, doi:10.2307/1930070.

TREML, V.; JANKOVSKÁ, V.; PETR, L. (2008): Holocene dynamics of the alpine timberline in the High Sudetes. *Biologia* 2008, 63, 73–80, doi:10.2478/s11756-008-0021-3.

TÜXEN, R. (1956): Die Heutige Potentielle Natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung; *Angewandte Pflanzensoziologie* 13; Bundesanstalt (Zentralstelle) für Vegetationskartierung: Stolzenau, Germany, 1956. 55 s.

VIEWEGH, J.; KUSBACH, A.; MIKESKA, M. (2003): Czech forest ecosystem classification. *J. For. Sci.* 2003, 49, 85–93.

VIŠŇÁK, R. (2001): Aktuální stav typologického systému a možnosti jeho dalšího vývoje (A state and possibilities of development of the Czech Forest Ecosystem Classification). *Lesn. Práce* 2001, 80, 72–75.

VOLAŘÍK, D. (2010): Application of digital elevation model for mapping vegetation tiers. *J. For. Sci.* 2010, 56, 112–120.

ZLATNÍK, A. (1959): Přehled Slovenských lesů Podle Skupin Lesních Typů (An Overview of Slovak Forests by Forest Types Groups); *Spisy Vědecké Laboratoře Biogeocenologie a Typologie lesa Lesnické Fakulty Vysoké Školy Zemědělské v Brně; Lesnická Fakulta Vysoké školy Zemědělské v Brně*: Brno, Czechoslovakia, 1959. 195 s.

ZLATNÍK, A. (1976): *Lesnická Fytocenologie*. Státní Zemědělské Nakladatelství Praha: Praha, Czechoslovakia, 1976. 495 s.

ZOUHAR, V. (2012a): Stav lesnicko-typologického klasifikačního systému a možnosti jeho vývoje (The Czech Forest Ecosystem Classification—Present situation and development). In *Geobiocenologie a její Aplikace v Lesnictví a Krajinářství. Sborník Příspěvků z Konference konané 6.–7. prosince 2012 v Brně. (Geobiocoenology and Its Application in Forestry and Landscape Ecology, Proceedings of the Conference Held on 6–7 December 2012; Friedl, M., Ed.; Geobiocenologické Spisy; Lesnická Práce s.r.o.: Kostelec nad Černými Lesy, Czech Republic, 2013; Volume 15. 218–224 s.*

ZOUHAR, V. (2012b): Database of Czech Forest Classification System. *Biodivers. Ecol.* 2012, 4, 346–346, doi:10.7809/b-e.00137.