

VPLYV PRÍZEMNEJ VEGETÁCIE A PODRASTU NA PRIEBEH FENOLOGICKEJ KRIVKY BUKOVÝCH PORASTOV ODVODENEJ Z ÚDAJOV MODIS

VERONIKA BRANDÝSOVÁ¹, TOMÁŠ BUCHA²

¹*Technická univerzita vo Zvolene, Lesnícka fakulta, T. G. Masaryka 24, SK – 960 53 Zvolen,
e-mail: veronika.brandysova@gmail.com*

²*Národné lesnícke centrum - Lesnícky výskumný ústav Zvolen, T. G. Masaryka 22, SK – 960 92 Zvolen,
e-mail: bucha@nlcsk.org*

BRANDÝSOVÁ, V., BUCHA, T., 2012: Effect of understory vegetation and undergrowth on course of phenological curve of beech forests derived from MODIS. *Lesnícky časopis - Forestry Journal*, **58**(4): 231–242, 2012, 5 fig., tab. 5, ref. 28, ISSN 0323 – 1046. Original paper

Vegetation index NDVI derived from satellite data MODIS (product MOD09) was used for monitoring of phenological phases of beech stands. The effect of leaves of upper story and undergrowth trees, understory vegetation, bark of thin and thick branches, trunk, and litter on NDVI value was identified and quantified for determination of the onset of phenological phases in five beech stands. The phenological observations were carried out in the spring 2011. Phenological curves were modelled for each stand. Inputs were $NDVI_{sat}$ derived from MODIS. The NDVI value for each component was determined from spectral analyses, and its percentage was estimated. Consequently, $NDVI_{model}$ values were calculated for each stand and compared with $NDVI_{sat}$. We found out that $NDVI_{sat}$ values are systematically biased from $NDVI_{model}$ values a quotient q was established to revise this biased $NDVI_{sat}$ values. Possibilities for satellite long-term phenological monitoring resulted from the quantified effect of individual forest components on NDVI value. The 100% leaf onset is the most suitable phase for phenological monitoring of the canopy trees component. The 100% leaf budburst is suitable phenophase for monitoring of forest stands phenology.

Keywords: NDVI, MODIS, phenological curve, undergrowth, understory vegetation

Vegetačný index NDVI odvodený zo satelitných záznamov MODIS (produkt MOD09) sme využili pre sledovanie fenologických prejavov bukových porastov. Pre spresnenie nástupu jednotlivých fenologických fáz sme zistili a kvantifikovali vplyv všetkých zložiek porastu, ktoré ovplyvňujú hodnotu NDVI, a to: listov úrovňových a podúrovňových drevín, prízemnej vegetácie, kôry tenkých a hrubých konárov a kmeňa, a opadanky. Objektom nášho výskumu bolo päť bukových porastov, na ktorých sme v jarnom období roku 2011 sledovali priebeh fenofáz. Pre každý porast sme odvodili fenologickú krivku. Vstupnými údajmi boli vegetačné indexy $NDVI_{sat}$ z MODIS. Pre každú porastovú zložku bola stanovená hodnota NDVI pomocou spektrálnych analýz a odhadnutý jej percentuálny podiel v jednotlivých porastoch. Z týchto hodnôt sme vypočítali modelovú hodnotu $NDVI_{model}$ pre každý porast. Túto sme porovnali s hodnotou $NDVI_{sat}$. Zistili sme, že hodnoty $NDVI_{sat}$ sú systematicky vychýlené od $NDVI_{model}$. Zaviedli sme kvocient q , ktorým sme systematické vychýlenie skorigovali u všetkých hodnôt $NDVI_{sat}$. Z kvantifikácie vplyvu jednotlivých zložiek porastu na hodnotu NDVI vyplývajú možnosti ich dlhodobého monitorovania. Pre sledovanie fenofáz drevín hlavnej úrovne je najvhodnejšia fáza 100 % zalistenie. Pre sledovanie fenologických prejavov bukových porastov ako celku je vhodná fáza 100 % rozpuk listových pupeňov.

Kľúčové slová: NDVI, MODIS, fenologická krivka, podrast, prízemná vegetácia

1. Úvod a problematika

Európska komisia (EK) vo svojej bielej knihe *Adaptácia na zmenu klímy: Európsky rámec opatrení* zdôraz-

ňuje, že zmena klímy sa prejavuje a bude sa prejavovať aj na lesoch. Následne EK prijala 1. marca 2010 Zelenú knihu o ochrane lesov a informáciách o lesoch v Európskej

únii (EÚ), v ktorej iniciuje diskusiu o možnej koncepcii EÚ v uvedenej oblasti (EK, 2010). Jedným z kľúčových bodov je zabezpečenie potrebných informácií a vedeckých poznatkov pre zachovanie funkcií lesov v zmenených klimatických podmienkach (ibid.). K naplneniu uvedeného smeruje aj naša práca, v ktorej rozpracúvame metódu pre sledovanie reakcie lesa na zmenu klímy prostredníctvom jeho fenologických prejavov prostriedkami diaľkového prieskumu Zeme (DPZ).

Fenológia je veda skúmajúca priebeh periodicky sa opakujúcich životných prejavov rastlín, tzv. fenologických fáz, v závislosti od komplexu podmienok vonkajšieho prostredia (SOBÍŠEK *et al.*, 1993). Zmeny v nástupe a priebehu fenofáz sa považujú za vhodného ukazovateľa meniacich sa podmienok prírodného prostredia (ŠTEFANČÍK, 1995). Preto dreviny môžeme považovať za bioklimatologický indikátor klimatických zmien (ŠKVARINOVÁ, 2009).

V minulosti bola rastlinná fenológia výhradne predmetom terénneho (pozemného) pozorovania, ale technický rozvoj v oblasti DPZ umožnil sledovanie nástupu fenologických udalostí prostredníctvom satelitných záznamov. Prvé práce z oblasti satelitnej fenológie využívali záznamy z rádiometra AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Tieto sú poskytované od roku 1981 s maximálnou priestorovou rozlišovacou schopnosťou 1,1 km. Pomocou týchto záznamov boli identifikované tri základné charakteristiky vegetačného obdobia (VO), a to začiatok, koniec a dĺžka trvania (napr. ZHOU *et al.*, 2001; LEE *et al.*, 2002; STOCKLI & VIDALE, 2005; PIAO *et al.*, 2006; HEUMANN *et al.*, 2007). Za vhodného ukazovateľa množstva, stavu a vývoja vegetácie sa považuje normalizovaný vegetačný index (NDVI). Veľkosť NDVI indexu zodpovedá fotosyntetickej aktivite vegetácie. Chlorofyl obsiahnutý v listoch rastlín silno absorbuje viditeľnú časť slnečného žiarenia. Naproti tomu bunková štruktúra listov silno odráža blízke infračervené žiarenie. Čím viac listov vegetácia má, tým viac viditeľného žiarenia je absorbovaného a blízkeho infračerveného zasa odrazeného. V konečnom dôsledku je tento fakt dobrým ukazovateľom množstva a kondície vegetácie (SCHOLTZ *et al.*, 2010 in FERANEC, 2010).

Nové možnosti sledovania fenologických zmien vegetácie nastali vypustením družíc Terra (február 2000) a Aqua (júl 2002). Tieto družice majú na palube umiestnený spektorradiometer MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer). MODIS má široký spektrálny rozsah 0,4 – 14,5 μm , priestorovú rozlišovaciu schopnosť 250 – 1 000 m a zabezpečuje každodenné snímanie konkrétnych území (JUSTICE *et al.*, 2002). ZHANG *et al.* (2003) prezentovali prvý pokus o štúdium fenologických prejavov vegetácie použitím údajov získaných z MODIS-u. Za vhodného ukazovateľa zmien vegetácie považujú EVI (Enhanced Vegetation Index) a zmeny jeho hodnoty v čase znázorňujú pomocou úsekov logistickej funkcie. Na tomto princípe je založený

aj produkt „Collection 5“ MLCD (MODIS Land Cover Dynamics) (GANGULY *et al.*, 2010). Jeho výhodou je, že termíny nástupu fenologických udalostí ako zalistenie, dospelosť, starnutie a dormancia sú už odvodené a uložené v jednotlivých súboroch tohto produktu. Zo Zhangovej funkcie vychádzali aj FISHER *et al.* (2006, 2007), ktorí ju modifikovali na sigmoidnú logistickú funkciu. Maximum 1. derivácie tejto funkcie tzv. „polovičné maximum“ chápu ako termín, kedy vypučí najviac listov. Podobne SOUDANI *et al.* (2008) odvodili svoju asymetrickú dvojito-sigmoidnú funkciu zo Zhangovej (2003). Z funkcie odviedol 3 dátumy: *dminNDVI* ako deň začiatku zvyšovania hodnoty NDVI, *dinfNDVI* ako deň kedy dosahuje funkcia inflexný bod a *dmaxNDVI* ako deň kedy hodnoty NDVI dosahujú stabilnú hladinu na konci vzostupnej fázy krivky. JÖNSSON *et al.* (2010) skúmali možnosť sledovať zmeny v ihličnatých lesoch použitím MODIS 8-dňových kompozícií vegetačných indexov. Okrem bežne používaného NDVI navrhli na sledovanie fenologických prejavov drevín použitie WDRVI (Wide Dynamic Range Vegetation Index). WDRVI redukuje saturačný efekt, ktorý nastáva obvyčajne u NDVI pri zväčšovaní listovej plochy. Dospeli k záverom, že bežne používanú metodiku odvodzovania fenologických udalostí na základe extrémov fenologickej krivky nie je možné použiť pre ihličnaté porasty. Odôvodňujú to tým, že stále zelená vegetácia sa nevyznačuje rýchlym zvýšením zelenej biomasy počas jari tak, ako je to pri opadavých listnatých druhoch, a že zmeny v hodnotách vegetačných indexov v čase pučania môžu byť vyvolané topením snehu v boreálnych ihličnatých lesoch.

