

VYUŽITIE VEGETAČNÉHO INDEXU NDVI ODVODENÉHO Z MODISU PRI MODELOVANÍ UKONČENIA VEGETAČNÉHO OBDOBIA

Utilization of vegetation index NDVI derived from MODIS for end of growing season modelling

¹Brandýsova, V. – ²Bucha, T.

¹Technická Univerzita vo Zvolene – Lesnícka fakulta

²Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav Zvolen

Abstrakt

V práci prezentujeme výsledky modelovania ukončenia vegetačného obdobia bukových porastov Slovenska. Analyzovali sme časové rady vegetačného indexu NDVI odvođeného zo satelitných údajov MODIS (produkt MOD09) z obdobia 2000 – 2010. Priebeh vegetačného obdobia je modelovaný použitím sigmoidnej logistickej funkcie. Za modelovaný termín ukončenia vegetačného obdobia považujeme extrémnu hodnotu 1. derivácie tejto funkcie v zostupnej fáze (jesenné obdobie), ktorá predstavuje základnú fenologickú fázu – opad listov. Načasovanie dosiahnutia tejto fenofázy je nelineárne závislé od nadmorskej výšky. V skúmanom období 2000 – 2010 sme pri drevine buk (*Fagus sylvatica*) zaznamenali, že v nadmorských výškach od cca 400 do 800 m opadávajú listy najneskôr. O niečo skôr opadávajú stromy do 400 m a od cca 800 do 1000 m, a výraznejšie skorší opad sme zaznamenali v nadmorských výškach nad 1000 m. Neobvyklý sa javí rok 2002, kedy sme zaznamenali značne neskoršie načasovanie tejto fenofázy v nadmorských výškach od 400 m oproti ostatným rokom.

Kľúčové slová: MODIS, NDVI, fenológia, opad listov

Abstract

The paper presents results of modelling the ends of growing season in beech stands from Slovakia. There was analyzed the time series of vegetation index NDVI derived from satellite data MODIS (MOD09 product) from the period 2000 – 2010. Course of growing season is modelled by using logistic sigmoid function. The date of end of growing season is expressed by extreme value of first derivation of this sigmoid function in its declination period (autumn season). This extreme value constitutes a basic phenological phase – leaf fall. Timing of achievement this phenophase is non-linear depending on altitude. The latest leaf fall was noticed for beech (*Fagus sylvatica*) in altitude from about 400 to 800 m.a.s.l. This phenological phase was noticed a bit earlier in altitude up to 400 and from about 800 to 1000, and much earlier in altitude over 1000 m.a.s.l. Particularly special was the year 2002. Timing of this phenological phase in altitude over 400 m.a.s.l. was recorded well later in comparison with other years.

Keywords: MODIS, NDVI, phenology, leaf fall

Úvod

Klíma na našej Zemi sa neustále mení a vyvíja. Následkom toho nastávajú zmeny najmä v teplotnom režime a režime zrážok v priebehu roka. Tieto vplyvy klimatických zmien pôsobia priamo aj na lesné ekosystémy ako jednu z hlavných zložiek životného prostredia. Pri poznávaní vzájomných vzťahov medzi trendmi fenologických prejavov populácií a vývojom klímy sa uplatňujú fenologické pozorovania (ŠKVARENINOVÁ A KOL., 2009).

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 (KOLEKTÍV AUTOROV, 1993). Fenologické pozorovania poskytujú ekologicky cenné informácie o priemernom trvaní vegetačného obdobia s olistením rastlinných druhov v danej oblasti a o miestnych a meteorologicky určených rozdieloch v dátumoch udávajúcich začiatky dôležitých javov (LARCHER, 1988).

V posledných troch desaťročiach sa autori zaoberajú problematikou sledovania priebehu vegetačného obdobia s použitím satelitných údajov. Prvé pokusy využívali údaje z rádiometra AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) poskytované od roku 1981 s maximálnym priestorovým rozlíšením 1.1 km. Toto rozlíšenie však neumožňovalo stanovenie jednotlivých fenologických fáz, preto sa autori rozhodli identifikovať dva základné javy a to začiatok a koniec vegetačného obdobia, na ktorých základe odvodzovali dĺžku trvania vegetačného obdobia (VO). Za vhodného ukazovateľa stavu a vývoja zelenej vegetácie považovali normalizovaný vegetačný index (NDVI), ktorého hodnota vyplýva z odrazivosti v červenej a infračervenej časti spektra. Použitím NDVI časových radov z obdobia 1981 – 1999 odvodených z údajov AVHRR Zhou (2001) odvodil trend, ktorého priebeh ukázal predlžovanie vegetačného obdobia v Severnej Amerike a Euroázii. Lee (2002) použil na sledovanie vegetačného obdobia v stepi vnútorného Mongolska 9-ročný súbor údajov dvojtýždňových NDVI kompozícií a zistil: 1) minimálne až žiadne zmeny v čase nástupu VO v lesoch a kultivovanej krajine; 2) zvyšujúcu sa medziročnú variabilitu v čase nástupu VO v typických a púštnych stepiach; 3) veľkú variabilitu v čase nástupu VO pre púšť Gobi. Stockli a Vidale (2005) s použitím 20-ročného súboru AVHRR dát dokázali, že trend fenologických fáz vykazuje všeobecný posun k skoršiemu začiatku (-0.54 dňa za rok) a dlhšiemu trvaniu (+0.96 dňa za rok) VO, ktorý je štatisticky významný predovšetkým v strednej Európe. Piao (2006) použil 2-týždenné NDVI časové rady z AVHRR rádiometra z obdobia 1982–1999 pri sledovaní dopadov klimatických zmien na dĺžku vegetačného obdobia rastlinstva mierneho pásma v Číne. Výsledky ukázali predĺženie (+1.16 dňa za rok) a skorší začiatok (-0.79 dňa za rok) vegetačného obdobia. Heumann (2007) odvodzoval fenologické zmeny v africkom Sahele a Sudáne, pričom zistil štatisticky významný trend v predlžovaní a postupne neskoršom ukončení vegetačného obdobia v Sudáne a Guinejských regiónoch, pričom v Sahelskej oblasti nezistil žiadny významný trend.

