

## PREDBEŽNÉ HODNOTENIE POŠKODENIA VEGETÁCIE POMOCOU POUŽITIA SATELITNÝCH SNÍMOK LANDSAT V O.O. JAVORINA

Mária HAVAŠOVÁ<sup>1</sup>, Libor BURIAN<sup>2</sup>, Rastislav JAKUŠ<sup>1</sup>, Ján FERENČÍK<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ústav ekológie lesa, Slovenská Akadémia Vied, Ľudovíta Štúra 2, 960 53 Zvolen, Slovenská republika,  
*maria.havasova@gmail.com, rasti.jakus@gmail.com*

<sup>2</sup> Katedra fyzickej geografie a geoekológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského, Mlynská dolina,  
842 15 Bratislava 4, Slovenská republika, *libor.burian@gmail.com*

<sup>3</sup> Výskumná stanica a Múzeum ŠL TANAP-u, 059 60 Tatranská Lomnica, Slovenská republika,  
*jferencik@lesytanap.sk*

### Abstrakt

Cieľom štúdie je porovnať vhodnosť použitia satelitných snímok Landsat a z nich odvodených vegetačných indexov NDVI, NDMI a VCI na detekciu poškodenia vegetácie pôsobením lykožrúta smrekového (2006-2011) za použitia referenčných derivátov leteckých snímok (2006-2011). Ako najvhodnejší bol preukázaný index NDMI na hranici priemer mínus 1,75-násobok štandardnej odchýlky ( $R^2 = 0.39$ ). ANOVA preukázala signifikantne významné rozdiely ( $p < 0,001$ ) medzi hodnotami VI pre faktory les a poškodená vegetácia. Celkovo Landsat zachycuje viac ako 45% poškodenej vegetácie stanovenej derivátmi leteckých snímok.

**Kľúčové slová:** vegetačné indexy, lesné disturbancie, *Ips typographus*, Landsat

### Abstract

The aim of the study is to compare the possibilities of utilisation the vegetation indices NDVI, NDMI and VCI for identify disturbed vegetation by influence of spruce bark beetle via Landsat imagery (2006-2011) by using aerial images derivates (2006-2011). The most suitable is NDMI on the level mean – 1.75 multiplication of standard deviation ( $R^2 = 0.39$ ). ANOVA has showed significant differences ( $p < 0,001$ ) between VI values for two factors: Forest and Disturbed vegetation. Finally, the Landsat imagery could identify more than 45% of disturbed vegetation, determined by derivates of aerial photos.

**Keywords:** vegetation indices, forest disturbances, *Ips typographus*, Landsat

### 1 ÚVOD

Lykožrút smrekový (*Ips typographus*) je považovaný za najväčšieho škodcu v našich smrečínach.[1] Približne od roku 2007 môžeme na území Vysokých Tatier hovoriť o rozsiahlej podkôrníkovej kalamite, ktorá sa svojim rozsahom (7000 ha) približuje vetrovej kalamite z roku 2004 (12 500 ha) [2] Ochranný obvod Javorina s rozlohou cca 3500 ha sa nachádza v severovýchodnej časti Vysokých Tatier. V poslednom období aj v tejto časti dochádza k masívnemu premnoženiu podkôrneho hmyzu, a nakoľko je oblasť zaradená do 4. a 5. stupňa ochrany nie je možné v nej vykonávať hospodárske opatrenia. Pre monitorovanie populácie lykožrúta smrekového sa v súčasnosti popri metódach pozemného zisťovania využívajú letecké infračervené snímky [3][4] (daná oblasť od roku 2006), ktoré je považované za presnú no pomerne nákladnú metódu. Preto je potrebné venovať pozornosť ďalším metódam diaľkového prieskumu Zeme a to hlavne satelitnému snímkovaniu[5][6]. Satelity Landsat boli prvý krát vypustené na orbit v roku 1972 a odvtedy snímajú zemský povrch s frekvenciou 1 krát za 16 dní v multispektrálnych kanáloch, s rozlíšením 30 x 30 m (kanály 1-5 a 7), snímajú rozlohu cca 185 x 185 km<sup>1</sup> Snímky sú voľne dostupné na NASA <http://glovis.usgs.gov/> [7]. Práve pomocou diaľkového pozorovania Zeme a použitím rôznych typov vegetačných indexov je možné zmierniť topografický efekt, odrazivosť pôdy, zmeny odraznosti vplyvom slnečných lúčov a atmosféry [8]. Zároveň je pomerom rôznych typov spektrálnych kanálov možné detekovať predvídať zmeny vegetácie [9]. Priestorová distribúcia(pattern) lykožrúta smrekového závisí hlavne od gradačnej fázy, množstva dopadajúceho žiarenie [10] a samotného vzniku ohnísk [11] V práci sa chceme venovať možnosti využitia satelitných snímok Landsat na monitorovanie poškodenia vegetácie, pričom za hlavnú príčinu poškodenia je považovaný lykožrút smrekový. Ako referenčné dáta sú využité deriváty leteckých snímok, polygónovo označujúce výskyt suchárov [2].