V niektorých porastoch sa skôr ako koruny stromov začínajú zalisťovať niektoré druhy prízemnej vegetácie a podrastu. Súvisí to so stratégiou tzv. „fenologického úniku“, pri ktorej rastliny na jar využívajú výhodu presvetleného porastu pred zalistením úrovňových drevín (RICHARDSON & O'KEEFE, 2009). Viacero autorov pri sledovaní fenologických prejavov lesných drevín zo satelitných záznamov dospelo k záverom, že prízemná vegetácia a podrast v lesných porastoch môžu významne ovplyvniť hodnoty vegetačných indexov v čase pred začiatkom zalistenia sledovaných drevín. AHL *et al.* (2006) uviedli, že existujú dve príčiny, ktorými sa dá vysvetliť rozdiel medzi pozemne sledovanými a satelitne odvodenými termínmi začiatku vegetačného obdobia pri lesných drevinách a to:

- a) využívanie časových kompozícií MODIS záznamov (8, 10, 14, 16-dňové atď.), ktoré sú vytvárané za účelom odstránenia šumu vyplývajúceho z kontaminácie záznamov oblačnosťou alebo atmosférickými vplyvmi,
- b) vývoj prízemnej vegetácie, ktorý začína skôr ako pri sledovaných drevinách.

FISHER *et al.* (2006) uviedli, že Zhangova metodika (2002) ktorá identifikuje v jarnom období termín nástupu zelene a zrelosti ako body najväčšieho zakrivenia

sigmoidnej funkcie môže byť citlivá na rast skorej jarnej vegetácie. Ďalej uviedli, že deň nástupu zalistenia nastal skôr pri porastoch s bohatou vertikálnou štruktúrou ako pri výškovo homogénnych porastoch. NAGAI *et al.* (2010) pri sledovaní vzťahu medzi hodnotami NDVI a fenologickými prejavmi listnatých lesov v Japonsku vymedzili hodnoty NDVI, pri ktorých sa prejavuje vplyv vegetácie podrastu tvorenej bambusom *Sasa senanensis*. PRIWITZER *et al.* (2009) zistili vplyv podrastu na priebeh fenologickej krivky porastov duba cerového (*Quercus ceris*) v podmienkach Slovenska.

Cieľom práce je kvantifikovať príspevok prízemnej vegetácie a podrastu na rast hodnôt NDVI v lesných porastoch s prevládajúcim zastúpením buka, a to počas jarneho vegetačného obdobia až do nástupu 100 % zalistenia. Kvantifikácia vplyvu prízemnej vegetácie a podrastu na hodnoty NDVI umožní spresniť dni nástupu jednotlivých fenofáz lesných drevín a vybrať vhodnú fenofázu pre dlhodobé monitorovanie fenologických prejavov jednotlivých zložiek lesných ekosystémov zo satelitných záznamov.

2. Materiál a metódy

2.1. Vymedzenie a charakteristika sledovaných porastov

Porasty, ktoré boli predmetom nášho výskumu počas jarneho obdobia roku 2011, sa nachádzajú v orografických celkoch Kremnické vrchy a Zvolenská kotlina. Ide o lokality Turová a Bukovina. Organizačne patria pod Vysokoškolský lesnícky podnik (VŠLP) TU vo Zvolene. Pri výbere porastov sme použili klasifikáciu drevinového zloženia lesov Slovenska zo satelitných záznamov (BUCHA, 1999) s rozlíšením upraveným na 250 m a údaje z opisu porastov po základných jednotkách priestorového rozdelenia lesa (JPRL) z interneto-

vého portálu <http://lvu.nlcsl.org/lgis/>. Z vrstvy tvorenej pixelmi klasifikovanými ako drevo buk sme vyľúčili pixely na rozhraní lesa a bezlesia. Tie môžu byť spektrálne kontaminované nelesnými typmi krajiny prikrývky. Uvedené vyplýva z tvaru prístrojovej funkcie (point spread function) a presnosti polohovej lokalizácie snímok MODIS, ktorá je ~ 50 m v nadíre (WOLFE *et al.*, 2002). Vybrali sme 5 pixelov, pričom každý pixel sa nachádza v osobitnom dieľci s prevládajúcim zastúpením buka a minimálnym zastúpením neopadavých ihličnatých drevín (tab. 1). V práci neanalyzujeme celý dielec, ale iba jeho určitú časť (ďalej len porast). Táto má výmeru 6,25 ha a zodpovedá jednému obrazovému prvku (pixelu) MODIS s priestorovým rozlíšením 250 × 250 m. Vo všetkých vybratých dieľcoch sa v podúrovni nachádza podrast s hojným výskytom drevín (obr. 1). Pojmom podrast v práci označujeme rastliny, kry a stromy, ktoré dosahujú maximálne polovicu výšky hlavnej stromovej úrovne.



Obr. 1. Interiér porastu 514 a v období jarých fenofáz
Fig. 1. Interior of stand 514 a during spring phenophases

Tabuľka 1. Základné charakteristiky hodnotených lesných porastov

Table 1. Basic characteristics of forest stands

Charakteristika ¹⁾	Dielec ²⁾				
	509 a	514 a, 1. etáž ¹³⁾	531	541	619 a
Vekový stupeň ³⁾	5	10	7	8	6
Dreviny ⁴⁾	BK 85, BO 5, DB 5, SC 5	BK 66, DB 30, JD 3, SM 1	BK 65, DB 20, JD 10, SM 5	BK 100	BK 70, DB 20, HB 10
Nadmorská výška [m n. m.] ⁵⁾	447	560	591	602	532
Zakmenenie ⁶⁾	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9
Expozícia ⁷⁾	Z	Z	Z	V	S
Sklon ⁸⁾	25	40	40	40	30
Hospodársky súbor lesných typov ⁹⁾	310 ¹⁰⁾	311 ¹¹⁾	310	310	310
Pôda ¹²⁾	skalnatá, miestami balvanitá ¹³⁾				

¹⁾Characteristic, ²⁾Stand, ³⁾Age in decades, ⁴⁾Species: BK – *Fagus sylvatica*, BO – *Pinus sylvestris*, DB – *Quercus petraea*, HB – *Carpinus betulus*, JD – *Abies alba*, SC – *Larix decidua*, SM – *Picea abies*, ⁵⁾Altitude, ⁶⁾Stocking level, ⁷⁾Aspect, ⁸⁾Slope, ⁹⁾Management forest types file,

¹⁰⁾Fresh oak-beechwood, ¹¹⁾Nutritive oak-beechwood, ¹²⁾Soil: rocky, somewhere with boulders, ¹³⁾Upper layer

2.2. Odvodenie NDVI zo satelitných záznamov a modelovanie priebehu fenologických prejavov lesných drevín

Hodnoty NDVI odvodené zo satelitných záznamov sa vzťahujú ku konkrétnemu obrazovému prvku. Ide o hodnoty reprezentujúce všetky porastové zložky. Na odvodenie NDVI sme použili snímky MODIS produkt MOD09. Postup získania a spracovania satelitných záznamov MODIS bol opísaný v prácach BUCHA & KOREŇ (2009) a BRANDÝSOVÁ (2010). Hodnoty vegetačného indexu NDVI sme odvodili zo spektrálnej odrazivosti v červenom kanáli (RED: 620 – 670 nm) a infračervenom kanáli (IRED: 841 – 876 nm) [1]:

$$NDVI = \frac{(IRED - RED)}{(IRED + RED)} \quad [1]$$

Hodnoty NDVI sme odvodili pre 5 vybraných pixelov na území VŠLP TU vo Zvolene pre jaré obdobie roku 2011, v ktorom boli vykonávané terénne pozorovania. Fenologický vývoj lesných drevín rastúcich v našich podmienkach je možné modelovať logistickou sigmoidnou funkciou [2] (FISHER *et al.*, 2006; FISHER & MUSTARD, 2007), ktorá zachytáva jedno vzostupné (jaré) obdobie, obdobie plného olistenia (letná fáza) a jedno zostupné (jesenné) obdobie:

$$v(t) = v_{min} + v_{amp} \left(\frac{1}{1 + e^{m_1 - n_1 t}} - \frac{1}{1 + e^{m_2 - n_2 t}} \right) \quad [2]$$

kde $v(t)$ je hodnota vegetačného indexu NDVI; v_{min} je minimálna hodnota NDVI a v_{amp} je celková amplitúda NDVI; m_1 , m_2 , a n_1 , n_2 sú parametre určujúce tvar krivky pre vzostupné (jaré) obdobie (m_1 , n_1) a zostupné (jesenné) obdobie (m_2 , n_2).