Nové možnosti sledovania fenologických zmien vegetácie nastali vypustením družíc Terra (február 2000) a Aqua (júl 2002) nesúcich na palube spektorradiometer MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer). MODIS so svojím širokým spektrálnym rozsahom 0.4 – 14.5 μm zabezpečuje každodenné snímanie nášho územia s priestorovou rozlišovacou schopnosťou 250 – 1000 m (JUSTICE ET AL., 2002). Problematikou odvodenia vegetačného indexu NDVI zo satelitných údajov MODIS sa na Slovensku zaoberali Bucha a Koreň (2009) a využitie NDVI pri sledovaní fenologických prejavov lesných drevín zhodnotil Priwitzer a kol. (2009). Výsledky ich prác dokazujú vhodnosť použitia (1) NDVI ako biofyzikálneho indikátora meniacich sa podmienok prostredia, (2) sigmoidnej logistickej funkcie (Fisher, 2007) ako matematického modelu vegetačného obdobia a (3) extrémnych hodnôt 1. a 2. derivácie tejto funkcie na určenie načasovania jednotlivých fenologických udalostí pre bukové a dubovo-bukové porasty na území Slovenska. V zahraničí sa využitím vegetačných indexov pri sledovaní fenológie zaoberalo viacero autorov. Zhang (2003) prezentuje prvý pokus o štúdium fenológie vegetácie použitím údajov z MODISu. Za vhodného ukazovateľa zmien vegetácie považuje EVI (enhanced vegetation index) a jeho priebeh znázorňuje pomocou úsekovej logistickej funkcie. Zo Zhangovej funkcie vychádza Fisher (2006, 2007), ktorý ju modifikuje na sigmoidnú logistickú funkciu. Maximum 1. derivácie tejto funkcie - polovičné maximum chápe ako termín, kedy vypučí najviac listov. Kang a kolektív (2003) vo svojej práci používajú regionálny fenologický model na odvodenie

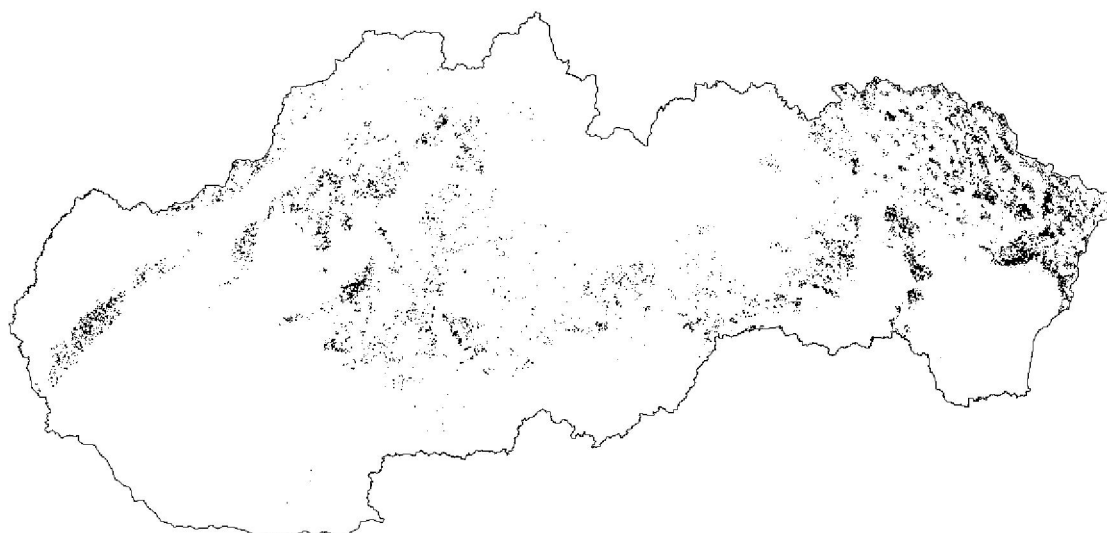
nástupu zelene v zmiešaných lesoch mierneho pásma pomocou indexu listovej plochy. Zistili, že nástup vegetácie z MODISu je priestorovo odlišný a ukázal významnú koreláciu s teplotou vzduchu. Analýzy vykonané Wangom (2004) vo Fínsku odhalili, že nástup zelene na jar odvodený z časových radov širokopásmového NDVI bol jednotlivých rokoch zhodný, a že fluktuácie NDVI v čase prechodu z jesennej fázy do zimnej dormancie zabraňujú spoľahlivému predpovedaniu ukončenia fotosyntetickej aktivity. Zhang a Goldberg (2010) vo svojej práci rozoberajú problematiku odvodenia fenofázy jesenného sfarbovania listov. Vyvinuli inovatívny prístup k hodnoteniu tejto fenofázy použitím časovo-normalizovaného indexu hnedosti odvodeného z údajov MODIS. Výsledky ich práce uvádzajú, že fáza jesenného sfarbovania listov odvodená pomocou časovo-normalizovaného indexu hnedosti sa len minimálne odlišuje od terénnych pozorovaní vykonaných na severovýchode Severnej Ameriky v rokoch 2001–2004.

V našej práci riešime problematiku stanovenia času ukončenia vegetačného obdobia a jeho závislosť od nadmorskej výšky. Predmetom skúmania sú časové rady NDVI odvodené z MODISu z obdobia 2000–2010. Práca je zameraná na bukové porasty na území Slovenska.

