

MODELOVANIE FENOLOGICKÉHO VÝVOJA LESNÝCH PORASTOV POMOCOU VEGETAČNÉHO INDEXU NDVI ODVODENÉHO ZO SATELITNÝCH SNÍMOK MODIS

TOMÁŠ BUCHA¹, TIBOR PRIWITZER¹, MILAN KOREŇ²

¹Národné lesnícke centrum - Lesnícky výskumný ústav, T. G. Masaryka 22, 960 92 Zvolen,
e-mail: bucha@nlc.sk.org

²Technická univerzita vo Zvolene, Lesnícka fakulta, T. G. Masaryka 24, SK – 960 53 Zvolen,
e-mail: mkoren@vsl.d.tuzvo.sk

BUCHA T., PRIWITZER T., KOREŇ M., 2011: Modelling phenological development of forest stands using vegetation index NDVI derived from satellite scenes MODIS. *Lesn. Čas. – Forestry Journal*, **57**(3): 187–196, 7 fig., tab. 3, ref. 26. Original paper. ISSN 0323 – 1046.

This paper presents a new, innovative approach for the estimation of phenological events of forest stands from satellite spectroradiometer MODIS. We focused on two parts of the vegetation period: buds bursting and leaf unfolding. Normalized vegetation index (NDVI) was used to determine the onset of the vegetation stages. Sigmoid curve was applied to shape a course of NDVI. The software product, Phenological profile, was developed for this purpose. It allowed us to calculate the value of extremes of the function for spring and autumn phenophase as well as to determine the date on which they occur. In the period 2000–2010, the earliest start of leaf unfolding was observed in 2009. The median value was day 110 of the year and took from days 104 to 122 for 5–95% quintile. The latest start was observed in 2010, and took from days 114 to 135, median = day 121. Leaf unfolding is delayed non-linear with the increase of altitude. Unfolding is shifted by 0.4 day between heights 200 and 300 m a.s.l. A shift is 7.6 days between heights of 1200 and 1300 m a.s.l.

Keywords: MODIS, forest phenology, NDVI

V práci prezentujeme inovatívnu metódu určovania nástupu fenologických udalostí lesných drevín založenú na využití údajov zo satelitného spektorradiometra MODIS. Zamerali sme sa na obdobie pučania a zalistovania drevín. K určeniu nástupu fenofáz sme využili normalizovaný vegetačný index (NDVI), ktorého priebeh sme modelovali pomocou sigmoidnej logistickej krivky. K tomuto účelu sme využili nami vyvinutý produkt Phenological profile. Dovoľuje vypočítavať hodnoty extrémov funkcie v jarnej aj jesennej fenofáze ako aj určiť dni v ktorých nastávajú. V období 2000 – 2010 sme pozorovali najskorší nástup zalistovania v roku 2009. Stredná hodnota (medián) nástupu fenofázy bola 110. deň v roku a zalistovanie trvalo od 104. po 122. deň pri 5 – 95 % kvantile. Najneskorší začiatok sme zaznamenali v roku 2010, keď zalistovanie trvalo od 114. po 135. deň (medián = 121. deň). Nástup fenofázy sa oneskoruje s rastom nadmorskej výšky, a to nelineárne. Medzi výškou 200 a 300 m n. m. sa začiatok zalistovania posunul o 0,4 dňa. Medzi výškou 1 200 a 1 300 m n. m. je posun až 7,6 dňa.

Kľúčové slová: MODIS, lesnícka fenológia, NDVI

1. Úvod a problematika

Vypustením družíc Terra a Aqua (NASA Earth Observation System Satellites) so spektorradiometrom MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sa otvorili nové možnosti kontinuálneho a globálneho monitorovania biofyzikálnych vlastností

lesných porastov pomocou satelitných snímok. Viacero prác preukázalo vhodnosť využitia Normalizovaného diferenčného vegetačného indexu (NDVI) odvodeného zo satelitných údajov pri hodnotení odozvy vegetácie na environmentálne zmeny. Prehľad spracovala PETTORELLI *et al.* (2005). NDVI sa vypočíta podľa vzťahu: $NDVI =$

$(\text{IRED} - \text{RED}) / (\text{IRED} + \text{RED})$, kde RED je spektrálna odrazivosť v červenom kanáli a IRED v infračervenom kanáli. Hodnotu NDVI ovplyvňuje absorpcia červenej časti spektra listovými pigmentmi a silná odrazivosť listov v blízkej infračervenej časti spektra. Z toho dôvodu s rozvojom asimilačného aparátu odrazivosť v červenej časti spektra má tendenciu klesať, zatiaľ čo odrazivosť v infračervenej časti spektra sa naopak zvyšuje, čo vedie k rastu hodnoty NDVI pre zelenú vegetáciu (KOCH *et al.* 1990). Táto vlastnosť vegetačného indexu sa využíva pri modelovaní jeho priebehu počas roka vo vzťahu k fenologickým prejavom lesných drevín.

Fenológia skúma časový priebeh významných, periodicky sa opakujúcich životných prejavov rastlín, tzv. fenologických fáz, v závislosti od komplexu podmienok vonkajšieho prostredia, najmä od počasia a podnebia. Pre fenologické pozorovania v európskych a našich podmienkach bolo vypracovaných viacero stupníc podrobne opísaných v prácach ŠTEFANČÍK (1995), BRASLAVSKÁ, KAMENSKÝ (1996), PREUHLER (1999). Prepojením satelitných údajov a pozemných fenologických pozorovaní sa rozšírili možnosti modelovania vegetačnej aktivity a dynamiky lesných porastov na regionálnej až globálnej úrovni. KANG *et al.* (2003) s využitím metód regresnej analýzy navrhli regionálny model začiatku rozvíjania lesnej vegetácie založený na listovom indexe odvodenom z MODIS-u a meteorologických údajoch pre zmiešané lesy mierneho pásma v Kórei. ZHANG *et al.* (2003) využil na modelovanie ročného priebehu vegetačných indexov úsekovú logistickú funkciu (dvojstranne-sigmoidnú funkciu). Dátumy začiatku fenologických fáz identifikoval podľa miery zakrivenia krivky vyrovnaného logistického modelu. Prostredníctvom maximálnych a minimálnych hodnôt krivosti odvodzuje štyri hlavné premenné: (1) olistenie, čas nástupu fotosyntetickej aktivity, (2) zrelosť, čas, v ktorom má rastlina zelenú listovú plochu, (3) starnutie, čas v ktorom fotosyntetická aktivita a zelená listová plocha klesá, (4) latentný stav, čas v ktorom je fotosyntetická aktivita blízka nule. Na uvedenom prístupe je založený aj globálny fenologický produkt MCD12Q2 (GANGULY *et al.* 2010), ktorého posledná verzia je už prístupná v 500 m rozlíšení v 8 dňových krokoch. BECK *et al.* (2006) overili dvojitú logistickú funkciu modelujúcu priebeh NDVI pre oblasť boreálnych lesov vo vyšších zemepisných šírkach. FISHER (2007) využíva pri modelovaní modifikáciu sigmoidnej funkcie navrhnutej ZHANGOM *et al.* (2003). Tvar krivky zohľadňuje oba základné stavy listnatých drevín, stav olistenia a stav po opade listov, a to prostredníctvom 6 parametrov funkcie. Obdobne postupoval SOUDAMI *et al.* (2008) keď pri modelovaní priebehu vegetačných indexov listnatých porastov mierneho pásma využil asymetrickú dvojstranne-sigmoidnú funkciu.