Priebeh fenologických prejavov sme modelovali v programe Phenological profile (BUCHA & KOREŇ, 2009), ktorý pri modelovaní používa logistickú sigmoidnú funkciu [2]. Vstupnými údajmi sú časové rady NDVI pre rok 2011. Na zistenie času nástupu fenologických fáz sme použili 1. a 2. deriváciu fenologickej funkcie a ich extrémne hodnoty.

2.3. Kvantifikácia vplyvu porastových zložiek na hodnotu NDVI porastu

Hodnota NDVI porastu odvodená zo satelitných záznamov závisí od množstva zelených asimilačných orgánov (listov) drevín a prízemnej vegetácie, pričom je ovplyvnená odrazivosťou kôry drevín, pôdy a opadanky. Prízemná vegetácia, dreviny porastovej úrovne a podrast, ktoré svojimi zelenými listami najviac ovplyvňujú hodnotu NDVI porastu sa na jar v bukových po-

rastoch nezačínajú vyvíjať súčasne. Podrast a prízemná vegetácia sa riadia stratégiou fenologického úniku. Na kvantifikáciu vplyvu jednotlivých zložiek na rastúcu hodnotu NDVI porastov počas obdobia jarých fenofáz sme zvolili metódu modelovania. V procese tvorby modelu sme najskôr identifikovali hlavné zložky sledovaných bukových porastov (ďalej len zložky), medzi ktoré patria: listy úrovňových drevín, listy podúrovňových drevín, prízemná vegetácia, kôra tenkých konárov, kôra hrubých konárov a kmeňa a opadanka. Pre každú z týchto zložiek boli:

- spektrálnou analýzou zistené hodnoty spektrálnej odrazivosti a z nich vypočítané hodnoty vegetačných indexov NDVI,
- stanovené ich percentuálne podiely na celkovom NDVI porastu.

Po matematickej stránke sme model konštruovali ako aditívny, t. j. výsledná hodnota NDVI sa získava sčítaním hodnôt jednotlivých zložiek. Vstupné údaje (percentuálne podiely jednotlivých zložiek) sme získali metódami:

- odhadu pri terénnych pozorovaniach,
- obrazových analýz fotografických záznamov.

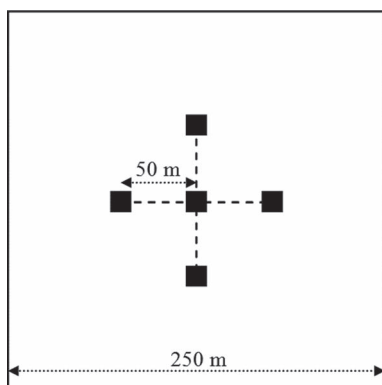
Overenie modelu sme vykonali porovnaním modelovaných hodnôt s reálne zistenými hodnotami NDVI zo spektoradiometra MODIS.

2.3.1 Terénne pozorovania

V jarom období roku 2011 (29. marec – 8. jún) sme v sledovaných porastoch zaznamenávali pokryvnosť prízemnej vegetácie a jaré fenologické fázy drevinovej zložky porastov v 3 – 7-dňových intervaloch. Súčasne sme fotograficky zaznamenávali koruny stromov a podrast, a odoberali sme vzorky asimilačných orgánov vegetácie, opadaného lístia a bukovkej kôry za účelom ich spektrálnej analýzy v laboratórnych podmienkach. Aby sme zachovali čo najdlhšiu čerstvosť vzoriek, pri prízemnej vegetácii odoberali sme celé rastliny, pri drevinách listy aj s konármi. Kôru sme vyrezali zo živých stromov z kmeňovej časti a z korún. Suché lístie sme zozbierali z hornej vrstvy minuloročnej opadanky.

Pri terénnom sledovaní pokryvnosti prízemnej vegetácie v opadavých dubovo-bukových porastoch Európy sa najbežnejšie používa 1 plocha za porast s výmerou 100, 200 a 400 m² (CHYTRÝ & OTÝPKOVÁ, 2003). V práci sme použili metódu odhadu na štvoruholníkových plochách s výmerou 100 m². V každom poraste bolo založených 5 takýchto monitorovacích plôch, ktorých stredy sú od seba vzdialené 50 m podľa schémy na obrázku 2.

Pre fenologické pozorovania bola zvolená metodika podľa SHMÚ (1984). V každom bukovom poraste boli fenofázy pozorované na skupinke 10 úrovňových, resp. nadúrovňových stromov rastúcich v centre porastu. Použitá metodika stanovuje minimálny hraničný vek pre fenologické pozorovania 60 rokov. V našom prípade je malou výnimkou 58-ročný porast 509 a. V jarom ob-



Obr. 2. Schéma rozmiestnenia plôch na sledovanie prízemnej vegetácie ■ monitorovacia plocha

Fig. 2. Sampling design for monitoring understory vegetation: ■ sample plot



Obr. 3. Neolistené korony stromov v poraste 541 v čase pred začiatkom vegetačného obdobia

Fig. 3. Naked trees in stand 541 before start of growing season

dobí 2011 boli na vybratých skupinkách stromov sledované 4 fenofázy:

- *Pučanie listových pupeňov* (PLP) – pupene vplyvom rastu zväčšili svoj objem a na okrajoch pupeňových šupín sa objavilo bledozelené sfarbenie.
- *Rozpuk listových pupeňov* (RLP) – obalové šupiny praskli a v strede pupeňa sa objavili zelené konce mladých lístkov, obalové šupiny zotrúvajú v strednej a spodnej časti pupeňa.
- *Zalistenie* (ZAL) – jednotlivý terminálny pupeň má už úplne rozvinutý prvý lístoček, ktorý má normálny tvar a čepeľ, ale nemá ešte normálnu veľkosť a sfarbenie.
- *Konečné zalistenie* – všetky listy na všetkých jarných výhonkoch dosiahli rozmer a sfarbenie normálneho listu.

Pri sledovaní uvedených fenologických fáz sme rozlišovali 3 základné stavy:

- *Začiatok nástupu* – deň, keď na pozorovanej skupinke dosiahla fáza 10 % výskyt.
- *Všeobecný nástup* – deň, keď na pozorovanej skupinke dosiahla fáza 50 % výskyt.
- *Úplný nástup* – deň, keď na pozorovanej skupinke dosiahla fáza 100 % výskyt.

2.3.2 Laboratórne meranie spektrálnej odrazivosti

V laboratórnych podmienkach sme spektorrádiometrom LI-1800 odmerali odrazivosti vzoriek čerstvého a opadnutého bukoveho lístia, čerstvej prízemnej vegetácie a bukovej kôry so vlnovom rozsahu 300 – 1 100 nm. Z nameraných hodnôt odrazivosti sme odvodili hodnoty NDVI pre jednotlivé vzorky.

LI-1800 je mikroprocesorom riadený spektorrádiometer vybavený rôznymi prídavnými zariadeniami, z ktorých sme pre meranie hodnôt odrazivosti použili vonkajšiu integračnú sféru 1800-12 s vlastným svetelným zdrojom.

2.3.3 Stanovenie plochy porastov zatienených neolistenými drevinami

Plochu porastov zatienených neolistenými drevinami sme stanovili z farebných digitálnych fotografií (obr. 3). Fotografie sme vyhotovili fotoaparátom Nikon D50 vo vertikálnom smere nahor zo stredu hodnotenej skupiny stromov v každom poraste. Fotografie boli v programe Corel Photo-Paint X5 skonvertované na čiernobiele kvôli jednoduchšiemu rozlíšeniu svetlej oblohy a tmavých stromov. Na stanovenie plochy, ktorú na fotografiách zakrývajú stromy, sme použili program Idrisi Andes. V tomto programe sme podľa hodnôt optickej hustoty vytvorili dve klasifikačné triedy: stromy (0) a obloha (1). Pre každú triedu sme stanovili jej plochu a osobitne pre každý porast sme vypočítali priemerný percentuálny podiel plochy zakrytej neolistenými stromami.