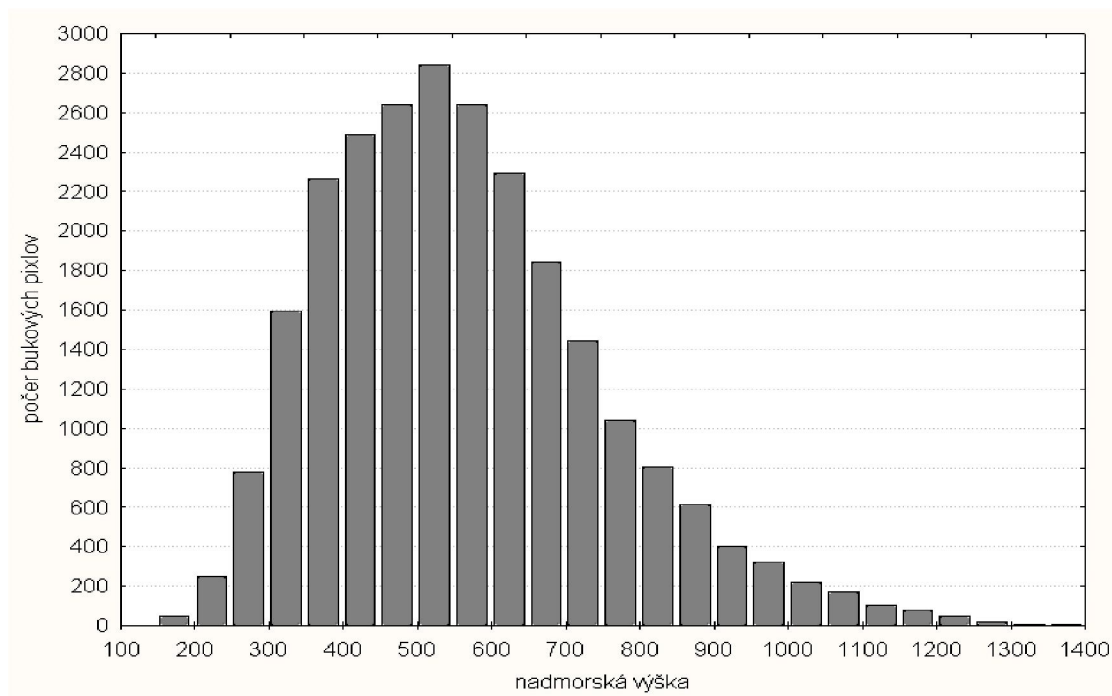
Metódy a materiál

Vymedzenie záujmového územia

Pri sledovaní fenológie s použitím satelitných snímok existujú dve možné úrovne analýz. Na prvej úrovni sú analyzované konkrétne porasty, kedy sa analyzujú pixle v jednotlivých porastoch, druhá úroveň je celoslovenská, kedy sa analyzujú všetky pixle na území Slovenska. V predkladanej práci sme analyzovali fenológiu na celoslovenskej úrovni. Záujmový región bol vymedzený oblasťou Karpát a Panónskou nížinou, pričom sme sa zamerali na porasty s dominantným zastúpením buka (*Fagus sylvatica*). 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). Z opisu porastov sme vybrali porasty so zastúpením buka a v ich rámci sme vybrali pixle klasifikované ako drevena buk. Z vrstvy vytvorenej kombináciou oboch vstupov sme vylúčili okrajové pixle z dôvodu ich možnej spektrálnej kontaminácie inými kategóriami krajinej pokrývky. Celkový počet analyzovaných pixlov je 24 969, čo predstavuje výmeru 156 tis. ha (obr. 1) (BUCHA, A KOL., in press). Analyzované porasty sa z hľadiska nadmorskej výšky nachádzajú v rozmedzí od 147 do 1400 m.n.m (graf 1) s prevládajúcim výskytom v 2. až 5. lesnom vegetačnom stupni (lvs.).



Obr. 1: Porasty s dominantným zastúpením drevena buk.



Graf 1: Histogram početností zastúpenia bukových porastov podľa nadmorskej výšky.

Výber produktu MODIS

Na základe posúdenia charakteristík produktov MODIS sme vybrali na riešenie úlohy produkt MOD09, ktorý reprezentuje spektrálnu odrazivosť na povrchu v 250 m a 500 m priestorovej rozlišovacej schopnosti. MOD09 je denný produkt, na ktorom boli vykonané rádiometrické a atmosférické korekcie, čo znamená, že je odstránený vplyv rozptylu a absorpcie svetla v atmosfére. Pracovali sme iba s časťou vrstiev produktov MOD09GQ (250 m) a MOD09GA (500 m). Využívali sme 7 vrstiev odrazivosti, a to kanály o vlnovej dĺžke 648 nm, 858 nm, 470 nm, 555 nm, 1240 nm, 1640 nm, a 2130 nm a vrstvu kvality. Pri 250 m rozlišovacej schopnosti je veľkosť jedného obrazového prvku 6.25 ha, čo zhruba zodpovedá spodnej hranici veľkosti základnej jednotky priestorového rozdelenia lesa na území Slovenska, ktorá je 5 ha.

Odvodenie NDVI a modelovanie priebehu fenológie lesných drevín

Hodnoty vegetačného indexu NDVI sme odvodili prostredníctvom spektrálnej odrazivosti v červenom kanály (RED) a infračervenom kanály (IRED) s použitím funkcie [1]:

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

Výsledkom boli hodnoty NDVI odvodené pre každý pixel na území Slovenska, ktoré tvoria časové rady za obdobie 2000 až 2010 a boli predmetom ďalších analýz.

Fenologický vývoj lesných drevín rastúcich v našich podmienkach za riadi istými zákonitosťami: 1) na začiatku vegetačného obdobia – na jar dochádza k pučaniu a rozlišovaniu stromov, ktoré vrcholí dosiahnutím maximálnej listovej plochy; 2) na konci vegetačného obdobia – na jeseň dochádza k dekolorácii listov a k ich následnému opadu. Takýto priebeh vegetačného obdobia je možné modelovať logistickou sigmoidnou funkciou (Fisher, 2007) [2], ktorá zachytáva jedno vzostupné a jedno zostupné obdobie:

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

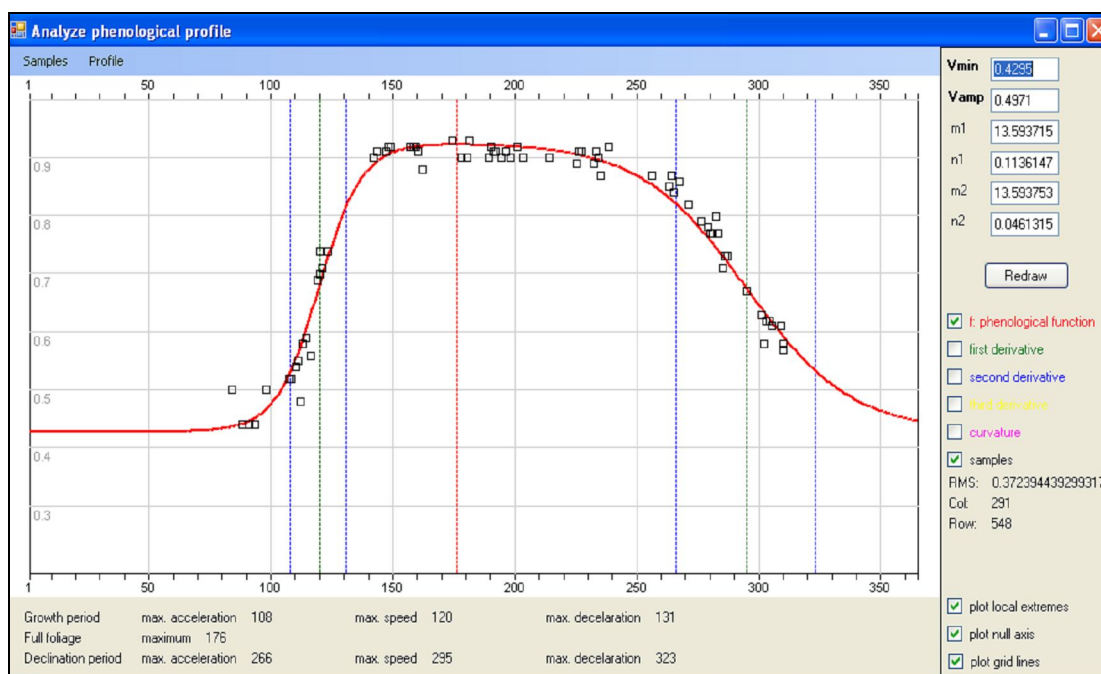
kde v našom prípade $v(t)$ predstavuje hodnotu vegetačného indexu NDVI; v_{min} je minimálna hodnota NDVI a v_{amp} je celková amplitúda; m_1 , m_2 , a n_1 , n_2 sú parametre určujúce tvar krivky pre vzostupné obdobie (m_1 , n_1) a zostupné obdobie (m_2 , n_2).