Na základe časového radu z AVHRR rádiometru v 8 km rozlíšení z rokov 1982 – 2005 HEUMANN *et al.* (2007) vykonal prvú fenologickú štúdiu zameranú na odvodenie trendu vývoja vegetačného indexu založenú

na využití dlhodobých údajov DPZ z oblasti Sudámu. Štúdia preukázala štatistiky významné zmeny v NDVI a potvrdila možnosť uplatnenia NDVI pri hodnotení globálnych zmien prostredia na lesné ekosystémy a ekosystém savany. ZHOU *et al.* (2001) preukázali trvalé zvyšovanie hodnoty NDVI lesnej vegetácie počas vegetačnej sezóny v Euroázii vrátane strednej Európy, a to na časovom rade údajov z AVHRR z obdobia 1982 – 1999. STÖCKLI & VIDALE (2004) preukázali štatisticky významný trend predlžovania vegetačného obdobia v strednej Európe na časovej rade údajov z AVHRR z rokov 1982 – 2001. Podobné výsledky predĺženia vegetačného obdobia v miernom pásme Číny dosiahli PIAO *et al.* (2006) pri analýze NDVI taktiež odvodeného z AVHRR z obdobia 1982 – 1999.

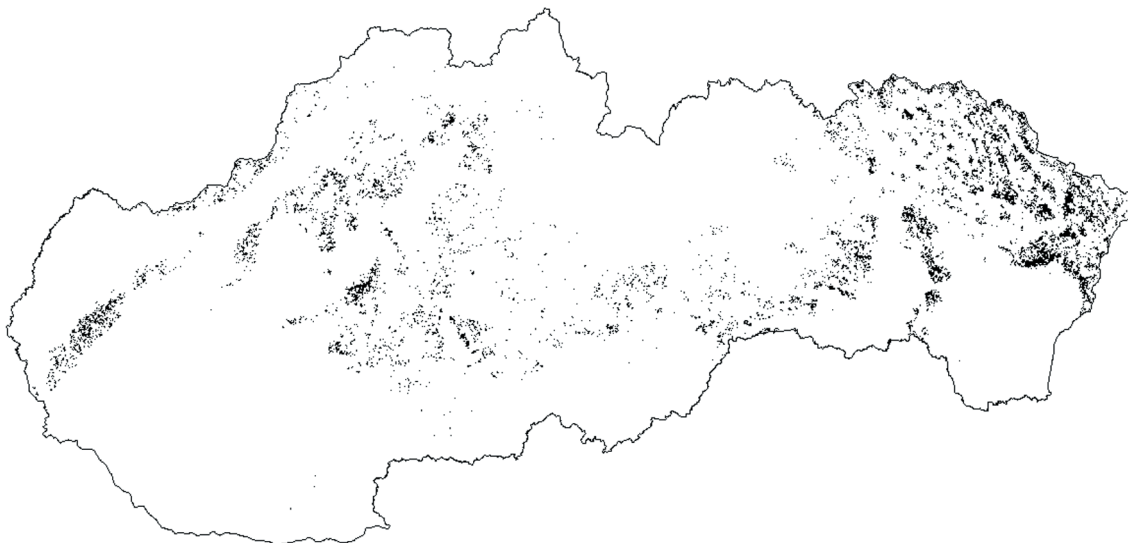
Na Slovensku sú k dispozícii dlhodobé fenologické pozorovania lesných drevín, ktoré sa realizujú metódou vizuálneho pozorovania na monitorovacích plochách v rámci programu Čiastkového monitorovacieho systému Lesy (ČMS) Lesy (PAVLENDA *et al.* 2010) a v sieti fenologických staníc Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ – agrometeorologické a fenologické informácie; <http://www.shmu.sk/sk/?page=354>; ŠKVARENINOVÁ 2008, 2009). Problematika využitia satelitných snímok pri určení fenologických prejavov drevín je v našich podmienkach nová. Prvé výsledky modelovania fenologického vývoja pomocou vegetačného indexu NDVI odvodeného z MODIS a pozorovaní na TMP systéme ČMS lesy prezentovali PRIWITZER *et al.* (2009).

V predkladanej práci predstavujeme inovatívnu metódu určovania nástupu fenofáz, založenú na využití vegetačného indexu NDVI odvodeného zo satelitného spektorrádiometra MODIS. Metódu sme overili pri modelovaní ročného priebehu NDVI a analýze vzťahov medzi NDVI a fenologickými prejavmi bukových porastov. Zamerali sme sa na fenofázu pučania vegetačných púčikov a zalíšovania drevín. Hlavný prínos oproti výberovým metódam založeným na pozemných pozorovaniach spočíva v kontinuálnom (v dňových intervaloch) a veľkoplošnom celoslovenskom sledovaní priebehu fenologických udalostí.

2. Materiál a metódy

2.1. Záujmové územie a zdrojové údaje

Štúdia bola realizovaná na lesných porastoch z územia Slovenska s dominantným zastúpením buka lesného (*Fagus sylvatica* L.). Pri ich výbere bola využitá klasifikácia drevinového zloženia lesov Slovenska zo satelitných záznamov (BUCHA 1999) s rozlíšením upraveným na 250 m v kombinácii s aktuálnymi celoslovenskými údajmi z opisu porastov po základných jednotkách priestorového rozdelenia lesa (JPRL). Údaje o zastúpení buka z opisu porastov sme použili pri určení jeho percentuálneho zastúpenia v 250 m pixli. Z vrstvy vytvorenej kombináciou oboch vstupov sme vylúčili okrajové pix-

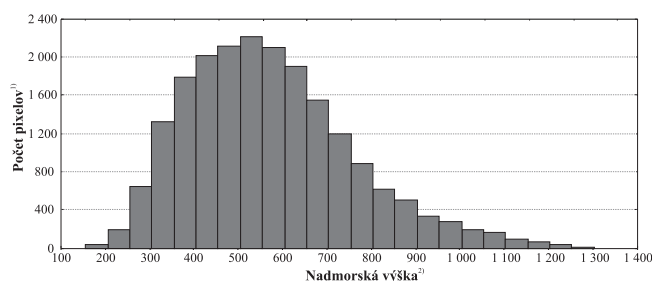


Obr. 1. Porasty so zastúpením dreveny buk 40 % a viac
Fig. 1. Forest with beech composition 40% and more

le, a to z dôvodu ich možnej spektrálnej kontaminácie inými kategóriami krajiny pokrývky. Ďalej sme vylúčili pixle, kde zastúpenie buka bolo nižšie ako 40 %. Celkový počet analyzovaných pixlov reprezentujúcich bukové porasty bol 20 237, čo predstavovalo výmeru 126,5 tis.ha (obr. 1).

Výškové rozvrstvenie analyzovaných porastov buka je zobrazené na obrázku 2. Väčšina porastov sa nachádza v 2. až 5. lvs. Z pohľadu klimatických charakteristík ide o územie s priemernou ročnou teplotou od 4,5 do 8,5 °C, ročnými zrážkami od 600 do 1 050 mm a vegetačnou dobou od 110 do 180 dní (ZLATNÍK, 1959 in ČABOUN 1996).

Údaje odvodené z MODIS-u je možné v našich podmienkach interpretovať na úrovni dielcov. Ich výmera sa na celoslovenskej úrovni sa pohybuje v rozpätí od asi 5 do 20 ha, čo približne korešponduje s veľkosťou obrazového elementu MODIS (6,25 ha).