V rámci spektrálnych analýz boli zistené rozdielne hodnoty NDVI pri kôre tenkých a hrubých konárov, preto sme vypočítanú hodnotu percentuálneho podielu neolistených stromov rozdelili medzi (i) tenké konáre a (ii) kmeň s hrubými konármi. V programe ArcGIS sme stanovili pomer (i) a (ii) pre jednotlivé stromy a následne sme vypočítali priemer. Priemerný pomer medzi tenkými konármi a kmeňom s hrubými konármi, ktorý sme použili v modeli pre všetky porasty, je 3 : 7.

2.3.4 Princíp modelovania NDVI hodnoty porastov

Princípom tvorby NDVI modelov porastov je stanovenie percentuálneho podielu jeho hlavných zložiek z celkovej hodnoty NDVI porastu, ktorá predstavuje 100 %. Postup stanovenia ich podielu bol nasledovný:

- Percentuálny podiel listov drevín porastovej úrovne pre pozorovací deň sme stanovili v porastoch odhadom so zaokrúhlením na celé percento počas terénnych pozorovaní a vztiahli k pozorovanej fenofáze.
- Percentuálny podiel listov drevín podrastu sme stanovili rovnakým postupom ako pri úrovňových dre-

vinách na základe odhadu so zaokrúhlením na celé percento.

- Percentuálny podiel prízemnej vegetácie sme odhadli v rámci terénnych pozorovaní na monitorovacích plochách so zaokrúhlením na celé percento.
- Percentuálny podiel plochy zakrytej neolistenými konármi a kmeňom sme zistili obrazovými analýzami digitálnych fotografií.
- Percentuálny podiel opadanky sme stanovili výpočtom ako zostávajúce percento ($\%O = 100 \% - \sum \%_{\text{ostatných zložiek}}$).

Pre vytvorený model je charakteristické postupné zvyšovanie podielu zelených listov počas nástupu jarných fenofáz pri súčasnom znižovaní podielu kmeňa, konárov, prízemnej vegetácie a opadanky v čase. Prvé sa začínajú rozvíjať listy podrastu, preto je percento ostatných, nižšie položených porastových zložiek, znížené o toľko percent, o koľko sa zvýši podiel listov podrastu. Neskôr sa začínajú zalisťovať úrovňové dreviny, pričom o percento ich podielu je v prvom rade zmenšený podiel listov podrastu. Podiel ostatných zložiek je znížený o kumulatívny percentuálny podiel listov podrastu a úrovňových jedincov¹. Hodnoty percentuálnych podielov všetkých zložiek porastu spolu s ich hodnotami NDVI vstupujú do modelu porastov, ktorým stanovujeme celkovú modelovanú NDVI hodnotu porastu [3]:

$$NDVI_{\text{model}} = \%NDVI_{KH} + \%NDVI_{KT} + \%NDVI_V + \%NDVI_{LDrU} + \%NDVI_O \quad [3]$$

kde $\%NDVI_{KH}$ je NDVI kmeňa a hrubých konárov vynásobený ich percentuálnym podielom, $\%NDVI_{KT}$ je NDVI tenkých konárov vynásobený ich percentuálnym podielom, $\%NDVI_V$ je NDVI prízemnej vegetácie vynásobený jej percentuálnym podielom, $\%NDVI_{LDrU}$ je NDVI listov drevín porastovej úrovne vynásobený ich percentuálnym podielom, $\%NDVI_{LDrP}$ je NDVI listov drevín podrastu vynásobený ich percentuálnym podielom, $\%NDVI_O$ je NDVI opadanky vynásobený jej percentuálnym podielom.

Modelovaná NDVI hodnota každého porastu bola porovnaná so satelitne odvodeným NDVI toho istého porastu.

3. Výsledky a diskusia

3.1. Štatistické zhodnotenie vstupných údajov modelu

Výstupom spektrálnych analýz porastových zložiek sú hodnoty ich odraznosti, z ktorých sme podľa vzťahu [1] vypočítali vegetačné indexy NDVI. Priemerné hodnoty NDVI porastových zložiek, ktoré sme získali zo spektrálnych analýz sú zaznamenané v tabuľke 2. Zistili sme, že existuje rozdiel v hodnotách NDVI listov úrovňových drevín v čase 100 % zalistenia a v čase konečného zalistenia (maximálna listová plocha). Tento stav je spôsobený rozdielmi vo veľkosti, farbe a štruktúre listov v týchto dvoch fenologických fázach. Zistený rozdiel sme zohľadnili v použitom modeli porastov tak, že v modeloch zostavených v čase 100 % zalistenia sme použili hodnotu $NDVI_{LDrU}$ zodpovedajúcu tomuto obdobiu a v modeloch zostavených v čase konečného

Tabuľka 2. Hodnoty NDVI zo spektrálnych analýz vykonaných v čase nástupu fenofáz 100 % zalistenie a konečné zalistenie

Table 2. NDVI values derived from spectral analysis during 100 % leaf onset and final leaf onset

NDVI	Fenologická fáza ⁸⁾	Priemer ¹¹⁾	Smerodajná odchýlka ¹²⁾
NDVI _{KT} ¹⁾	100 % ZAL ⁹⁾	0,63	0,03
	konečné ZAL ¹⁰⁾	—	—
NDVI _{KH} ²⁾	100 % ZAL ⁹⁾	0,46	0,04
	konečné ZAL ¹⁰⁾	—	—
NDVI _V ³⁾	100 % ZAL ⁹⁾	0,71	0,01
	konečné ZAL ¹⁰⁾	—	—
NDVI _{Lbku} ⁴⁾	100 % ZAL ⁹⁾	0,71	0,02
	konečné ZAL ¹⁰⁾	0,79	0,02
NDVI _{LDbu} ⁵⁾	100 % ZAL ⁹⁾	0,66	0,01
	konečné ZAL ¹⁰⁾	0,74	0,00
NDVI _{LbkuP} ⁶⁾	100 % ZAL ⁹⁾	0,66	0,01
	konečné ZAL ¹⁰⁾	—	—
NDVI _O ⁷⁾	100 % ZAL ⁹⁾	0,35	0,07
	konečné ZAL ¹⁰⁾	—	—

¹⁾NDVI of thin branches, ²⁾NDVI of large branches and trunk, ³⁾NDVI of understory vegetation, ⁴⁾NDVI of leaves of canopy beeches, ⁵⁾NDVI of leaves of canopy oaks, ⁶⁾NDVI of leaves of undergrowth trees, ⁷⁾NDVI of litter, ⁸⁾Phenological phase, ⁹⁾100% leaf onset, ¹⁰⁾Final leaf onset, ¹¹⁾Average, ¹²⁾Standard deviation

¹ Príklad: V poraste 509a v čase všeobecného rozpuku listových pupeňov úrovňových drevín pokrývali listy 10 % plochy porastu: $\%_{LDrU} = 10 \%$. Dreviny podrastu boli v tomto čase vo fenofáze úplného zalistenia a plošne zakrývali 25 % plochy porastu. Táto plocha bola však už na 10 % zakrytá listami úrovňových drevín, preto sme plochu podrastu znížili o 10 %: $\%_{LDrP} = 23 \%$ ($0,9 \cdot 25$). Spolu listy drevín úrovne a podrastu zakrývali 33 % plochy porastu. Listami drevín sú ďalej zatienené tenké konáre, hrubé konáre a kmene stromov (8,8 %, resp. 20,1 % – odvodené klasifikáciou pozemnej snímky) a prízemná vegetácia, preto sme ich percentuálne podiely znížili o 33 %. Tým sme získali hodnoty pre: $\%_{KT} = 6 \%$ ($0,67 \cdot 8,8$), $\%_{KH} = 14 \%$ ($0,67 \cdot 20,1$) a $\%_V = 4 \%$ ($0,67 \cdot 6,2$). Zostávajúcu plochu porastu do 100 % pokrýva v poraste 509 opadanka: $\%_O = 43 \%$ ($100 - 10 - 23 - 6 - 14 - 4$).