Priebeh fenológie sme určovali v programe Phenological profile (Koreň ©), ktorý pri modelovaní používa práve funkciu [2] navrhnutú Fisherom (2007). Vstupnými údajmi boli časové rady satelitných snímkov NDVI pre jednotlivé roky od 2000 do 2010. Výstupom sú súbory s odhadnutými parametrami funkcie m_1 , m_2 , a n_1 , n_2 . Na zistenie času nástupu rozhodujúcich fenologických udalostí sme použili metódy matematickej analýzy, a to prvú a druhú deriváciu funkcie a ich extrémne hodnoty. Ku každému extrému bol odvodený konkrétny deň, kedy bol dosiahnutý.

Nástup fenofázy opad listov sme stotožnili s inflexným bodom v zostupnej časti fenologickej krivky t.j. s minimom prvej derivácie. Hodnoty tohto dňa pre každý bukový pixel sme extrahovali z programu Phenological profile pre potreby analýz ich priebehu medziročne a v rámci jednotlivých rokov v závislosti od nadmorskej výšky.

Výsledky a diskusia

Na modelovanie fenologickej krivky sme použili program Phenological profile, ktorý okrem samotného znázornenia priebehu fenologickej funkcie vypočíta hodnoty jej 1. až 3. derivácie a krivosti (Obr. 2). Tieto hodnoty sme ďalej využívali pri stanovení času nástupu jarných (growth period), letnej (full foliage) a jesenných (declination period) fenofáz.



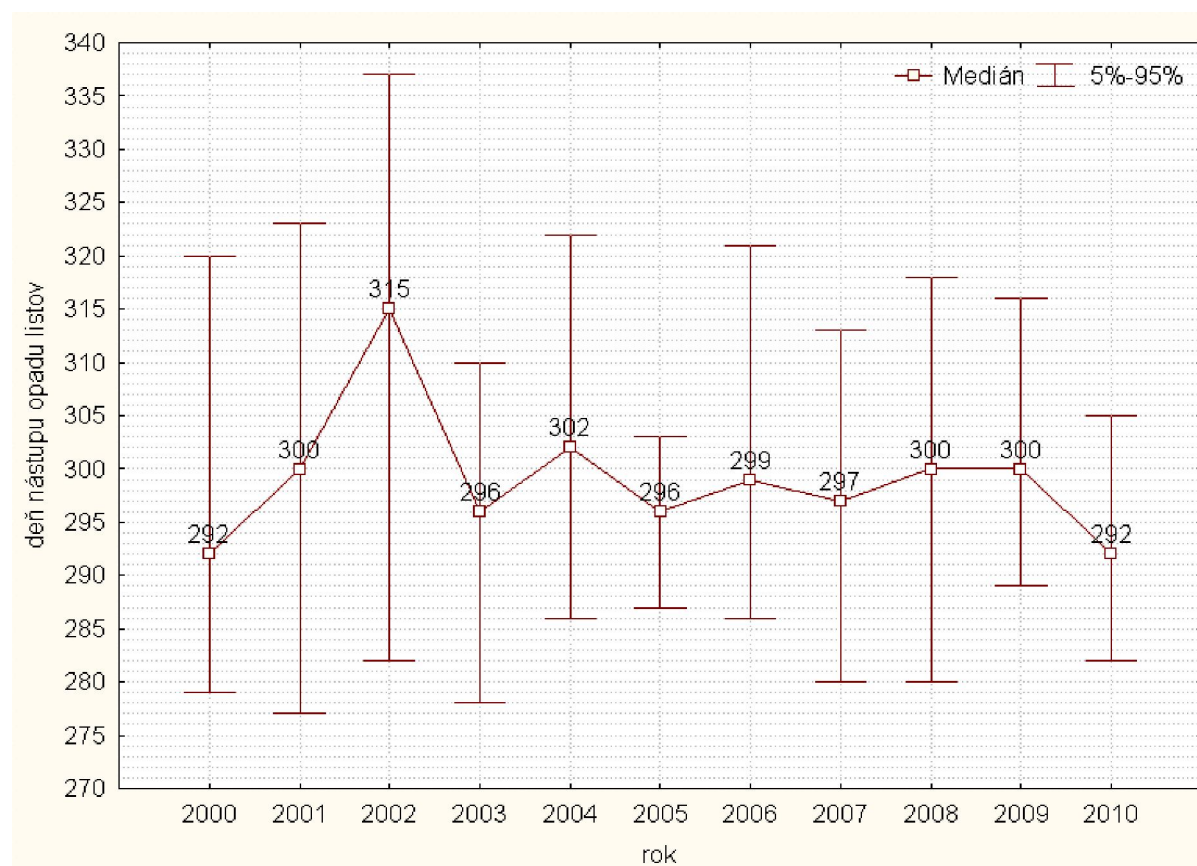
Obr. 2: Funkcionalita Phenological profile umožňujúca modelovanie priebehu fenologickej funkcie, jej 1., 2., 3. derivácie a krivosti. Na osi x je znázornený poradový deň v roku, na osi y hodnota NDVI.