---

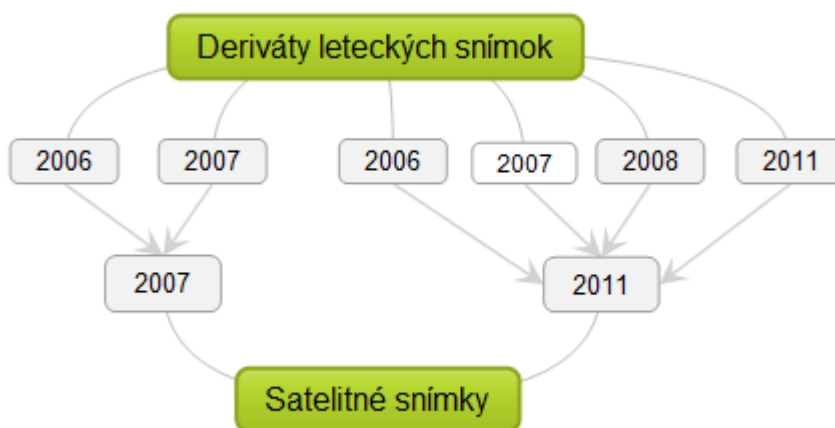
<sup>1</sup> <http://glcf.umd.edu/data/landsat/>

2 METODIKA

Práce je koncepčne rozdelená do dvoch častí. V prvej časti (Kapitola 2.1) sa venujeme výpočtu a porovnaniu vhodnosti vegetačných indexov (ďalej „VI“) klasifikovaných na viacerých úrovniach štandardnej odchýlky (ďalej „SD“) pre detekciu poškodenia vegetácie, v druhej časti (Kapitola 2.2) aplikujeme tento najvhodnejší index na vybranej úrovni SD na stanovené satelitné snímky a hodnotíme počet správne určených pixlov opäť porovnaním k referenčnej leteckej snímke. Všetky dáta boli extrahované pomocou masky lesa, ktorá pokrýva lesné porasty so zastúpením smreka vyšším ako 50%, tj. nasledovné charakteristiky boli spracované len pre takto vyznačené územie v O.o. Javorina.

2.1 Výpočet vegetačných indexov a klasifikácia na základe viacerých úrovní štandardnej odchýlky

V prvej časti práce boli použité deriváty leteckých snímok (ďalej označené ako „deriváty“) a satelitné snímky Landsat (Obrázok 1) pričom deriváty sú považované za referenčné dáta. O.o. Javorina je letecky kompletne zosnímkovaný iba za roky 2007 a 2011, roky 2006 a 2008 nie sú kompletne (pokrývajú iba dolinu Zadné Meďodoly a Javorovú dolinu), napriek tomu sme ich priradili k plošnému poškodeniu vegetácie pomocou derivátov a následnému porovnaniu so satelitnými snímkami (ďalej označené ako „snímky“).