Tabuľka 3. Vývoj pokryvnosti prízemnej vegetácie a jej variabilita v rámci porastov počas jarneho obdobia

Table 3. Development of the coverage of understory vegetation and its variability in the stands during the spring season

Porast ¹⁾	Deň ²⁾	n ³⁾	Priemer ⁴⁾	Smerodajná odchýlka ⁴⁾	Variačné rozpätie ⁶⁾
509	101	5	4,80	2,05	5,00
	108	5	6,20	2,77	7,00
	116	5	13,80	5,12	10,00
	124	5	14,20	6,22	15,00
514	101	5	5,40	2,51	5,00
	108	5	11,20	3,90	10,00
	116	5	12,80	3,96	10,00
	124	5	16,80	9,63	23,00
531	101	5	13,60	2,19	5,00
	108	5	19,40	3,51	8,00
	116	5	25,80	7,05	18,00
	124	5	30,20	9,91	25,00
541	101	5	4,40	2,19	5,00
	108	5	9,80	3,42	8,00
	116	5	16,20	3,90	8,00
	124	5	18,60	6,88	17,00
619	101	5	5,40	2,51	5,00
	108	5	11,80	1,64	3,00
	116	5	16,40	2,30	5,00
	124	5	19,00	2,24	5,00

¹⁾Stand, ²⁾Day of year, ³⁾Number of plots, ⁴⁾Average, ⁵⁾Standard deviation, ⁶⁾Variation range

ho zalistenia sme použili hodnotu $NDVI_{LDrU}$ prislúchajúcu tomuto obdobiu.

Percentuálne podiely jednotlivých zložiek porastov sme nasimulovali pre celé porasty podľa princípu opísaného v kapitole 2.3.4. Pri odhade pokryvnosti listov

Table 4. Podiel plochy (%), ktorá je v porastoch zatienená neolistenými drevinami

Table 4. Area of forest stands (%) shaded by naked trees

Dielec ¹⁾	Priemer ²⁾	Smerodajná odchýlka ³⁾
509 a	29,4	0,3
514 a	34,8	0,6
531	35,7	1,8
541	34,2	1,4
619 a	34,5	1,0

¹⁾Stand, ²⁾Average, ³⁾Standard deviation

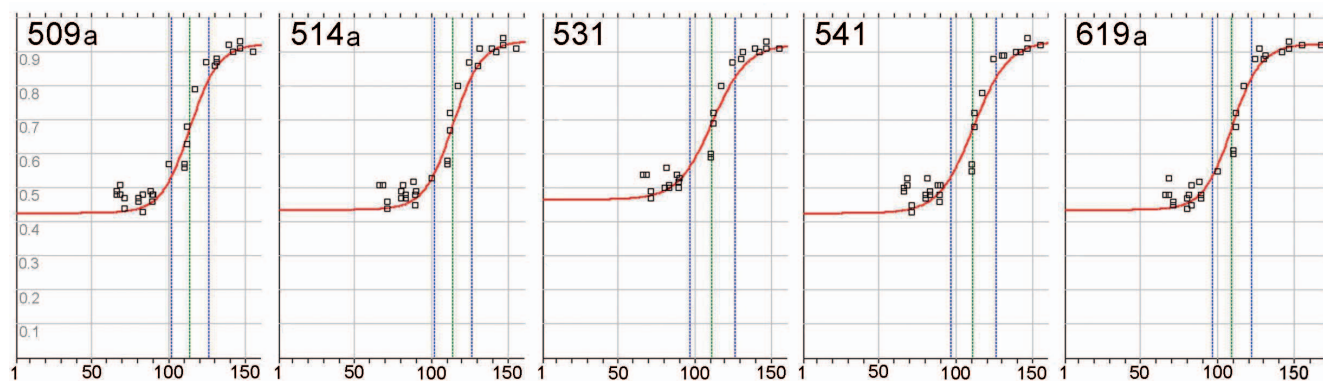
drevín sme vychádzali z pozorovaných fenologických fáz. Na základe odhadnutej pokryvnosti sme priradili:

- fenofáze 50 % RLP percentuálny podiel listov 10 %,
- fenofáze 50 % ZAL percentuálny podiel listov 45 %,
- fenofáze 100 % ZAL percentuálny podiel listov 90 %.

Pri pokryvnosti prízemnej vegetácie sme vypočítali priemernú hodnotu z monitorovacích plôch, ktorú sme zovšeobecniť pre celý porast. Vývoj pokryvnosti prízemnej vegetácie a jej variabilitu v rámci porastov počas jarneho obdobia sme uviedli v tabuľke 3.

Percentuálny podiel plochy zakrytej neolistenými konármi a kmeňom sme stanovili pre jednotlivé porasty samostatne (tab. 4). Na základe výsledkov spektrálnych analýz bolo potrebné rozdeliť hodnotu percentuálneho podielu neolistených drevín medzi tenké konáre a kmeň s hrubými konármi. Zistili sme, že pokryvnosť tenkých konárov z celkovej pokryvnosti neolistených drevín je v priemere 30 % ($s_x = 10$ %), zostávajúcich 70 % drevín tvoria hrubé konáre a kmeň.

Použitím vypočítaných percentuálnych podielov a priemerných hodnôt $NDVI$ zo spektrálnych analýz boli podľa rovnice [3] zostavené $NDVI$ modely porastov ($NDVI_{model}$).



Obr. 4. Priebeh fenologických kriviek v porastoch 509 a, 514 a, 531, 541, 619 a v jarom období roku 2011. Na osi x: deň v roku, na osi y: $NDVI$. Zelená čiara určuje lokálne maximum 1. derivácie a modré čiary určujú lokálne extrémny 2. derivácie fenologickej krivky

Fig. 4. Course of phenological curves of stands 509 a, 514 a, 531, 541, 619 a in spring 2011. On x axis: day of year, on y axis: $NDVI$. Green line identifies local maximum of 1. derivative and blue lines identify local extremes of 2. derivative of phenological curve

Hodnoty satelitného NDVI ($NDVI_{sat}$) sme odvodili z fenologických kriviek vytvorených pre jednotlivé porasty v programe Phenological Profile (obr. 4) a porovnali sme ich s hodnotami $NDVI_{model}$. Porastové, štruktúrne, stanovištné a orografické charakteristiky sledovaných porastov (tab. 1) ovplyvňujú nástup fenologických fáz pri bylinnej aj drevinovej zložke porastov, ako aj na množstvo biomasy listov. Tým ovplyvňujú výsledné hodnoty $NDVI_{sat}$. Aby boli párové NDVI hodnoty z rôznych časových úsekov jarnej fenofázy porovnateľné vypočítali sme v jednotlivých porastoch rozdiely medzi $NDVI_{sat}$ a $NDVI_{model}$. Na takto získanej údajovej báze sme vykonali dve analýzy:

(i) Analýzou variancie jednoduchého triedenia sme testovali významnosť rozdielov $NDVI_{sat}$ a $NDVI_{model}$ medzi porastmi. Úrovňami faktora boli jednotlivé porasty a závislými premennými boli diferencie párových hodnôt NDVI k dňom fenologických pozorovaní. Výsledky ukázali veľmi malú vnútroskupinovú ako aj medziskupinovú variabilitu. Z hodnôt testovacích charakteristík ($F_{(4,25)} = 0,403$, $p = 0,805$) vyplýva, že na 5 % hladine významnosti sa diferencie medzi porastmi významne nelíšia. Tieto výsledky poukazujú na úzky vzťah medzi $NDVI_{sat}$ a $NDVI_{model}$ jednotlivých porastov, a že navrhnutý model je uplatniteľný pre všetky sledované porasty v celom období jarných fenofáz.

(ii) Zistené diferencie medzi $NDVI_{model}$ a $NDVI_{sat}$ ($\bar{x}_{dif} = -0,132$, $s_x = 0,025$) poukázali na systematické podhodnotenie $NDVI_{sat}$ hodnôt, a preto sme pristúpili ku ich korekcii.