Ukončenie vegetačného obdobia predstavuje fáza začiatku a konca opadu listov. Podľa fenologických pozorovaní bukového porastu na TMP Turová v období 2001–2009 (Priwitzer, 2009) a interpretácií fenologických kriviek zodpovedajúcich danej ploche a danému časovému obdobiu (Brandýsová, 2010) sa minimum prvej derivácie fenologickej funkcie (max. speed) v zostupnej fáze nachádza v období medzi pozorovaným začiatkom

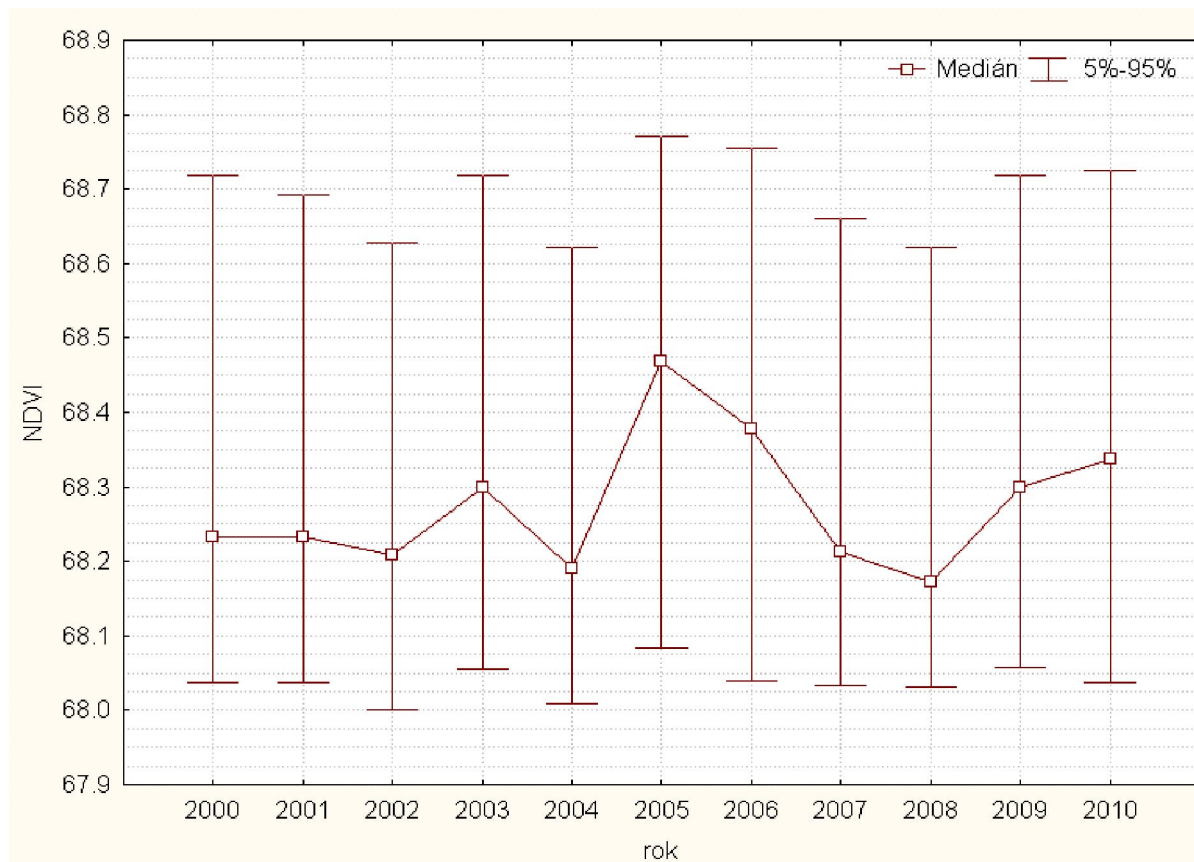
a ukončením opadu listov. Na základe týchto zistení sme deň kedy 1. derivácia dosahuje minimálnu hodnotu označili za modelovaný čas ukončenia vegetačného obdobia (fenofáza opad listov). V tabuľke 1 a v grafoch 2 a 3 sú uvedené stredné hodnoty (medián) dňa dosiahnutia danej fenofázy v skúmanom období 2000–2010 a hodnoty NDVI zodpovedajúce tomuto dňu spolu s 5-95% kvantilom.

Tab. 1: Mediánová hodnota dňa nástupu opadu listov s kvantilom 5-95% a hodnoty NDVI zodpovedajúce tomuto dňu v jednotlivých rokoch.

Rok	Deň nástupu opadu listov		Dĺžka obdobia nástupu fenofázy	Hodnota NDVI – medián
	Medián	Kvantil 5-95%		
2000	292	279–320	41	68.2
2001	300	277–323	46	68.2
2002	315	282–337	55	68.2
2003	296	278–310	32	68.3
2004	302	286–322	36	68.2
2005	296	287–303	16	68.5
2006	299	286–321	35	68.4
2007	297	280–313	33	68.2
2008	300	280–318	38	68.2
2009	300	289–316	27	68.3
2010	292	282–305	23	68.3
priemer	299	282–317	35	68.3



Graf 2: Mediánová hodnota nástupu opadu listov s 5-95% kvantilom.



Graf 3: Mediánová hodnota NDVI zodpovedajúca dňu nástupu opadu listov s 5-95% kvantilom.

Modelovaný mediánový deň nástupu opadu listov bol v skúmaných rokoch zaznamenaný v časovom rozmedzí od 292 do 315 dňa v roku. Celkový priemerný deň nástupu pripadá na 299. deň s priemerným kvantilom 5-95% s rozpätím od 282. do 318. dňa v roku. Zo zistených kvantilových hodnôt vyplýva, že priemerná dĺžka obdobia počas ktorého dochádza k nástupu opadu listov je 35 dní.