Obr. 2. Histogram početností zastúpenia bukových porastov podľa nadmorskej výšky. Os x: nadmorská výška, medián = 550 m, kvantil 5 – 95 %: 313 – 928 m; os y: počet pixlov (1 pixel = 6,25 ha)

Fig. 2. Frequency histogram: beech forests distribution by altitude. X-axis: altitude; median = 550 m, 5–95% Quantile: 313 m – 928 m. Y-axis: number of pixels (1 pixel = 6.25 ha)

2.2. Výber produktov MODIS, analýza ich kvality a integrácia informačných zdrojov

Satelity Terra a Aqua so spektrometrom MODIS zaznamenávajú povrch nášho územia denne v 36 spektrálnych kanáloch (JUSTICE *et al.* 2002). Prístup k údajom je bezplatný. Riešenie úlohy bolo založené na produktoch MOD09, ktoré reprezentujú spektrálnu odrazivosť na zemskom povrchu s priestorovým rozlíšením 250 m (produkt MOD09GQ) a 500 m (MOD09GA), na ktorých boli vykonané radiometrické a atmosférické korekcie, t. j. eliminovaný je vplyv absorpcie a rozptylu žiarenia v atmosfére. Z produktu MOD09GQ sme odvodili vegetačný index NDVI. Pre každý rok z obdobia 2000 – 2010 bol vytvorený samostatný časový rad NDVI, ktorý bol predmetom analýz. Pre analýzu kvality údajov sme využili súbor kvality, ktorý je súčasťou MOD09GA produktu. Súbor definuje kvalitu odvodenia hodnoty odrazivosti v obrazovom elemente (pixli). Implementáciou poznatku o kvalite údajov do procesu tvorby údajovej bázy sme identifikovali nevyhovujúce obrazové prvky. Tieto sme vylúčili z ďalšej analýzy. Podrobne je postup opísaný v práci BUCHA, KOREŇ (2009).

Z obdobia 2000 – 2010 sme zahrnuli do analýz celkovo 420 snímok MODIS (tab. 1). Percento oblačnosti na snímke sa pohybovalo od 0 % (bez oblačnosti) po asi 80 %. Takto oblačné snímky sme vybrali v prípadoch, keď v určitom časovom období snímka úplne chýbala. Aj napriek tomu, z dôvodu období veľmi oblačného počasia, neboli všetky obdobia pokryté rovnomerne. Dostatočný počet snímok nebol k dispozícii v rokoch 2003 a 2009 v jarnej a v rokoch 2001, 2002 a 2009 v období jesennej fenofázy. Táto skutočnosť môže čiastočne ovplyvniť kvalitu modelu v chýbajúcej časti roka.

Okrem satelitných údajov MODIS sme zabezpečili prístup k potrebným validačným údajom. Zdrojom

Tabuľka 1. Prehľad snímok MODIS zahrnutých do analýz
Table 1. MODIS images included into analyses

Rok ¹⁾	Poradový deň v roku získanej snímky ²⁾	Spolu ³⁾
2000	83, 98, 109, 110, 112, 114, 115, 123, 124, 128, 134, 135, 148, 155, 156, 162, 171, 172, 173, 174, 215, 233, 234, 235, 253, 254 , 270, 272, 273, 274, 279, 290, 294, 295, 297, 298, 327, 336, 357	38
2001	66, 91, 92, 93, 119, 120, 121, 134, 137, 143, 146, 150, 187, 194, 196, 210, 212, 215, 225, 237, 239, 242 , 272, 276, 286, 288, 304, 319, 322	28
2002	91, 92, 97, 110, 112, 115, 121, 122, 124, 129, 137, 163, 169, 172, 174, 192, 230, 238, 242, 243, 252 , 272, 293, 343, 345,	25
2003	76, 83, 84, 86, 106, 124, 125, 127, 150, 158, 159, 163, 182, 218, 230, 239, 257, 259, 262, 266 , 269, 291, 314, 317, 342	24
2004	78, 93, 94, 105, 111, 112, 113, 114, 117, 117q, 118, 122, 127, 127q, 130, 132, 133, 134, 135, 135q, 136, 137q, 141, 151, 160, 161, 166, 175, 183, 203, 213, 230, 231, 242, 262 , 280, 281, 286, 315, 316, 340, 342	42
2005	81, 91, 93, 95, 112, 114, 119, 120, 123, 134, 141, 143, 149, 150, 164, 175, 180, 196, 210, 211, 214, 232, 242, 244, 246, 266, 267 , 278, 280, 283, 292, 301, 303, 305, 306, 313, 344, 345	37
2006	97, 98, 105, 109, 112, 116, 125, 130, 133, 142, 143, 163, 164, 166, 167, 170, 176, 178, 187, 188, 192, 199, 200, 201, 231, 253, 254, 256, 265, 267 , 269, 283, 284, 290, 291, 300, 304, 320, 361	38
2007	72, 74, 85, 88, 90, 92, 102, 103, 104, 111, 112, 113, 120, 122, 133, 135, 145, 163, 197, 198, 199, 200, 227, 228, 229, 236, 243, 245, 264, 266 , 268, 288, 289, 290, 305, 331, 332, 339	38
2008	40, 41, 42, 43, 56, 57, 59, 66, 67, 91, 99, 116, 118, 120, 129, 132, 134, 136, 148, 154, 155, 177, 194, 225, 232, 234, 244, 245, 246, 250, 257 , 279, 280, 292, 323	34
2009	81, 92, 93, 95, 97, 99, 100, 101, 102, 104, 106, 115, 116, 117, 118, 146, 165, 195, 198, 204, 209, 211, 214, 232, 237, 244, 245, 252, 262, 266 , 269, 270, 271, 277, 303, 305	35
2010	84, 88, 91, 93, 98, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 119, 120, 120q, 121, 121q, 123, 147, 148, 148q, 149q, 157, 158, 159, 160, 162, 174, 178, 180, 181, 189, 190, 191, 192, 194, 196, 198, 201, 203, 214, 225, 226, 227, 232, 233, 234, 235, 238, 256, 263, 264, 265, 267 , 268, 271, 276, 279, 280, 281, 282, 283, 285, 286, 287, 295, 301, 302, 302q, 303, 304, 305, 309q, 310, 315, 318, 318q, 319, 319q, 330	81
		420

Vysvetlivky – Explanatory notes: q – snímka je zo spektoradiometra MODIS satelit AQUA – MODIS image is from satellite AQUA; tučným písmom sú zvýraznené snímky z letného obdobia od 21.6. do 23.9. – bold indicates image from summer period (21th June – 23rd September).

¹⁾Year, ²⁾Day of year (DOY), ³⁾Number of images

týchto údajov sú objekty dlhodobiejšieho výskumu najmä trvalé monitorovacie plochy (TMP) systému ČMS Lesy. Ide hlavne o údaje z terénnych pozorovaní nástupu jednotlivých fenologických fáz.

2.3. Modelovanie fenologického vývoja lesných porastov

Jednotlivé fenofázy drevín sú hodnotené podľa stupnice, ktorú uvádza manuál pre fenologické pozorovania vypracovaný pre celoeurópsky monitorovací systém (PREUHSLER 1999) a podľa stupnice vypracovanej Slovenským hydrometeorologickým ústavom (BRASLAVSKÁ a KAMENSKÝ 1996). Pre listnaté dreviny sa hodnotia nasledovné fenofázy: začiatok pučania; zalistovanie (začiatok a všeobecné); jánске výhonky; letné žltnutie listov; jesenné žltnutie listov (začiatok a všeobecné); opad listov (začiatok a koniec).