3.2. Korekcia satelitne odvodených NDVI hodnôt

Hodnoty $NDVI_{sat}$ sú v priemere 1,24-krát vyššie ako $NDVI_{model}$ ($s_x = 0,02$). Na korekciu tohto rozdielu sme použili kvocient q odporúčaný pre korekciu údajov získaných kontrolným meraním metódou PPP výberu (ŠMELKO, 2012). Z modelovaných a satelitne odvodených údajov NDVI o rozsahu $n = 30$ sme pre každú dvojicu hodnôt vypočítali kvocient q_i , a jeho štatistické charakteristiky

$$q_i = \frac{NDVI_{model,i}}{NDVI_{sat,i}} \rightarrow \bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n}, S_q = \frac{S_q}{\sqrt{n-1}} \quad [4]$$

Hoci postup odvodenia korekčného faktora nezodpovedá náhodnému výberu porastov použitému v pokuse, umožňuje nám sledovať ako sa kvocienty q_i vyvíjali počas sledovaného obdobia jarných fenofáz. Priemerná hodnota kvocientu bola 0,81 a stredná chyba 0,003. S 95 % pravdepodobnosťou spadá hodnota kvocienta do intervalu 0,804 – 0,816. Kvocient $\bar{q}$ sme otestovali voči 1 a zistili sme, že na 1 % hladine významnosti je $\bar{q}$ systematicky záporne vychýlený, a teda $NDVI_{sat}$ hodnoty sú systematicky nadhodnotené: $t = 66,2 > t_{0,005(29)} = 2,756$. Kvocient $\bar{q}$ sme použili na korekciu systematicky vychýlených $NDVI_{sat}$ hodnôt

$$NDVI_{kor,i} = \bar{q} \cdot NDVI_{sat,i} \quad [5]$$

Týmto sme získali novú hodnotu korigovaného NDVI ($NDVI_{kor}$). V tabuľke 5 sú uvedené hodnoty NDVI odvodené zo satelitných záznamov a hodnoty NDVI získané z modelov pre päť analyzovaných porastov. Korekčný faktor $\bar{q}$ je možné uplatniť pri korekcii $NDVI_{sat}$ hodnôt v bučinách s porastovými charakteristikami podobnými nami sledovaným JPRL.

Tabuľka 5. Satelitné a modelované NDVI hodnoty odvodené pre konkrétne porasty a dni fenologických pozorovaní v období jarných fenofáz v roku 2011

Table 5. Satellite and modelled NDVI values derived for the particular stands and days of phenological observations during the period of spring phenophases in 2011

Dielec ¹⁾	NDVI	Deň ²⁾					
		95	101	108	116	125	159
509 a	$NDVI_{sat}^{3)}$	0,49	0,54	0,63	0,72	0,82	0,93
	$NDVI_{model}^{4)}$	0,40	0,44	0,50	0,59	0,69	0,76
514 a	$NDVI_{sat}^{3)}$	0,50	0,56	0,62	0,72	0,83	0,93
	$NDVI_{model}^{4)}$	0,41	0,45	0,50	0,58	0,68	0,75
531	$NDVI_{sat}^{3)}$	0,54	0,59	0,67	0,74	0,82	0,93
	$NDVI_{model}^{4)}$	0,43	0,48	0,54	0,61	0,68	0,76
541	$NDVI_{sat}^{3)}$	0,52	0,56	0,64	0,73	0,83	0,93
	$NDVI_{model}^{4)}$	0,41	0,45	0,51	0,60	0,69	0,77
619 a	$NDVI_{sat}^{3)}$	0,52	0,56	0,65	0,75	0,84	0,93
	$NDVI_{model}^{4)}$	0,41	0,45	0,50	0,59	0,68	0,76

¹⁾Stand, ²⁾Day of year, ³⁾Satellite NDVI, ⁴⁾Modelled NDVI

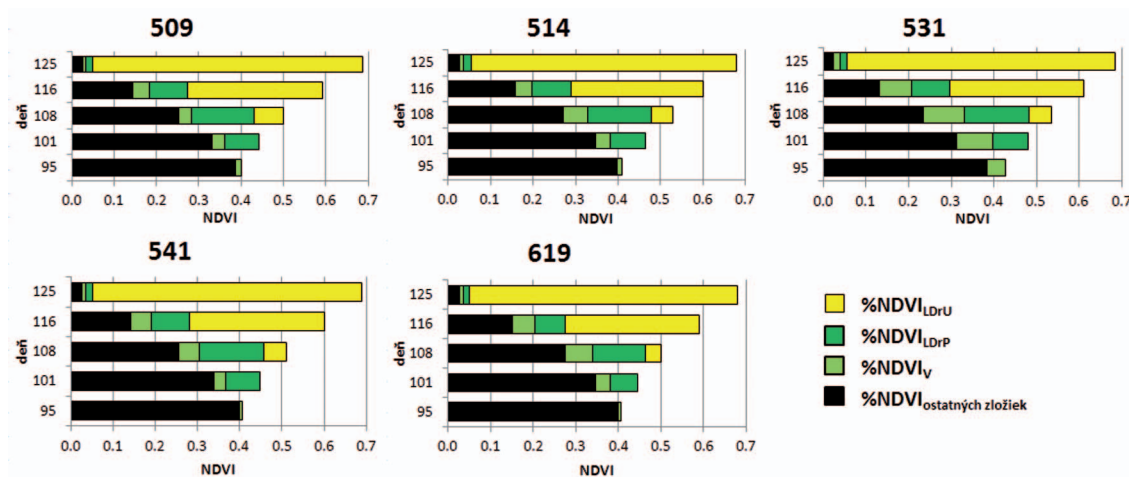
3.3. Kvantifikácia vplyvu jednotlivých zložiek porastu na celkovú hodnotu NDVI

Z vytvorených NDVI modelov sme stanovili podiel jednotlivých zložiek (prízemnej vegetácie, podrastu, drevín hlavnej úrovne a ostatných zložiek) na celkovej hodnote NDVI ($NDVI_{model}$) v každom poraste. Graficky je tento podiel znázornený na obrázku 5.

3.3.1 Prízemná vegetácia a podrast

Najvýraznejší vplyv **prízemnej vegetácie** na hodnotu NDVI bol zistený v poraste 531. Tento porast sa vyznačuje zakmenením 0,8 a voľným až uvoľneným zápojom, ktoré vytvárajú vhodné svetelné podmienky pre rast a prežívanie prízemnej vegetácie. V roku 2011 od približne 100. dňa v roku až do zalistenia porastovej úrovne (125. deň v roku) tu prízemná vegetácia dosahovala v priemere podiel 18 % na celkovom NDVI porastu. V ostatných porastoch bol tento podiel nižší a v priemere sa pohyboval v rozmedzí 6 – 13 %.

Podrast sa začal v porastoch prejavovať okolo 100. dňa v roku a to podielom 15 – 19 % na celkovom NDVI porastov. Okolo 108. dňa dosahoval podrast podiel až



Obr. 5. Grafické vyjadrenie podielu prízemnej vegetácie ($\%NDVI_V$), listov podrastu ($\%NDVI_{LDRP}$) a úrovňových drevín ($\%NDVI_{LDRU}$) na celkovom NDVI bukových porastov. ($\sum\%NDVI_{\text{ostatných zložiek}}$ = suma NDVI pre percentuálny podiel kmeňa a hrubých konárov, tenkých konárov a opadanky)

Fig. 5. Graphic presentation of the rate of understory vegetation ($\%NDVI_V$), leaves of undergrowth ($\%NDVI_{LDRP}$) and canopy ($\%NDVI_{LDRU}$) trees on NDVI values of beech stands. ($\sum\%NDVI_{\text{other components}}$ = sum of NDVI percentage of thin branches, large branches and trunk, and litter). On x axis: day of year, on y axis: NDVI

25 – 30 %. Jedince podrastu sa riadia stratégiou fenologického úniku a fenofázu 100 % zalistenie dosiahli už okolo 110. dňa v roku.

Vo všeobecnosti bol vplyv podrastu na hodnoty NDVI bukových porastov oproti prízemnej vegetácii dvojnásobný. Vplyv podrastu podobne ako prízemnej vegetácie na hodnoty NDVI začal klesať počas zalisťovania úrovňových drevín.

V čase 50 % RLP úrovňových drevín bol podiel hodnoty NDVI prízemnej vegetácie a podrastu spolu 36 – 46 % z celkovej hodnoty NDVI porastu.

V čase 50 % ZAL úrovňových drevín bol zistený podiel NDVI prízemnej vegetácie a podrastu spolu 17 – 27 % z celkového NDVI porastu.

V čase 100 % ZAL úrovňových jedincov tvorili hodnoty NDVI zelene prízemnej vegetácie a podrastu len 3 – 4 % z celkovej hodnoty NDVI porastu. Od tejto fenologickej fázy boli hodnoty NDVI ovplyvnené veľkosťou, farbou a štruktúrou listov úrovňových drevín porastu. Tieto výsledky platia pri porastoch s prehusteným až uvoľneným zápojom, pri porastoch s voľným až medzernatým zápojom môžeme predpokladať väčší vplyv prízemnej vegetácie a podrastu.