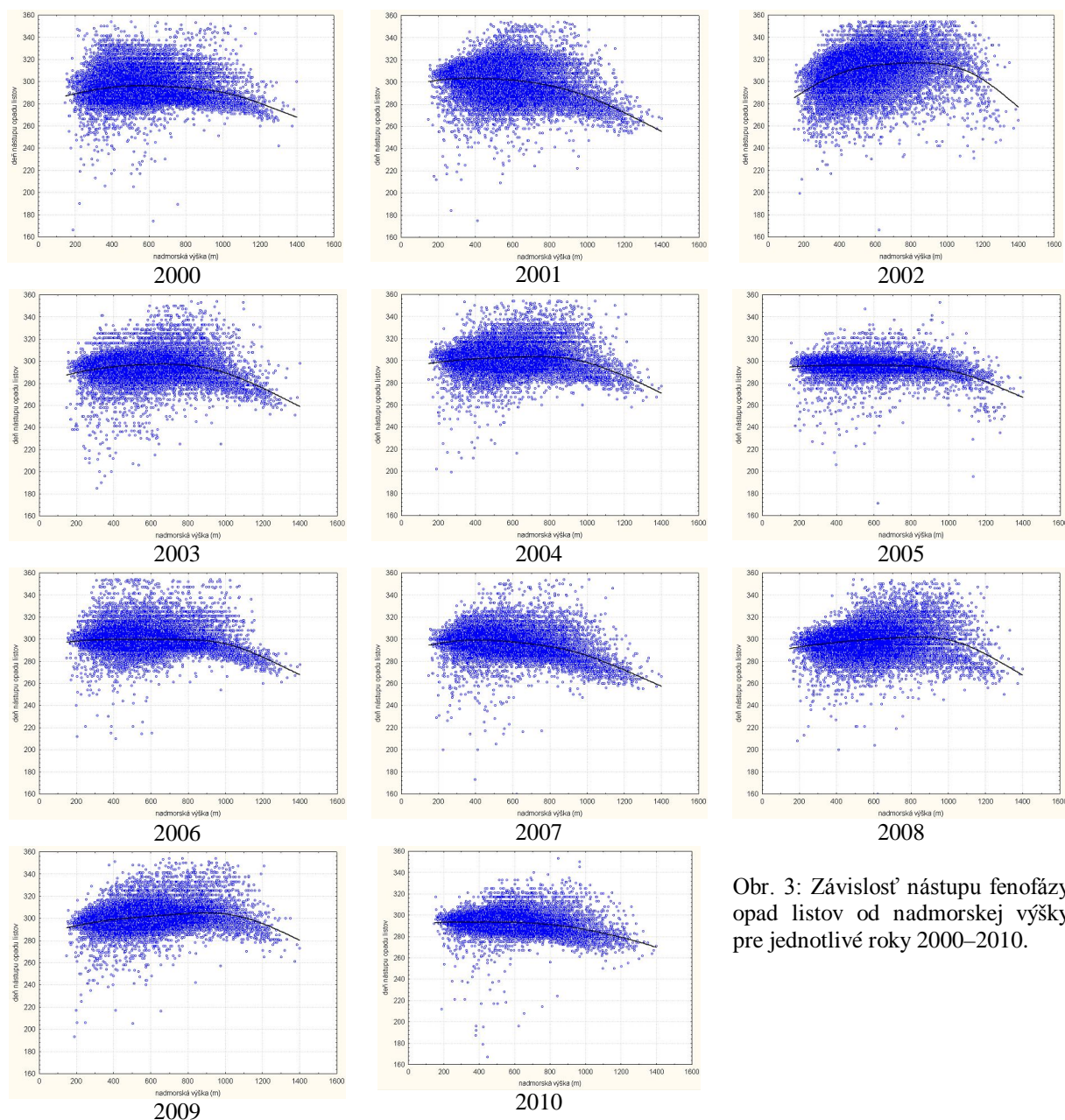
Hodnota vegetačného indexu zodpovedajúca inflexnému bodu v zostupnej fáze fenologickej krivky sa vyznačuje nízkou medziročnou variabilitou a rovnako nízkou variabilitou v rámci roka. Pre modelovaný deň nástupu opadu listov nadobúda NDVI stredné hodnoty (medián) ≈ 0.68 uvedené v tabuľke 1. Mediánová hodnota NDVI je znázornená v grafe 4.

Načasovanie dosiahnutia danej fenologickej fázy vykazuje okrem medziročnej variability aj variabilitu v závislosti od nadmorskej výšky (Obr. 3). Interpretáciou priebehu funkcií na obrázku 3 sme dospeli k predbežným záverom, že najneskôr dochádza k opadu listov v nadmorských výškach od cca 400 do 800 m.n.m., o pár dní skôr nastupuje sledovaná fenofáza v nadmorských výškach do 400 m a od cca 800 do 1000 m, ešte skôr začínajú opadať listy v nadmorských výškach 1000–1200 m a najskôr vo výškach od 1200 do 1400 m.n.m. (deň 267). Za netypický považujeme rok 2002, kedy bol od 600 do 1200 m.n.m. nástup sledovanej fenofázy výrazne neskorší ako v ostatných rokoch.

Predbežné výsledky z okulárneho zhodnotenia nástupu opadu listov v závislosti od nadmorskej výšky v sledovanom období sme overovali pomocou metód matematicko-štatistickej analýzy. Dni nástupu sme zatriedili do skupín podľa nadmorských výšok – úrovní faktora, pričom rozsah skupín sme stanovili na základe grafu 4. Pomocou analýzy variancie sme zisťovali štatistickú významnosť rozdielov priemerov vytvorených skupín, v ktorej nezávislou premennou boli úrovne faktora (skupiny) a závislou premennou boli priemerné hodnoty dňa nástupu opadu listov za roky 2000 až 2010. Pomocou Fisherovho F-testu sme

overovali nulovú hypotézu o rovnosti výberových priemerov. Zistili, že rozptyl hodnôt spôsobený vplyvom faktora A (nadmorská výška): $F_A = 279.7$ je väčší ako rozptyl spôsobený náhodnými vplyvmi $F_{(f_A, IR)} = 3.02$. Preto sme zamietli nulovú hypotézu, že aritmetické priemery na rozličných úrovniach faktora sa rovnajú, t. z. že existuje minimálne jeden štatisticky významný rozdiel medzi výberovými priermi. Tým nastala potreba otestovať štatistickú významnosť vzniknutých rozdielov. Použili sme Duncanov test, ktorého výsledky (Tab. 2) dokázali, že:

- štatisticky významné rozdiely sú medzi úrovňou faktora 1 a všetkými ostatnými úrovňami faktora a rovnako medzi úrovňou faktora 5 a 6 a všetkými ostatnými,
- nevýznamné rozdiely sú medzi úrovňami faktora 2, 3 a 4,
- opad listov začína najneskôr v nadmorských výškach od 400 do 1000 m,
- o niečo skôr (priemerne o 2 dni) nastupuje táto fenofáza vo výškach do 400 m.n.m.
- výraznejšie skôr (priemerne o 9 dní) začína opad listov v nadmorských výškach od 1000 m a najskôr od 1200 m (priemerne o 23 dní skôr ako je to vo výškach od 400 do 1000 m).