Pod modelovaním fenologického vývoja lesných porastov rozumieme predikciu hlavných fenologických udalostí a to pomocou analýzy priebehu normalizovaného vegetačného indexu NDVI odvodeného z produktu

MOD09. Priebeh celoročného vývoja vegetačného indexu sme opísali sigmoidnou logistickou krivkou (FISHER 2007):

$$v(t) = v_{min} + v_{amp} \left(\frac{1}{1 + e^{m_1 - m_2 t}} - \frac{1}{1 + e^{m_3 - m_4 t}} \right) \quad [1]$$

Parametre v_{min} a v_{amp} zodpovedajú minimálnej hodnote a amplitúde vegetačného indexu (NDVI). Parametre m_1 a m_2 kontrolujú tvar a sklon krivky v jej nástupnej (jarnej) fáze, parametre m_3 a m_4 v zostupnej (jesennej) fáze.

Parametre v_{min} a v_{amp} boli rovnaké pre všetky fenologické krivky. Ich hodnoty boli odhadnuté z celoslovenských údajov a nie sú predmetom štatistického výpočtu. Pre ich určenie sme najprv vypočítali priemernú hodnotu NDVI ($NDVI_{AVG}$) a jej smerodajnú odchýlku ($NDVI_{STD}$), a to zo všetkých listnatých porastov s dominantným zastúpením buka. Minimálnu hodnotu v_{min} sme stanovili ako $NDVI_{AVG} - NDVI_{STD}$. Maximálnu hodnotu ako $NDVI_{AVG} + NDVI_{STD}$. Z ich rozdielu sme vypočítali amplitúdu v_{amp} . Do výpočtu minimálnych hodnôt NDVI

bolo zahrnutých 17 satelitných snímok spred vegetačného obdobia, a to hlavne z konca marca a začiatku apríla, aby sme sa vyhlili kontaminácii odrazivosti snehovou pokrývkou. Išlo o snímky z nasledujúcich rokov a dní: 2000: 98; 2001: 91, 93; 2002: 92; 2003: 86; 2004: 93, 94, 105; 2005: 91; 2006: 98; 2007: 85, 90; 2008: 67, 91; 2009: 92, 93, 97. Do výpočtu maximálnych hodnôt NDVI bolo zahrnutých 26 snímok od konca mája do konca augusta (2000: 155, 162, 233; 2001: 225; 2002: 169, 174, 243; 2003: 159, 163, 182, 218, 239; 2004: 166, 230; 2005: 150, 244; 2006: 178, 199, 254; 2007: 197, 236; 2008: 177, 232; 2009: 165, 204, 232). Vypočítaná hodnota $v_{min} = 0,429$ a $v_{amp} = 0,497$.

Parametre m_1 a m_4 boli vypočítané zvlášť pre každý obrazový prvok výstupného rastra, ktorá prislúchala k bukovému porastu. Najskôr boli pre daný pixel extrahované hodnoty príslušného časového radu NDVI z rokov 2000 až 2010. Z nich boli metódou najmenších štvorcov určené hodnoty hľadaných parametrov. Prehľadávanie priestoru bolo ukončené, keď RMS dosiahla hodnotu menšiu ako stanovený limit. Aplikovaním systému kritérií kvality na jednotlivé snímky boli z analýzy vylúčené obrazové prvky ovplyvnené oblačnosťou, tieňom z oblakov, väčším množstvom aerosólu a pixely kde odrazivosť bola ovplyvnená snehovou pokrývkou. Týmto obrazovým prvkom sme prisúdili hodnotu 0. Pre potreby analýzy časových radov NDVI ako aj z dôvodov obmedzení pri práci s nulovými hodnotami bolo potrebné chýbajúce hodnoty NDVI doplniť. Chýbajúce hodnoty boli nahradené interpoláciou pomocou vypočítanej sigmoidnej funkcie [1]. Vstupom boli teda jednotlivé ročné série snímok po uplatnení kritérií kvality. Výstupom sú okrem súborov doplnených o chýbajúce hodnoty NDVI aj súbory s odhadnutými parametrami funkcie [1], t. j. parametre m_1 až m_4 kontrolujúce tvar a sklon krivky v jej nástupnej (jarnej) a zostupnej (jesennej) fáze.

Odvođenú krivku sme využili pre určenie nástupu rozhodujúcich fenologických udalostí. Metódami matematickej analýzy boli vypočítané extrémne hodnoty interpolačnej funkcie a jej derivácií, ako aj poradový deň v roku, v ktorých tieto udalosti nastali. Extrémy funkcie modelujúcej priebeh NDVI boli porovnané s terestrickými fenologickými pozorovaniami na výskumnej ploche Turová na VŠLP Zvolen. Na základe tohto porovnania sme stotožnili extrém funkcie s fenofázou, ktorá mu časovo najviac zodpovedala. Pre výpočet extrémov funkcie a určenie inflexného bodu (IB) sme využili prvú až tretiu deriváciu sigmoidnej funkcie [1]. Prvá derivácia funkcia má nasledujúci tvar:

$$v'(t) = v_{amp} \left(\frac{m_2 \cdot e^{m_1 - m_2 t}}{(1 + e^{m_1 - m_2 t})^2} - \frac{m_4 \cdot e^{m_3 - m_4 t}}{(1 + e^{m_3 - m_4 t})^2} \right) \quad [2]$$

K IB každého pixlu bol vypočítaný príslušný poradový deň v roku a hodnota NDVI. Strednú hodnotu poradového dňa pre celé územie Slovenska pre drevinu buk

sme vyjadrili prostredníctvom mediánu a aritmetického priemeru. Medián sme využili pri interpretácii celoslovenských údajov, aritmetický priemer pri interpretácii údajov na úrovni obrazového prvku za zvolené časové obdobie 2000 – 2010.

Hodnotu NDVI zodpovedajúcu IB sme určili dosadením príslušného poradového dňa v roku do funkcie [1]. Priemernú hodnotu NDVI pre celé územie Slovenska pre drevinu buk sme vypočítali ako medián všetkých hodnôt NDVI v zahrnutých pixloch.