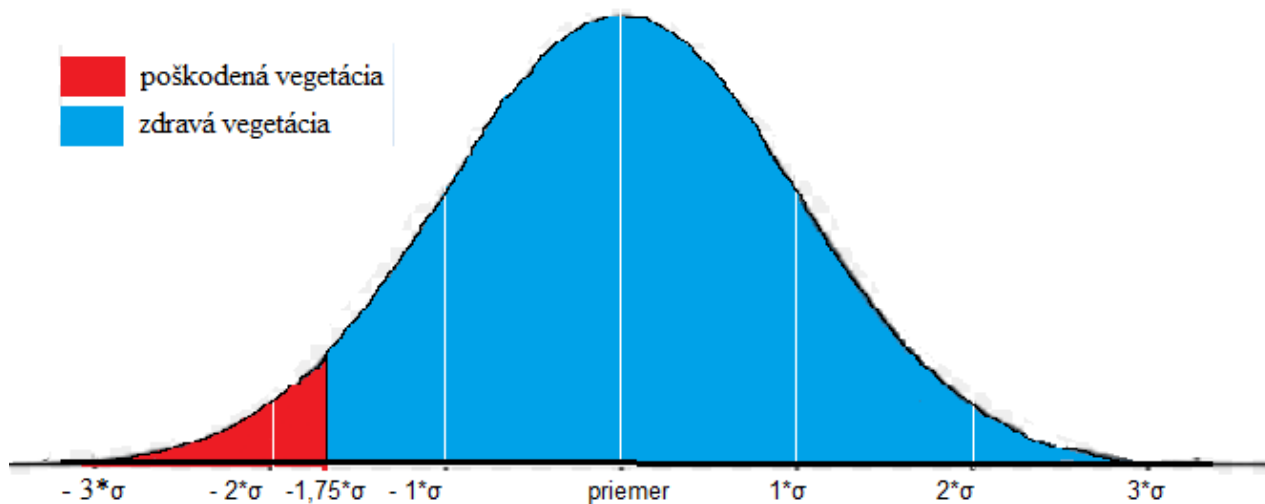


Obrázok 1 Použité dáta v prvej časti štúdie. deriváty leteckých snímok (2006, 2007, 2008 a 2011) boli použité ako referenčné dáta pre hodnotenie presnosti detekcie poškodenie vegetácie pomocou VI cez satelitné snímky (2007 a 2011). Šípky označujú náväznosť derivátov k snímkam Landsat v daných rokoch

Zo snímok Landsat TM sme extrahovali kanály 3,4,5 a 7 potrebné pre výpočet vybraných typov vegetačných indexov vhodných pre detekciu poškodenia vegetácie. Predpokladáme, že detekované poškodenie vegetácie je viazané na aktivitu lykožrúta smrekového (*Ips typographus*). Spracovaním spektrálnych kanálov (band) sme vypočítali tri typy vegetačných indexov vhodných pre detekciu lesných disturbancií a to NDVI (Normalised Difference Vegetation Index)[12], [13], NDMI (Normalised Difference Moisture Index) [7] a VCI (Vegetation Condition Index) [14] ( Tabuľka 1). Následne sme vyrátali hodnoty priemeru a smerodajnej odchýlky SD pre každý rok a každý typ vegetačného indexu. Pomocou stanovenia prahu na úrovni 1,15, 1,75, 2, 2,25, 2,5, 2,75 a 3-násobku SD odrátanej od hodnoty priemeru sme reklasifikovali získané hodnoty vegetačných indexov do binárnej sústavy (1 = poškodená vegetácia, 0 = zdravá vegetácia, Obrázok 2). Takto reklasifikované snímky sme pomocou Phi korelácie porovnávali s derivátmi leteckých snímok, ktoré boli konvertované do rastrov s rovnakým rozlíšením ako snímky Landsat, a takisto prevedené do binárnej sústavy.