Obr. 3: Závislosť nástupu fenofázy opad listov od nadmorskej výšky pre jednotlivé roky 2000–2010.

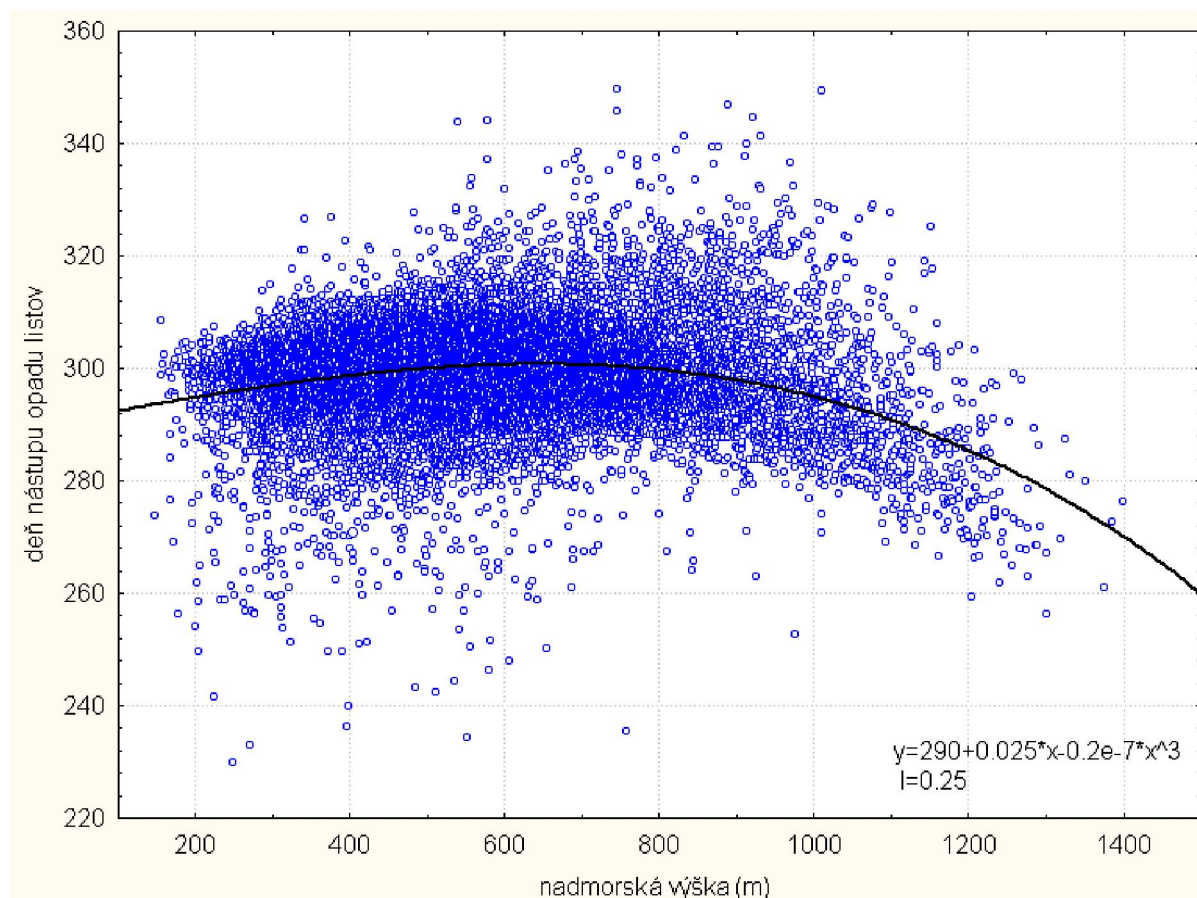
Tab. 2: Duncanov test: test významnosti rozdielov výberových priemerov

Nadmorská výška	Úroveň faktora	Úroveň faktora (výberové priemery dňa nástupu opadu listov)					
		1 (297.84)	2 (299.86)	3 (300.17)	4 (299.83)	5 (291.6)	6 (277.81)
100–400	1		**	**	**	**	**
400–600	2			N	N	**	**
600–800	3				N	**	**
800–1000	4					**	**
1000–1200	5						**
1200–1400	6						

N – štatisticky nevýznamné rozdiely medzi výberovými priermi na jednotlivých úrovniach faktora

** – hladina významnosti $\alpha < 0.01$ – štatisticky veľmi významný rozdiel, menej ako 1% pravdepodobnosť, že zamietnem nulovú hypotézu ak je správna

Na základe výsledkov analýzy variancie sme zistili, že nadmorská výška je štatisticky významným faktorom ovplyvňujúcim nástup opadu listov, a že okulárny odhad nebol dostatočne presný. Odhadnutý skorší nástup opadu listov vo výškach od 800 do 1000 m.n.m. bol nesprávny, pričom v ostatných skupinách nadmorských výšok boli predbežné závery potvrdené.



Graf 4: Priemerný deň nástupu opadu listov za obdobie 2000–2010 v závislosti od nadmorskej výšky. Dni nástupu do 230 a nad 350 boli odfiltrované, pretože ich výskyt je pravdepodobne podmienený nižšou kvalitou snímok, šumom a.i.

Prístup ktorý využívame pri modelovaní priebehu vegetačného obdobia je totožný s tým, ktorý použil vo svojej práci Fisher (2007). Prvou deriváciou sigmoidnej logistickej funkcie identifikoval dva základné fenologické stavy: „onset“ a „offset“ (polovičné maximum zazelenania a starnutia). Podobný prístup zvolil aj Priwitzer (2009), ktorý porovnáva fenologickú krivku (funkcia 2) a jej prvú a druhú deriváciu pre drevinu dub cerový (*Quercus cerris*) na modelovanom území Čifáre s terénnymi pozorovaniami.