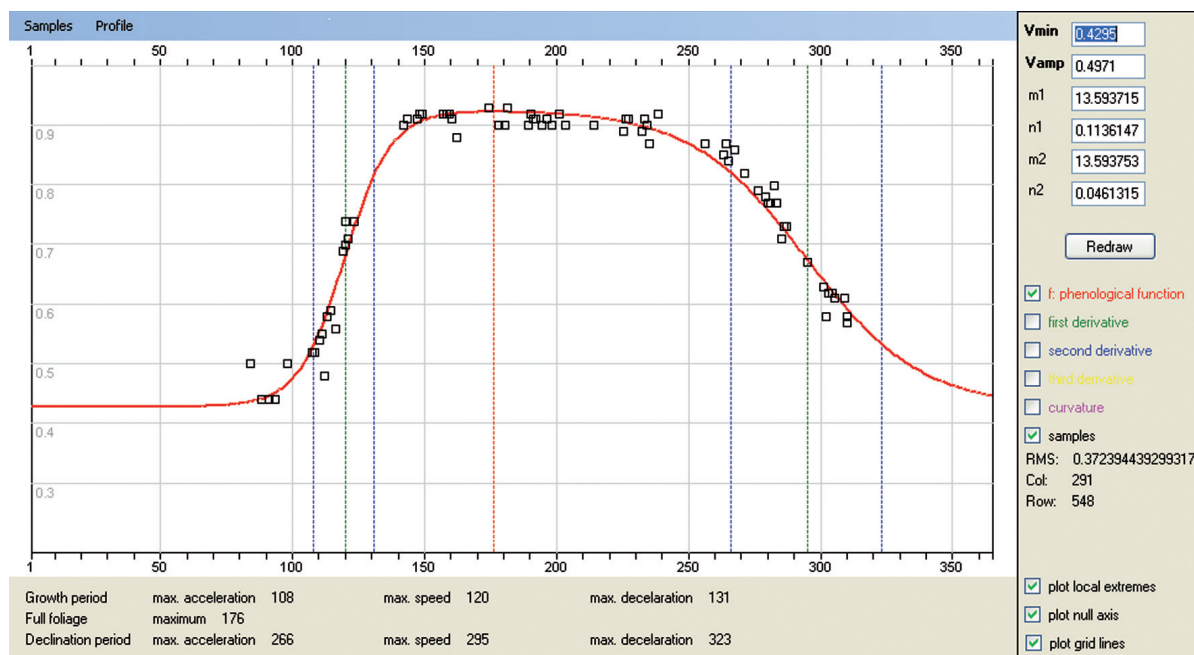
3. Výsledky a diskusia

3.1. Modelovanie fenologického vývoja lesných porastov

Ročný priebeh NDVI sme modelovali pomocou sigmoidnej funkcie [1]. Z extrémnych hodnôt interpolačnej funkcie a k nim určených poradových dní v roku, v ktorých tieto udalosti nastali, sme mohli identifikovať tri základné fázy fenologického cyklu: zalistovanie (jarná fáza, *growth period*), plné olistenie (letná fáza, *full foliage*), opadávanie (jesenná fáza, *declination period*). Deň maximálneho olistenia zodpovedá výskytu maximálnej hodnoty fenologickej krivky. Obdobie maximálnej rýchlosti (*maximal speed*) rastu resp. opadávania listov zodpovedajú inflexnému bodu (IB) v jarnej resp. jesennej fenofáze (obr. 3). Ďalšími významnými bodmi sú dni maximálneho prírastku rýchlosti (*maximal acceleration*) a maximálneho spomalenia rýchlosti olistovania resp. opadávania listov, ktoré približne zodpovedajú lokálnym extrémom druhej derivácie sigmoidnej funkcie.

Odvođená fenologická krivka s jej extrémami je základom pre porovnanie s terestrickými fenologickými pozorovaniami. PRIWITZER (2010 in PAVLENDÁ *et al.* 2010), Brandýsová (2010) zhodnotili v rovnorodom bukovom poraste na trvalej monitorovacej ploche Turová na VŠLP Zvolen priebeh jednotlivých fenofáz za obdobie 2001 – 2010. V tabuľke 2 uvádzame výsledky pre fenofázy začiatok pučania a začiatok zalistovania. Začiatok pučania je považovaný za začiatok vegetačného obdobia, keď po rozpuku listových púčikov dochádza k rýchlemu rozvoju asinilačného aparátu (fenofáza zalistovania). Podľa pozemných pozorovaní na TMP začiatok pučania prebiehal v jednotlivých rokoch od 12. do 23. apríla (102. – 113. deň v roku). Začiatok zalistovania prebiehal od 17. do 30. apríla (107. – 120. deň v roku).

Z výsledkov uvedených v tabuľke 2 vyplýva, že deň zodpovedajúci maximu prvej derivácie funkcie [1] modelujúcej priebeh fenologickej krivky sa vo väčšine rokov viac približuje ku dňu začiatku zalistovania ako k začiatku pučania. Začiatok zalistovania preto v ďalšom stotožňujeme s dňom zodpovedajúcemu maximu 1. derivácie funkcie [1], t. j. s polohou inflexného bodu (ďalej IB) v jarnej – vzostupnej časti sigmoidnej krivky. Termíny dosiahnutia tohto maxima sa v období 2000–2010 pohybovali od 14. do 27. apríla (107,5 – 118,5 deň v roku).



Obr. 3. Funkcionalita produktu Phenological profile pre analýzu ročného priebehu vegetačného indexu NDVI, priebehu derivácií funkcie a výpočet krivostí. Ukážka ročného priebehu krivky NDVI s doplnenými interpolovanými hodnotami. Na osi x je uvedené poradové číslo dňa v roku

Fig. 3. The functionality of the Phenological profile package for analysis of the annual course of vegetation index NDVI, course of the function derivatives and curvatures. X-axis: days of year

Tabuľka 2. Deň nástupu fenofáz začiatok pučania a začiatok zalisfovania a deň zodpovedajúci hodnote 1. derivácie funkcie [1] na TMP Turová: rovnírodý bukový porast

Table 2. Date of onset for two phenophases – beginning of buds burst and beginning of leaf unfolding and day corresponding to 1st derivatives of function [1]. Monitoring plots Turová, beech stand

Rok ¹⁾	Začiatok pučania Terénne pozorovania ²⁾		Začiatok zalisfovania Terénne pozorovania ³⁾		Deň zodpovedajúci IB funkcii [1]: MODIS snímky ⁴⁾
	Dátum ⁵⁾	Poradový deň ⁶⁾	Dátum ⁵⁾	Poradový deň ⁶⁾	Poradový deň (priemer z 2 pixelov) ⁷⁾
2001	22.4.	112	25.4.	115	114,5
2002	12.4.	102	26.4.	116	109
2003	22.4.	112	29.4.	119	114
2004	16.4.	107	26.4.	117	118
2005	21.4.	111	28.4.	118	118,5
2006	21.4.	111	28.4.	118	117
2007	12.4.	102	17.4.	107	108
2008	12.4.	103	25.4.	116	109,5
2009	14.4.	104	17.4.	107	107,5
2010	23.4.	113	30.4.	120	118

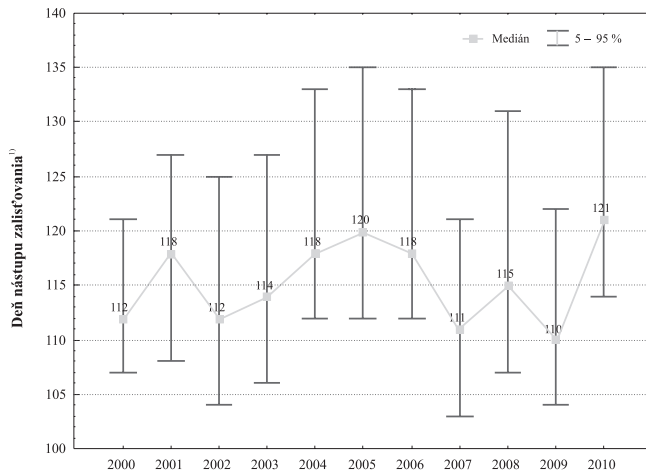
Charakteristika plochy Turová. LHC: VŠLP Zvolen; súradnice: 48° 39' 59'', 19° 02' 49''; dielec 541; nadmorská výška 575 m; expozícia V; vek ~70 rokov; zastúpenie BK 100%; priemerný ročný úhrn zrážok: ~ 840 mm – Plot description: Forest district: VŠLP Zvolen; coordinates: 48° 39' 59'', 19° 02' 49''; compartement: 541; altitude 575 m; slope orientation: east; age ~ 70 year; composition: beech 100%; annual mean precipitation: 840 mm.