Tabuľka 1 Použité typy vegetačných indexov (VI), spôsob ich výpočtu a referencia. Band = kanál

| Vegetačný index | Výpočet   | Referencia                   |
|-----------------|---|------------------------------|
| NDVI            | $(\text{Band}4 - \text{Band}3) / (\text{Band}4 + \text{Band}3)$ | [12]Rouse et al. 1974        |
| NDMI            | $(\text{Band}4 - \text{Band}5) / (\text{Band}4 + \text{Band}5)$ | [15]Jin & Sader 2005         |
| VCI             | $(\text{Band}7) / (\text{Band}4)$                               | [14]Jakubauskas & Price 1997 |

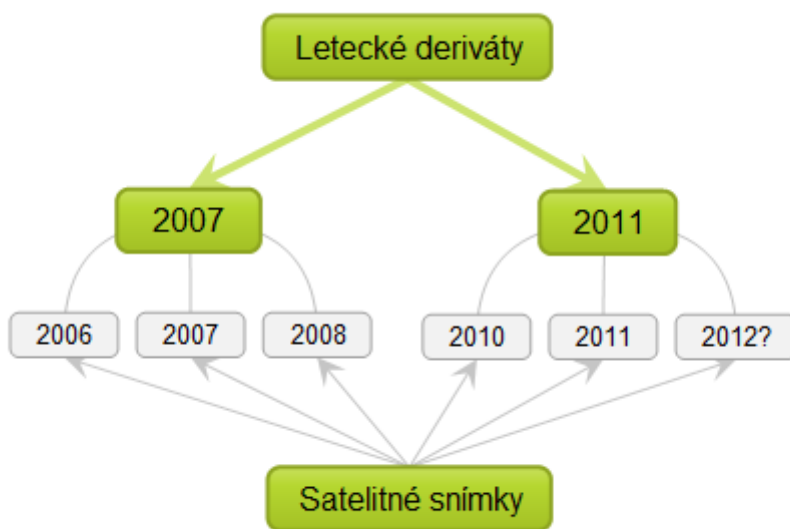


Obrázok 2 Modelový histogram rozdelenia hodnôt vypočítaných vegetačných indexov. Klasifikácia prebehla na základe rôznych násobkov (úrovní) štandardnej odchýlky  $\sigma$  odrátanej od hodnoty priemeru. Červená farba = poškodená vegetácia, modrá farba = zdravá vegetácia

Najvyššia korelácia medzi derivátom leteckej snímky a reklasifikovanou snímku Landsat stanovila najvhodnejší index ako aj úroveň štandardnej odchýlky pre detekciu poškodenej vegetácie. Rozdiely v hodnotách vegetačných indexov boli následne zisťované aj pomocou analýzy variancie, pričom faktory boli určené pomocou leteckých snímok (1 = poškodená vegetácia, 0= zdravá vegetácia).

### 2.2 Aplikácia najvhodnejšieho vegetačného indexu a porovnanie s referenčnými leteckými snímkami

Najvhodnejší index, ako aj úroveň SD boli následne aplikované na satelitné snímky z rokov 2006, 2007 a 2008 pre referenčný derivát z roku 2007 a snímky Landsat z rokov 2010 a 2011 pre referenčný derivát z roku 2011 (Obrázok 3). Sumy pixlov za daný rok označujúce poškodenú vegetáciu použitím VI boli podielovo vzťahnuté k sume pixlov určených pomocou leteckých snímok. Výpočty indexov boli spracované v nástroji Raster Calculator v programe ArcGIS 10.1. a štatisticky vyhodnotené v programe R.