Odlíšný prístup zvolil Zhang (2003), ktorý modeluje priebeh vegetačných indexov úsekovou logistickou krivkou. Dátumy nástupu fenologických fáz identifikuje použitím miery zmeny zakrivenia danej krivky. Prostredníctvom jej maximálnych a minimálnych hodnôt odvodzuje štyri hlavné obdobia: (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 odvodenie fenologického modelu používa hodnoty zvýrazneného vegetačného indexu (EVI). Zhang a Goldberg (2010) navrhli na identifikáciu jesenných fenologických udalostí nový postup, ktorý sa odlišuje od identifikácie použitím úsekovej logistickej funkcie. Fenofázu jesenného sfarbovania listov odvodzujú použitím časovo-normalizovaného indexu hnedosti.

Z dôvodu nepriaznivého počasia bol v jesennom období v rokoch 2002 a 2008 obmedzený objem vstupných údajov - satelitných snímok vhodných pre analýzy. Tento fakt mohol spôsobiť, že fenofáza opad listov v roku 2002 mala obzvlášť netypický priebeh v porovnaní s ostatnými analyzovanými rokmi.

Záver

V práci sme prezentovali metódu modelovania priebehu vegetačného obdobia použitím satelitných snímok MODIS. Odvodili sme časové rady vegetačných indexov NDVI z obdobia 2000–2010, ktoré boli následne vyrovnané pomocou sigmoidnej logistickej funkcie v programe Phenological profile. Minimum prvej derivácie tejto funkcie v zostupnej fáze sme identifikovali ako deň, v ktorom dochádza k nástupu opadu listov, resp. k ukončeniu vegetačného obdobia. Deň nástupu opadu listov bol odvodený pre 24969 bukových pixlov na území Slovenska. V analýzach sme sa zaoberali zisťovaním stredných hodnôt (medián) nástupu opadu listov v jednotlivých rokoch a určili sme hodnotu NDVI, ktorá zodpovedá extrému 1. derivácie v zostupnej fáze fenologického cyklu. Ďalej sme určovali vplyv nadmorskej výšky na načasovanie nástupu sledovanej fenofázy. Okulárnym odhadom sme stanovili predbežné výsledky, ktoré sme overovali použitím analýzy variancie.

V ďalšej práci budeme rozširovať bázu tak satelitných údajov ako aj validačných, overíme použitý model pre ďalšie druhy drevín a určíme vzťah medzi klimatickými charakteristikami a NDVI. Okrem toho plánujeme odvodiť trendy v začiatku, ukončení a dĺžke trvania vegetačného obdobia.

PodĎakovanie

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, projektu VEGA MŠ SR No. 1/0642/10 a projektu "Centrum excelentnosti: Integrovaný manažment povodí v meniacich sa podmienkach prostredia", na základe podpory OP Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 26220120062.

Literatúra

BRANDÝSOVÁ, V. 2010. *Odvodenie vegetačného indexu lesných ekosystémov zo satelitných údajov MODIS*. Diplomová práca, Lesnícka fakulta TU Zvolen, LF-5775-3169, 75 s.

- BUCHA A KOL. In press. Využitie vegetačného indexu NDVI odvodeného z MODISu pri fenologických pozorovaniach lesných porastov.
- BUCHA T. 1999. Classification of tree species composition in Slovakia from satellite images as a part of monitoring forest ecosystems biodiversity. In *Acta Instituti Forestalis Zvolen*, LVÚ Zvolen, Tomus 9, s. 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, T., Pavlendová, H., Eds.: *Dial'kový prieskum Zeme – lesy v meniacich sa prírodných podmienkach*. Vedecký seminár. Zvolen : NLC – LVÚ, ISBN 978–80–8093–098–1, s. 35–50.
- FISHER, J. I. – MUSTARD J. F. 2007. Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat and MODIS data. In *Remote Sensing of Environment*. 2007, 109, s. 261–273.
- FISHER, J. I. – MUSTARD, J. F. – VADEBONCOEUR, M. A. 2006. Green leaf phenology at Landsat resolution: Scaling from the field to the satellite. In *Remote Sensing of Environment*. 2006, 100, s. 265–279.
- HEUMANN, B. W – SEAQUIST, J. W. – EKLUNDH, L. – JÖNSSON, P. 2007. AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982–2005. In *Remote Sensing of Environment*, 108, s. 385–392.
- JUSTICE, C. O. – TOWNSHEND, 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. In *Remote Sensing of Environment*, 83, 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. In *Remote Sensing of Environment*, 86, s. 232–242.
- KOLEKTÍV AUTOROV. 1993. *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Praha : Ministerstvo životného prostredia ČR, 594 s.
- LARCHER, W. 1998. *Fyziologická ekológia rastlín*. Praha : Academia, 368 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. In *International Journal of Remote Sensing*, 23, 12, s. 2505–2512.
- PIAO, S. L. – FANG, J. Y. – ZHOU, L. M. – CIAIS, P. – ZHU, B. 2006. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. In *Global Change Biology*, 12, 4, s. 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.: *Dial'kový prieskum Zeme – lesy v meniacich sa prírodných podmienkach*. Vedecký seminár. Zvolen : NLC – LVÚ, ISBN 978–80–8093–098–1, s. 51–64.
- PRIWITZER, T. 2009. Fenologické fázy lesných drevín sledované na TMP Turová v rokoch 2001 – 2009. In Pavlenda Ed.: *Monitoring lesov Slovenska*. Zvolen : NLC-LVÚ, 113 s.
- 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, s. 3303–3330.
- ŠKVARENINOVÁ, J. A KOL. 2009. *Fenológia rastlín v meniacich sa podmienkach prostredia*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2009, 103 s.
- WANG, Q. – TENHUNEN, J. – DINH, N.Q. – REICHSTEIN, M. – VESALA, T. – KERONEN, P. 2004. Similarities in ground- and satellite-based NDVI time series and their relationship to physiological activity of Scots pine forest in Finland. In *Remote Sensing of Environment*, 93, s. 225–237

- ZHANG, X. – FRIEDL, H. A. – SCHAAF, B. S. – STRAHLER A. H. – HODGES, J. C. F. – GAO, F. – REED, B. C. – HUETE A. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. In *Remote Sensing of Environment*, 84, s. 471–475.
- ZHANG, X. – GOLDBERG, M. D. 2010. Monitoring fall foliage coloration Dynamics using time-series satellite data. In *Remote Sensing of Environment*, Article in press
- 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. In *Journal of Geophysical Research*, 106, D17, s. 20069–20083.

Kontaktná adresa 1. autora:

Ing. Veronika Brandýsová, Katedra prírodného prostredia, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, ul. T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen,
veronika.brandysova@gmail.com