¹⁾Year, ²⁾Beginning of buds burst, Observation on plot, ³⁾Beginning of leaf unfolding, Observation on plot, ⁴⁾Day corresponding to an inflection point of the function [1]: MODIS-based, ⁵⁾Date, ⁶⁾Day of year (DOY), ⁷⁾DOY (average from 2 pixels)

Tabuľka 3. Deň nástupu (5 a 95 % kvantil) a dĺžka trvania fenofázy zalistovania pre drevinu buk
Table 3. Date of onset (5 and 95% quantile) and duration of phenophase leaf unfolding for beech

Rok ¹⁾	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
5 % kvantil ²⁾	107	108	105	106	112	112	112	104	107	104	114
95 % kvantil ³⁾	121	127	125	127	133	136	133	121	131	123	135
Dĺžka trvania ⁴⁾	14	19	20	21	21	24	21	17	24	19	21

¹⁾Year, ²⁾5 % quantil, ³⁾95 % kvantil, ⁴⁾Duration of phenophase



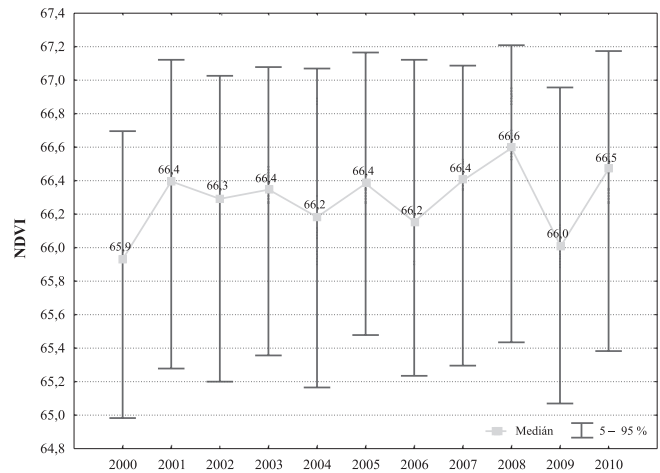
Obr. 4. Deň nástupu fenofázy začiatku zalistovania v rokoch 2000 až 2010 určený z vegetačného indexu pre bukové porasty Slovenska. Medián a kvantilové hodnoty 5 – 95 %

Fig. 4. The date of phenophase onset (beginning of leaf unfolding) for beech stands in Slovakia for the years 2000 – 2010. The onset was derived from NDVI and it is expressed by median and 5 – 95% quantile. X-axis: year; ¹⁾date onset (DOY)

Stredné hodnoty (medián) dňa nástupu fenofázy zalistovania, vnútroročná variabilita vyjadrená 5 a 95 % kvantilom a zodpovedajúce NDVI podľa jednotlivých rokov pre bukové porasty z celého územia Slovenska sú uvedené v tabuľke 3 a v grafoch 4 a 5. Na obrázku 6 je vo forme mapky zobrazená priestorová premenlivosť začiatku zalistovania pre bukové porasty Slovenska, vyjadrené ako priemerná hodnota za obdobie 2000 – 2010. Na obrázku 7 je uvedený graf korelácie začiatku zalistovania (os y) v závislosti od nadmorskej výšky (os x).

Zo získaných výsledkov vyplýva:

Deň, v ktorom má funkcia modelujúca priebeh NDVI v jarnej fenofáze inflexný bod sa v priebehu jednotlivých rokov (2000 – 2010) mení, čo súvisí s priebehom počasia počas jarného obdobia. Najskorší termín nástupu fenofázy pučania listov sme zaznamenali v roku 2009, keď stredná hodnota (medián) za Slovensko pre drevinu buk bola 110. deň v roku. Najneskoršie nástupy sme pozorovali v rokoch 2005 a 2010 (120., resp. 121. deň). Stredná hodnota (medián) začiatku pučania za obdobie 2000 – 2010 bola 115. deň v roku.



Obr. 5. Medián a kvantilové hodnoty 5 – 95 % vegetačného indexu NDVI zodpovedajúce fenofáze začiatku zalistovania (inflexnému bodu) v rokoch 2000 – 2010

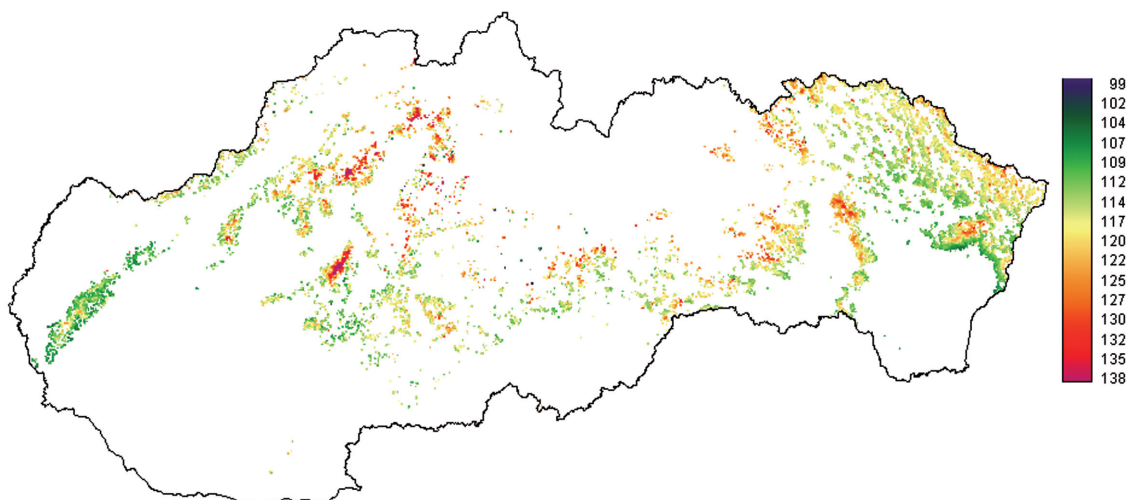
Fig. 5. Median and 5 – 95% quantile of the NDVI corresponding to the phenophase beginning of leaf unfolding of beech stand for the years 2000 – 2010. X-axis: year; Y-axis: NDVI

Vnútro ročná variabilita dní zodpovedajúcich inflexnému bodu (deň začiatku zalistovania) je podmienená najmä klimatickými podmienkami vyplývajúcimi z nadmorskej výšky, v ktorej sa porasty buka nachádzajú a priebehu počasia. Rozpätie, v ktorom sa začína zalistovanie bukových porastov sme vyjadrili pomocou 5 – 95 % kvantilu. Najkratšie trvala táto fenofáza v roku 2000, a to 14 dní od 107. do 121. dňa (medián 112. deň). Najdlhšie v roku 2005 a 2008, a to 24 dní od 112. po 136. deň, resp. od 107. po 131. deň pri 5 – 95 % kvantile.

Hodnota NDVI pre inflexný bod bola v jednotlivých rokoch vyrovnaná s veľmi malou variabilitou. Z uvedeného vyplýva, že deň nástupu pučania buka nastáva pri hodnote NDVI $\approx 0,66$ bez ohľadu na rok a na nadmorskú výšku.

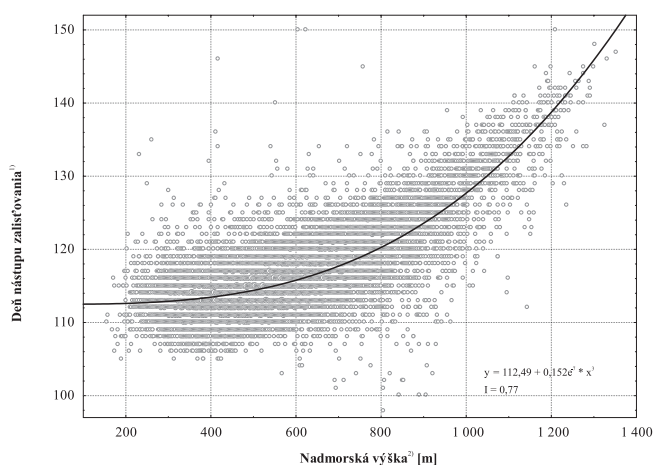
Medzi dňom nástupu začiatku zalistovania (y = priemer z obdobia 2000 – 2010) a nadmorskou výškou (x), v ktorej sa porast nachádza existuje stredne silná nelineárna závislosť (obr. 6) vyjadrená vzťahom: $y = 112,49 + 0,152e^{-7} * x^3$. Index korelácie $I = 0,77$.