Obrázok 3 Použité reklasifikované satelitné snímky a ich porovnanie k referenčným dátam (letecké deriváty). Rok 2012 kvôli nedostupnosti dát ešte nie je hodnotený

### 3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

#### 3.1 Klasifikácia vegetačných indexov a analýza pomocou Phi korelácie

Na základe Phi korelácie medzi tromi typmi vegetačných indexov na viacerých úrovniach SD a referenčnými leteckými derivátmi môžeme povedať, že pre detekciu poškodenej vegetácie sa na území O.o. Javorina javí najvhodnejší vegetačný index NDMI (Normalised Difference Moisture Index) na úrovni 1,75- resp. 1,5-násobku SD pre obidva referenčné roky (**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**). Úroveň korelácie je však pomerne slabá, na úrovni 0,22 (2007) resp. 0,39 (2011). Táto nižšia korelácia je zapríčinená existenciou veľkého množstva ďalších pôsobiacich faktorov vplývajúcich na odrazové charakteristiky porastu, ktoré neboli zahrnuté do tejto štúdie.

Tabuľka 2 Výsledky Phi korelácie pre reklasifikované vegetačné indexy na jednotlivých úrovniach SD pre roky 2007 a 2011, zvýraznené sú najvyššie hodnoty korelácií

|      | ndmi<br>2 | ndmi<br>15  | ndmi<br>25 | ndmi<br>175 | ndmi<br>225 | ndvi<br>2 | ndvi<br>15 | ndmi<br>25 | ndvi<br>175 | ndvi<br>225 | vci<br>15 | vci<br>175 |
|------|-----------|-------------|------------|-------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|-------------|-----------|------------|
| 2007 | 0.2       | <b>0.22</b> | 0.16       | <b>0.22</b> | 0.18        | 0.02      | 0.03       | 0.03       | 0.03        | 0.03        | -0        | -0.02      |
| 2011 | 0.36      | 0.4         | 0.25       | <b>0.39</b> | 0.31        | NA        | 0.15       | 0.13       | 0.06        | 0.09        | -0        | -0.01      |