3.3.2 Porastová úroveň

V teréne bola pozorovaná fenofáza začiatok pučania listových pupeňov pri úrovňových jedincoch v období medzi 98. – 101. dňom v roku. Na fenologickej krivke je to obdobie, kedy 2. derivácia dosiahla lokálne maximum zo vzostupnej časti krivky. Percentuálny podiel drevín úrovne na celkovom NDVI porastu bol v tomto čase nulový. Od 108. do 111. dňa došlo k 50 % rozpuťu lis-

tových pupeňov, kedy podiel úrovňových drevín na celkovom NDVI dosiahol priemernú hodnotu 10 %. Úplný rozpuť listových pupeňov sme pozorovali od 111. do 113. dňa v roku. V tomto čase dosahuje prvá derivácia fenologickej funkcie maximum (deň 109. – 114.). Od 115. do 117. Dňa v roku nastúpilo všeobecné zalisťovanie, kedy bol zaznamenaný podiel drevín úrovne v priemere 53 % na celkovom NDVI porastu. K úplnému zalisťovaniu úrovňových jedincov došlo okolo 120. dňa v roku. Tento termín približne súhlasí s lokálnym minimom 2. derivácie vo vzostupnej časti fenologickej krivky (deň 122. – 126.) a podiel drevín úrovne na celkovom NDVI porastu bol v priemere 92 %.

Vytvorením vzťahu medzi vizuálnym hodnotením jednotlivých fenofáz a hodnotou biofyzikálnej veličiny NDVI spolu s kvantifikáciou príspevku jednotlivých zložiek lesného ekosystému na hodnotu NDVI nám umožnilo (i) odvodiť čas nástupu jednotlivých fenofáz a dĺžku ich trvania, (ii) navrhnúť optimálne termíny pre sledovanie nástupu fenofáz jednotlivých zložiek lesného ekosystému.

Za optimálnu fenologickú fázu pre sledovanie drevinovej zložky v nadúrovni a úrovni (hlavnej úrovni) porastu zo satelitných záznamov považujeme fenofázu 100 % zalistenie. Vychádzali sme pritom zo zistení, že:

- od fenofázy 100 % ZAL sú hodnoty NDVI ovplyvnené inými porastovými zložkami ako listami úrovňových drevín len do 7 – 8 %, za predpokladu uvoľneného až prehustlého zápoja,
- dátum nástupu fenofázy 100 % ZAL je možné identifikovať zo satelitných záznamov pomocou lokálneho minima 2. derivácie fenologickej krivky vo vzostupnej fáze.

Pre sledovanie fenologického vývoja bukového porastu ako komplexu všetkých jeho zložiek možno využiť fenofázu 100 % rozpuk listových pupeňov. Zistili sme, že:

- deň nástupu fenofázy je možné stanoviť lokálnym maximum 1. derivácie fenologickej funkcie v jej jarnom vzostupnom období,
- v 60 a viacročných porastoch, v ktorých sa vyskytujú dreviny v podraсте, je pre fenofázu 100 % RLP úroveň stromov charakteristické súčasné 100 % ZAL drevín podraсту.

Problematika zisťovania vplyvu porastových zložiek na hodnoty satelitne odvodených vegetačných indexov je málo publikovaná. Väčšina autorov iba konštatuje, že prízemná vegetácia alebo podraст môžu ovplyvniť hodnoty vegetačných indexov, ale nekvantifikujú tento vplyv. Výsledky našej práce potvrdzujú tvrdenie FISHERA *et al.* (2006), že pri porastoch s diferencovanou vertikálnou štruktúrou je nástup fenofáz odvodených zo satelitných záznamov skorší, ako pri výškovo homogénnych porastoch. V našom prípade spôsobuje vplyv prízemnej vegetácie a podraсту v porastoch s prevládajúcim zastúpením buka rast hodnôt NDVI fenologickej krivky pred 100 % zalistením úroveň jedincov. Podobné závery uviedli PRIWITZER *et al.* (2009) z pozorovaní na lokalite Čifáre, ktoré poukazujú na vplyv krovinnej vegetácie v dubovom poraste tvorenej slivkou trnkovou a vtáčím zobom na skorší rast hodnôt fenologickej krivky. NAGAI *et al.* (2010) uviedli, že v japonských dubovo-brezo- vých porastoch spôsobuje rast hodnôt NDVI v čase pred zalistením porastovej úrovne prízemná vegetácia, avšak jej pokryvnosť dosahuje až 90 %. V skúmaných bukových a dubovo-bukových porastoch nedosahuje prízemná vegetácia také vysoké hodnoty pokryvnosti, a preto ani vplyv tejto vegetácie na hodnoty NDVI v našich podmienkach nie je taký výrazný, ako uvádzajú výsledky NAGAIA *et al.* (2010).

4. Záver

Viaceré scenáre vývoja klímy poukazujú na jej vážne dopady na lesy už v priebehu tohto storočia. Poznanie reakcie lesných ekosystémov na klimatické zmeny je preto dôležitým faktorom pre správne pochopenie a usmerenie činností v lesnom hospodárstve. Zmeny v teplotnom režime a režime zrážok vyvolávajú zmeny v čase nástupu fenologických fáz a v celkovej dĺžke vegetačného obdobia drevín. Vizualne fenologické pozorovania sú časovo a personálne veľmi náročné, a neumožňujú analýzy na regionálnej až globálnej úrovni. V práci navrhnutá metóda rieši nedostatky týchto pozorovaní. Vizualne pozorovania nástupu fenofáz nahrádzame biofyzikálnou veličinou, a to vegetačným indexom NDVI odvodeným zo satelitných záznamov. Podľa jeho veľkosti a priebehu vývoja usudzujeme na nástup jednotlivých fenofáz. Z povahy satelitných záznamov vyplýva možnosť odvodiť vegetačný index pre rôzne priestorové jednotky, od 1 pixelu cez regionálnu až po globálnu úroveň. To umožňuje ob-

jasniť časovo-priestorové súvislosti reakcie lesných ekosystémov na zmeny klímy. Stanovenie vplyvu prízemnej vegetácie a podraсту na NDVI odvodené zo satelitných záznamov si vyžaduje kontrolné merania. Výsledky práce dokazujú, že podraст a prízemná vegetácia spôsobujú rast hodnôt NDVI porastov od asi 100. dňa v roku až do fenofázy úplné zalistenie jedincov hlavnej úrovne, ktorú je možné identifikovať z fenologickej krivky. Satelitne odvodené hodnoty NDVI sú systematicky nadhodnotené oproti modelovaným NDVI hodnotám, pričom toto vychýlenie možno spoľahlivo korigovať. Do budúcnosti navrhujeme zahrnúť do modelu porastu zápoj formou korekčného faktora, ktorým by sa upravovala pokryvnosť listov drevín hlavnej úrovne.

V ďalšej práci využijeme získané poznatky pri modelovaní nástupu fenofáz bukových porastov na regionálnej (celoslovenskej) úrovni zo satelitných snímok MODIS. Vyhodnotíme trendy v nástupe fenologických fáz bukových porastov a zameriame sa na určenie vplyvu biometeorologických prvkov na nástup fenofáz.

Podakovanie

Táto práca bola podporovaná projektom VEGA MŠ SR: č. 1/1130/12, č. 1/0257/11, č. 1/0281/11, Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0423-10 a s Operačným programom výskum a vývoj v rámci riešenia projektu Centrum excelentnosti pre podporu rozhodovania v lese a krajine (ITMS 26220120069).

Literatúra

- AHL, D. E., GOWER, S. T., BURROWS, S. N., SHABANOV, N. V., MYNENI, R. B., KNYAZIKHIN, Y., 2006: Monitoring spring canopy phenology of a deciduous broadleaf forest using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 104: 88-95.
- BUCHA, T., 1999: Classification of tree species composition in Slovakia from satellite images as a part of monitoring forest ecosystems biodiversity. *Acta Instituti Forestalis Zvolen, Zvolen: LVÚ Zvolen*, 9: 65-84.
- , KOREŇ, M., 2009: Kontinuálne sledovanie odozvy lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prírodného prostredia pomocou údajov DPZ – tvorba údajovej bázy. In: BUCHA, T., PAVLENDOVÁ, H., (eds.): *Dialkový prieskum Zeme – lesy v meniacich sa prírodných podmienkach*. Zvolen: NLC - LVÚ Zvolen, s. 35-50.
- EURÓPSKA KOMISIA, 2010: Zelená kniha o ochrane lesov a informáciách o lesoch v EÚ. *Príprava lesov na zmenu klímy*. Brusel, 1. 3. 2010 KOM (2010) 66. 22 s.
- FISHER, J. I., MUSTARD, J. F., 2007: Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 109: 261-273.
- , MUSTARD, J. F., VADEBONCOEUR, M. A., 2006: Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. *Remote Sensing of Environment*, 100: 265-279.
- GANGULY, S., FRIEDL, M. A., TAN, B., ZHANG, X., VERMA, M., 2010: Land surface phenology from MODIS: Characterization of the Collection 5 global cover Dynamics product. *Remote Sensing of Environment*, 114: 1805-1816.
- HEUMANN, B. W., SEAQUIST, J. W., EKLUNDH, L., JÖNSSON, P., 2007: AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982 – 2005. *Remote Sensing of Environment*, 108: 385-392.