Z uvedenej závislosti pre bukové porasty vyplýva, že medzi výškou 150 m a 400 m n. m. došlo k posunu



Obr. 6. Fenofáza začiatku pučania ~ priemerná hodnota dňa zodpovedajúca inflexnému bodu funkcie [1] za obdobie 2000 – 2010 pre porasty s dominantným zastúpením buka. Pre potreby lepšieho vizuálneho vnímania je počet pixlov zväčšený pomocou filtra o rozmere 3×3 pixle

Fig. 6. The phenophase beginning of leaf unfolding. The mean value from period 2000 – 2010 of beech stands. The mean corresponds to an inflection point of function [1]



Obr. 7. Závislosť začiatku zalíšovania od nadmorskej výšky. Os x: nadmorská výška. Os y: priemerná hodnota dňa nástupu fenofázy zalíšovania z obdobia 2000 – 2010

Fig. 7. Relation between the phenophase beginning of leaf unfolding and altitude.

¹⁾Day of leaf onset – mean from 2000–2010 period, ²⁾Altitude (m)

nástupu zalíšovania o asi 1 deň. V rozpätí od 400 do 600 m dochádza k posunu nástupu začiatku zalíšovania o 1 deň každých asi 88 m nadmorskej výšky, v rozpätí 600 – 800 m n. m. každých 45 m, 800 – 1 000 m n. m. každých 27 m, 1 000 – 1 200 m n. m. každých 18 m a nad 1 200 m n. m. každých 13 m nadmorskej výšky.

Nami zvolený prístup pri interpretácii fenologickej krivky je v súlade s prácou FISHERA (2007), ktorý nástup zalíšovania (onset) stanovil ku dňu, v ktorom sigmoidná funkcia dosahuje hodnotu polovičného maxima. Polovičným maximom označuje najstrmejší bod na sigmoide,

alebo maximum prvej derivácie a chápe ho ako termín, kedy vypučí najviac listov.

Odlíšny prístup zvolil ZHANG *et al.* (2003) a HEUMANN *et al.* (2007). ZHANG *et al.* (2003) dátumy začiatku fenologických fáz identifikuje mierou zmeny zakrivenia krivky vyrovnaného logistického modelu. S maximálnych hodnôt krivosti odvodzuje začiatok a koniec vegetačného obdobia. Na uvedenom prístupe je založený aj globálny fenologický produkt MCD12Q2 prístupný v 500 m rozlíšení v 8 dňových krokoch. Pre modelovanie priebehu fenologických udalostí využíva vegetačný index EVI – *Enhanced vegetation index* (GANGULY *et al.* 2010). HEUMANN *et al.* (2007) využil softvér pre analýzy časových radov TIMESAT, v ktorom je začiatok a koniec vegetačnej sezóny definovaný ako 20 % hodnota funkcie na rastúcej resp. klesajúcej časti fenologickej krivky. V našom prístupe by Zhangove a Heumannove určenie vegetačnej sezóny zodpovedalo extrémnu druhej derivácie funkcie [1], t. j. vegetačné obdobie by sa predĺžilo a začínalo by pri začiatku zvyšovania a končilo pred koncom poklesu NDVI k hodnotám zodpovedajúcim obdobiu vegetačného pokoja. Na úskalia prístupu ZHANGA *et al.* (2003) a GANGULYHO *et al.* (2010) v našich podmienkach poukázali BRANDÝSOVÁ (2010) pri drevine buk na TMP Turová a PRIWITZER (2010) pri drevine dub cer na modelovanom území Čifáre. Upozorňujú na vplyv bylinnej a krovitej vrstvy vegetácie rozvíjajúcej sa pred začiatkom pučania listov na zvyšovanie NDVI. To skresľuje hodnoty NDVI pre listnaté dreviny.

Rozdielne metodické prístupy pri určení nástupu jednotlivých fenofáz môžu spôsobovať problémy pri interpretácii dosiahnutých výsledkov a sťažovať ich porovnanie. Nami vyvinutý produkt Phenological Profile

umožňuje odvodiť okrem 1. až 3. derivácie aj krivosti funkcie modelujúcej priebeh NDVI. Produkt je teda možné využiť aj pri porovnávacích analýzach.

4. Záver

V práci sme predstavili inovatívnu metódu určovania nástupu fenologických udalostí lesných drevín založenú na využití údajov zo satelitného spektorradiometra MODIS. Metódu sme overili pri modelovaní fenologického vývoja bukových porastov v jarnom období vegetačnej sezóny pomocou vegetačného indexu NDVI odvodeného z MODIS produktu MOD09.

Hlavnou oblasťou riešenia bolo modelovanie ročného priebehu NDVI, a to pomocou sigmoidnej logistickej funkcie. Pre tento účel sme vyvinuli vlastne softvérové riešenie. Softvérový produkt na základe vstupných údajov (poradový deň v roku a NDVI) umožňuje odhadnúť vstupné parametre fenologickej krivky danej funkciou [1], vypočítať hodnoty prvej až tretej derivácie a jej krivosť. Hodnoty extrémov fenologickej krivky sme vzťahovali k terénnym pozorovaniam nástupu jarných fenofáz, a to začiatku pučania a zalisťovania listov. Optimálny ukazovateľ pre určenie nástupu zalisťovania je hodnota inflexného bodu funkcie modelujúcej priebeh NDVI počas roku.

Dosiahnuté výsledky po konfrontácii s pozemnými fenologickými pozorovaniami potvrdzujú možnosť využitia satelitných snímok pre odvodenie fenologických udalostí a ich využitie pri kontinuálnom a plošnom sledovaní odozvy lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prírodného prostredia. Krátkosť získaného časového radu zatiaľ neumožňuje odvodiť jeho základné charakteristiky, ktorými sú trend, sezónne (cyklické kolísanie) a náhodné kolísanie. V ďalšom riešení sa preto okrem postupného rozširovania údajovej bázy zameriame na analýzu nástupu ďalších fenofáz lesných drevín buk a dub a na vyhodnotenia vzťahov medzi NDVI a klimatickými charakteristikami.

Podakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0670-07 Satelitne založené sledovania odozvy lesných ekosystémov na globálne sa meniace podmienky prostredia.

Literatúra

- BECK P. S. A., ATZBERGER C., HØGDA K. A., JOHANSEN B. and SKIDMORE A. K., 2006: Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, **100**(3): 321-334.
- BRANDÝSOVÁ V., 2010: Odvodenie vegetačného indexu lesných ekosystémov zo satelitných údajov MODIS. Diplomová práca, Zvolen, TU vo Zvolene, LF-5775-3169, 75 s.
- BRASLAVSKÁ O., KAMENSKÝ L., 1996: Fenologické pozorovanie lesných rastlín. Metodický predpis. Bratislava: SHMÚ. 22 p.
- 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*, Tomus 9, Zvolen: LVÚ Zvolen, p. 65-84.

- BUCHA T., KOREŇ M., 2009: Kontinuálne sledovanie odozvy lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prírodného prostredia pomocou údajov DPZ – tvorba údajovej bázy. In: BUCHA, PAVLENDOVÁ (ed.): *Zborník vedeckých prác zo seminára „Dialkový prieskum Zeme – lesy v meniacich sa prírodných podmienkach“*. Zvolen: NLC, p. 35-50.
- ČABOUN V., 1996: Ekológia lesa. Zvolen: TU Zvolen, skriptá.
- FISHER J. I., MUSTARD J.F., 2007: Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, **109**, p. 261-273.
- GANGULY S., FRIEDL M.A., TAN B., ZHANG X., VERMA M., 2010: Land surface phenology from MODIS: Characterization of the Collection 5 global land cover dynamics product. *Remote Sensing of Environment*, **114**, p. 1805-1816.
- HEUMANN B.W., SEAQUIST J.W., EKLUNDH L., JÖNSSON P., 2007: AVHRR derived phenological change in the Sahel and Sudan, Africa, 1982–2005. *Remote Sensing of Environment*, **108**, p. 385-392.
- JUSTICE C.O., TOWNSHEND J.R.G., VERMOTE E.F., MASUOKA E., WOLFE R. E., SALEOUS N. *et al.*, 2002: An overview of MODIS land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, **83**, p. 3-15.
- KANG S., RUNNING S.W., LIM J-H., ZHAO M., PARK CH-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**, p. 232-242.
- KOCH B., AMMER U., SCHNEIDER T., WITTMER H., 1990: Spectroradiometer measurements in the laboratory and in the field to analyse the influence of different damage symptoms on the reflection spectra of forest trees. In: *Int. J. Remote Sensing*, **11**(7): 1145-1163.
- PAVLENDA P., PAJTÍK J. *et al.*, 2010: Monitoring lesov Slovenska. Správa za ČMS Lesy a projekt FutMon za rok 2009: NLC-LVÚ Zvolen, 139 p.
- PETTORELLI N., VIK J.O., MYSTERUD A., GAILLARD J-M., TUCKER C. J. and STENSETH N. CHR., 2005: Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. In: *Trends in Ecology & Evolution*, **20**(9): 503-510.
- PIAO S., FANG J., ZHOU L., CIAIS P., ZHU B., 2006: Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetations. In: *Global Change Biology*, **12**, p. 672-685.
- PREUSHLER T., 1999: Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forest. Part IX, Phenological observation. UN-ECE, 35 p.
- PRIWITZER T., BUCHA T., KOREŇ M., 2009: Využitie vegetačného indexu NDVI odvodeného z MODISu pri fenologických pozorovaniach lesných drevín. In: BUCHA, PAVLENDOVÁ (ed.): *Zborník vedeckých prác zo seminára „Dialkový prieskum Zeme – lesy v meniacich sa prírodných podmienkach“*. Zvolen: NLC, p. 51-64.
- , 2010: Fenologické pozorovania. In: PAVLENDÁ, PAJTÍK (eds.): *Monitoring lesov Slovenska*. Správa za ČMS Lesy a projekt FutMon za rok 2009. Zvolen: NLC-LVÚ Zvolen, p. 85-91.
- SODAMI K., MAIRE G.M., DUFRENE E., FRANCOIS 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. In: *Remote Sensing of Environment*, **122**(5): 2643-2655.
- STÖCKLI R., VIDALE P. L., 2004: European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. In: *International Journal of Remote Sensing*, **25**(17): 3303-3330.
- ŠKVARENINOVÁ J., 2008: Vyhodnotenie nástupu jarných fenofáz duba letného (*Quercus robur* L.) v Zvolenskej kotline vo vzťahu k teplotným sumám. In: *Meteorologický časopis*, **11**(1-2): 15-20.

- , 2009: Priebeh vegetatívnych fenologických fáz autochtónnych populácií smreka obyčajného (*Picea abies* L.) zo Slovenska. In: *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, **55**(1): 13-27.
- ŠTEFANČÍK I., 1995: Fenológia v lesníctve. 1. začiatok vegetačnej činnosti. In: *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, **41**(2): 131-139.
- ZHANG X., FRIEDL H. A., SCHAAP B. S., STRAHLER A. H., HODGES J. C. F., GAO F., REED B. C. and HUETE A., 2003: Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, **84**, p. 471-475.
- ZHOU L., TUCKER C. J., KAUFMANN R., 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** (D17) p. 20069-20083.
- Dostupné na internete: Slovenský hydrometeorologický ústav: Sieť fenologických staníc. <http://www.shmu.sk/sk/?page=354>; Slovenský hydrometeorologický ústav: Agrometeorologické a fenologické informácie. Mesačné a ročné správy. www.shmu.sk

Summary

Satellite mapping of forests enables us to deepen our knowledge of how forest ecosystems respond to global environmental change. Opportunities for further research were greatly improved by the launch of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) instruments on the Terra platform in 1999 and on the Aqua platform in 2002. Wide spectral range (0.4 – 14.5 μm), data acquisition in the 36 spectral bands, moderate spatial resolution (250 m – 1 km), free of charge access and near daily global coverage facilitate monitoring of the phenological events of forest trees. This paper presents a new innovative approach for the modelling of phenological events of forest stands by Normalized vegetation index (NDVI) derived from MODIS images. NDVI values were derived from stands with a prevalence of beech (*Fagus sylvatica* L.) (see fig. 1), for each year of the period 2000–2010 from the time series of 420 MODIS images (tab. 1). Research was focused on spring-time vegetation sprouting buds and leaf unfolding. Phenological modelling is based on the product of MOD09, which represents pre-processed data of surface reflectance at a resolution of 250 and 500 m. The quality assessment of the satellite data was based on the sub-dataset of quality, which is present in the MODIS products. Implementation of the quality layer enabled us to find potential sources of mistakes, e.g. detection

of pixels affected by cloudiness, shadows of clouds and to exclude affected pixels from analysis.

The Normalized vegetation index (NDVI) was used to determine the onset of the vegetation stages. Sigmoid curve (see function [1]) was applied to model a course of NDVI. The software product Phenological profile (© Milan Koreň) was developed for this purpose (see fig. 3). The function's parameters v_{min} and v_{amp} are the minimal value and amplitude of the vegetation index (NDVI), $m_{1,2,3,4}$, and control the shape and slope of the curve in the spring and autumn phases. Phenological curves were used to determine the beginning of crucial phenological events. They are determined by derivations (from the 1st to the 3rd order) and curvatures of the modelled curve. Phenological observations on monitoring plot Turová, served to verify the relationship between NDVI curve, derived from MODIS, and terrestrially observed phenophases. The aim of this comparison was to define phenophase events using local extremes of NDVI functions. The results show that a maximum at the first derivative of the function [1] corresponds with the start of phenophase leaf unfolding. Leaf unfolding therefore is identified by the position of the inflection point in the spring stage of the sigmoid curve. Dates for achieving the first derivative maximum in the period 2000–2010 ranged from 14 to 27 April (107.5 to 118.5 days per year) on the monitoring plot, Turová (tab. 2).

Based on these findings, a day of leaf unfolding was determined for the each beech pixel included in the analyses. The earliest start of leaf unfolding was observed in 2009 in the period 2000–2010. The median value was the 110th day of the year (DOY). The latest start was observed in 2010, the median = 121st DOY (see fig. 4). The shortest duration of leaf unfolding was observed in 2000 and took 14 days from the 107th to 121st DOY for 5–95% quintile. The longest duration was observed in 2005 and 2008, and took 24 days (see tab. 3 and fig. 4). Spatial distribution of unfolding is depicted for the beech stand in fig. 6.

Leaf unfolding is delayed non-linear with the increase of altitude. Unfolding is shifted by 0.4 day between heights 200 and 300 m a.s.l. and a shift of 7.6 day between heights 1200 and 1300 m a.s.l. (see fig. 7).

The obtained results prove the suitability of NDVI derived from MODIS for phenological modelling on a regional level. Further research will focus on the other phenophases of forest vegetation and exploration into the relationship between meteorological parameters and NDVI.