- JÖNSSON, A. M., HELLSTRÖM, M., BÄRRING, L., JÖNSSON, P., 2010: Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology. *Remote Sensing of Environment*, 114: 2719-2730.
- JUSTICE, C. O., TOWNSEND, J. R. G., VERMOTE, E. F., MASUOKA, E., WOLFE, R. E., SALEOUS, N., ROY, D. P., MORISETTE, J. T., 2002: An overview of MODIS land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83: 3-15.
- KANG, S., RUNNING, S. W., LIM, J.-H., ZHAO, M., PARK, C. H. R., LOEHMAN, R., 2003: A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: an application of MODIS leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 86: 232-242.
- SOBÍŠEK, B., BEDNÁŘ, J., ČERNAVA, S., FLUX, J., FRÜHBAUER, J., GOTTWALD, A., HODAN, L., JURČOVIČ, P., KAKOS, V., KALVOVÁ, J., KOLDOVSKÝ, M., KOPÁČEK, J., KREJČÍ, J., KRŠKA, K., MUNZAR, J., NEDDELKA, M., OTRUBA, A., PANENKA, I., PAPEŽ sen., A., PÍCHA, J., PODHORSKÝ, D., POPOLANSKÝ, F., PRETEL, J., PRIBIŠ, J., REIN, F., SETVÁK, M., SCHÖBEROVÁ, E., SLABÁ, N., SLÁDEK, I., STRACHOTA, J., ŠTEKL, J., TÁBORSKÝ, Z., TREFNÁ, E., TRHLÍK, M., VESECKÝ, A., ZEMAN, M., ZIKMUNDA, O., 1993: *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Praha: Ministerstvo životního prostředí České republiky, 594 s.
- LEE, R., YU, F., PRICE, K. P., ELLIS, J., SHI, P., 2002: Evaluating vegetation phenological patterns in Inner Mongolia using NDVI time-series analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 2505-2512.
- LINDERHOLM, H. W., 2006: Growing season changes in the last century. Review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 1-14.
- NAGAI, S., NASAHARA, K. N., MURAOKA, H., AKIYAMA, T., TSUCHIDA, S., 2010: Field experiments to test the use of the normalized-difference vegetation index for phenology detection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150: 152-160.
- PIAO, S. L., FANG, J., ZHOU, L., CHAIS, P., ZHU, B., 2006: Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 12(4): 672-685.
- PRIWITZER, T., BUCHA, T., KOREŇ, M., 2009: Využitie vegetačného indexu NDVI odvodeného z MODISu pri fenologických pozorovaniach lesných drevín. In: BUCHA, T., PAVLENDOVÁ, H., (eds.): *Dialkový prieskum Zeme – lesy v meniacich sa prírodných podmienkach*. Zvolen: NLC - LVÚ Zvolen, s. 51-64.
- RICHARDSON, A. D., O'KEEFE, J., 2009: Phenological differences between understory and overstory: a case study using the long term Harvard Forest records. In: A. NOORMETS (ed.): *Phenology of Ecosystem Processes*. New York: Springer, p. 87-117.
- SOUDANI, K., MAIRE, G., DUFRÊNE, E., FRANÇOIS, CH., DELPIERRE, N., ULRICH, E., CECCHINI, S., 2008: Evaluation of the onset of green-up in temperate deciduous broadleaf forests derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sensing of Environment*, 112: 2643-2655.
- STÖCKLI, R., VIDALE, P. L., 2004: European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 3303-3330.
- SCHOLTZ, P., NOVÁKOVÁ, M., SVÍČEK, M., 2010: Prognózovanie úrody. In: FERANEC, J. (ed.): *Slovensko očami satelitov*. Bratislava: VEDA, s. 125-144.
- ŠKVARENINOVÁ, J., 2009: Priebeh vegetatívnych fenologických fáz autochtónnych populácií smrek obyčajného (*Picea abies* [L.] Karst.) zo Slovenska. *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 55(1): 13-27.
- ŠTEFANČÍK, I., 1995: Fenológia v lesníctve. 1. Začiatok vegetačnej činnosti. *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 41(2): 131-139.
- ŠMELKO, Š., 2012: Biometrické postupy vhodné na objektivizáciu údajov o lese, overené počítačovými simuláciami na digitálnych modeloch lesných porastov. *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 58(1): 21-34.
- WOLFE, R. E., NISHIHAMA, M., FLEIG, A. J., KUYPER, J. A., ROY, D. P., STOREY, J. C., PAT, F. S., 2002: Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. *Remote Sensing of Environment*, 83(2002): 31-49.
- ZHANG, X., FRIEDL, M. A., SCHAAF, C. B., STRAHLER, A. H., HODGES, J. C. F., GAO, F., REED, B. C., HEUTE, A., 2003: Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84: 471-475.
- , GOLDBERG, M. D., 2011: Monitoring fall foliage coloration dynamics using time-series satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 115: 382-391.
- ZHOU, L., TUCKER, C. J., KAUFMANN, R. K., SLAYBACK, D., SHABANOV, N. V., MYNENI, R. B., 2001: Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 106: 20069-20083.

Summary

Phenological observations offer one of the most suitable data for identification of how plant species respond to regional climate conditions and climate changes. Vegetation index NDVI derived from satellite data is a suitable indicator of changing phenological phases of forest ecosystems. The most precise indication of the onset of phenological phases required identification and quantification of the effect of all forest components on NDVI value. We performed an evaluation of understory vegetation and undergrowth development simultaneously with terrestrial phenological observations of trees in spring 2011 in 3–7 day's steps. The terrestrial survey was used for validation of satellite phenology. It is because the phenological curve derived from satellite data begins to rise before the start of leaf onset in spring vegetation period. The first aim of the work was to quantify the contribution of the ground vegetation and undergrowth on NDVI values of beech forests during spring until 100% leaf onset. The second aim was to specify the onset date of the phenological phases of beech forests and select the suitable phase for the long-term phenological monitoring from satellite data. There were chosen 5 stands located on VŠLP TU Zvolen. These stands had to meet the criterion of dominant incidence of beech and minimum occurrence of evergreen conifers (Tab. 1). These forests are characterized by plentiful incidence of undergrowth (Fig. 1). NDVI values from satellite data were derived with eq. [1] and modeled using eq. [2]. Phenological observations were carried out with methodology according to the SHMU (1984). During field work we estimated percentual coverage of:

- 1) green leaves according to occurring phenological phase,
- 2) understory vegetation evaluated on 5 monitoring plots in each forest (Fig. 2, Tab. 3),
- 3) naked trees derived from canopy images (Fig. 3, Tab. 4); this value was divided between thin branches and large branches with trunks,
- 4) background created by litter.

NDVI values of each forest component were obtained using spectral analysis (Tab. 2). The percentual coverage and NDVI value of each component were used as inputs into NDVI forest model [Eq. 3]. $NDVI_{model}$ values were calculated for all observation dates. $NDVI_{sat}$ values were derived from logistic sigmoid function (Fig. 4) (FISHER *et al.* 2006) for the same days as $NDVI_{model}$. We found out that all $NDVI_{sat}$ values are 1.24 times higher than $NDVI_{model}$ values. Due to these differences, we introduced quotient q_i [Eq. 4]. Its average value q^- was 0.81 ($S_q^- = 0.003$). Corrected NDVI ($NDVI_{kor}$) values were calculated from $NDVI_{sat}$ values using this quotient q^- . Satellite and modeled NDVI values are recorded in table 5. We concluded that the rise of phenological curve before leaf onset of upper story was caused by development of understory vegetation and undergrowth (Fig. 5). On average, effect of undergrowth was two times higher than effect of understory vegetation. The 100% leaf onset of undergrowth was recorded around the 110 DOY (Day of Year). At

this time, the 100% leaf budburst of canopy beeches was recorded (111–113). This is the time when the first derivative of phenological curve reached the local maximum (DOY 109–114). The 100% leaf onset of canopy beeches was recorded around 120 DOY. This term approximately agrees with local minimum of second derivative in the growing (spring) period of phenological curve. Based on these findings, we selected following phenophases for a long-term monitoring from satellite data:

- a) 100% leaf budburst for phenological monitoring of beech forests as a complex of all forest components,
 - b) 100% leaf onset for phenological monitoring of canopy trees.
- In future work, we will use the acquired knowledge in beech forests phenology modeling at a nationwide level from MODIS. We will focus on detection of the effect of biometeorological factors on the onset of phenological phases and we will find out the trends in onset of these phenophases.

Translated by authors
Revised by J. LÁSKOVÁ