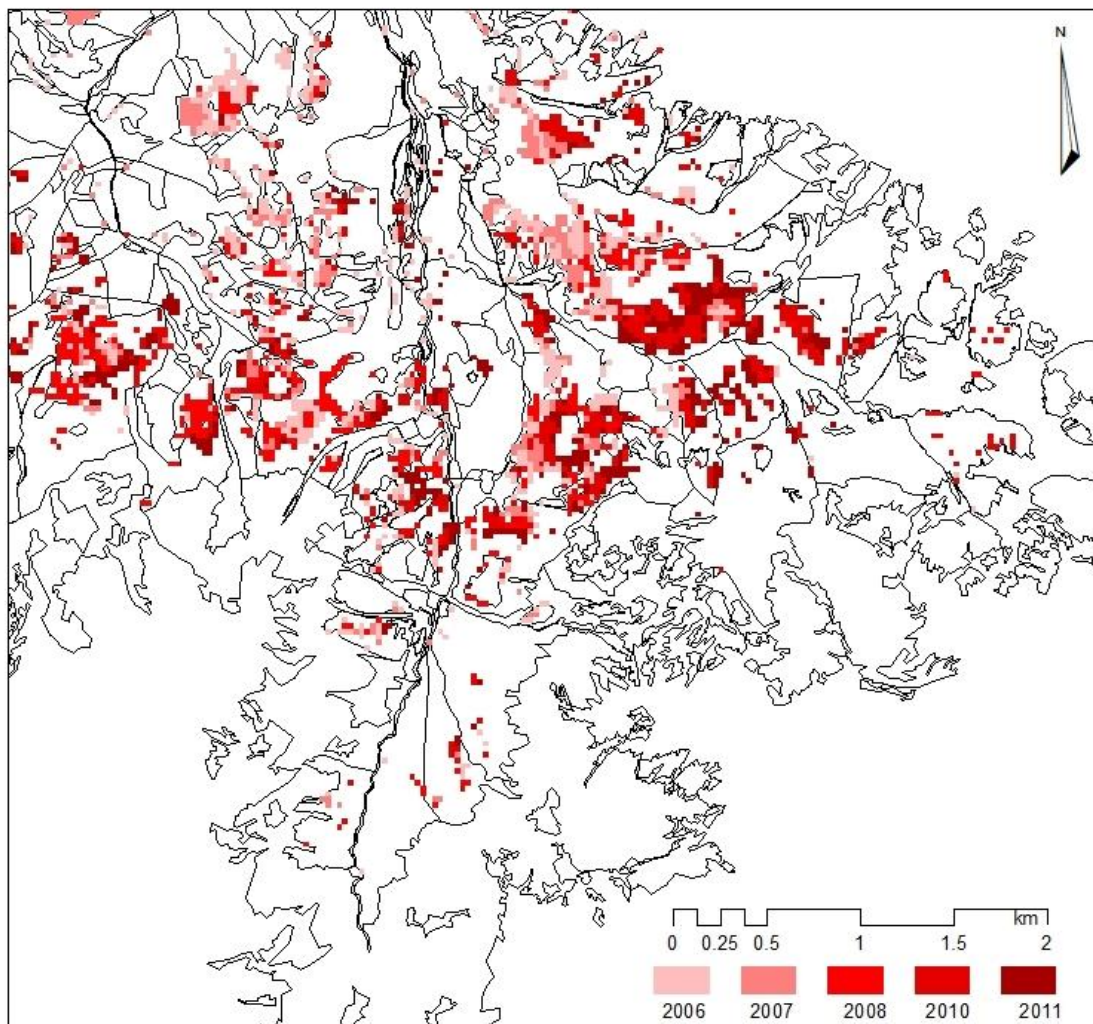
Výsledky analýzy variancie ANOVA (Tabuľka 3) potvrdili vhodnosť všetkých zvolených vegetačných indexov pre detekciu prítomnosti poškodenia vegetácie pomocou použitia satelitných snímok Landsat na úrovni  $p < 0,001$ . Vyššia sila testu je preukázaná pre rok 2007 a nie pre rok 2011, hoci tento zaznamenáva väčšie plochy poškodenej vegetácie. Ako najvhodnejší na základe analýzy variancie sa javí index VCI ktorý vysvetľuje najväčšie množstvo variability dát (68% v roku 2007), pri použití tohto indexu bude však potrebné zvoliť iný spôsob klasifikácie, ako je použitá klasifikácia, nakoľko táto dosahuje veľmi nízku koreláciu s leteckými snímkami (-0,02). Celkovo dosahujú všetky použité typy vegetačných indexov vyššie vysvetlenie variability v roku 2007, hoci v tomto roku zaberá poškodenie vegetácie nižšiu rozlohu (cca 80 ha) ako je tomu v roku 2011 (cca 262 ha). Príčinou môže byť vyššia priepustnosť atmosféry pri snímkovaní v roku 2007, lepšie zachytenie detailov na danej snímke, nižší vplyv rušivých faktorov. Nižšiu silu testu pre rok 2011 vysvetľujeme aj pomerne vysokým nadhodnocovaním dát klasifikovaných ako poškodená vegetácia, ktorá je však viazaná buď na novovzniknuté holiny alebo na vyššiu reflektanciu pôdy na úrovni hornej hranice lesa. Nevysvetlené množstvo variability je spôsobené vplyvom veľkého množstva faktorov, ktorým sme sa v pilotnej štúdií nevenovali, no budú predmetom štúdia v ďalšej práci. Vzniknutým problémom sa chceme ďalej venovať využitím tzv. time series analysis a ďalších metódik využiteľných pri transformácii dát zo satelitných snímok ako je Tasseled Cap koncept [16]].

Tabuľka 3 Štatistická významnosť (p value) analýzy variancie pre jednotlivé vegetačné indexy pre roky 2007 (07) a 2011 (11) a zároveň sila modelu ( $r^2$ ) vysvetľujúca množstvo variability dát

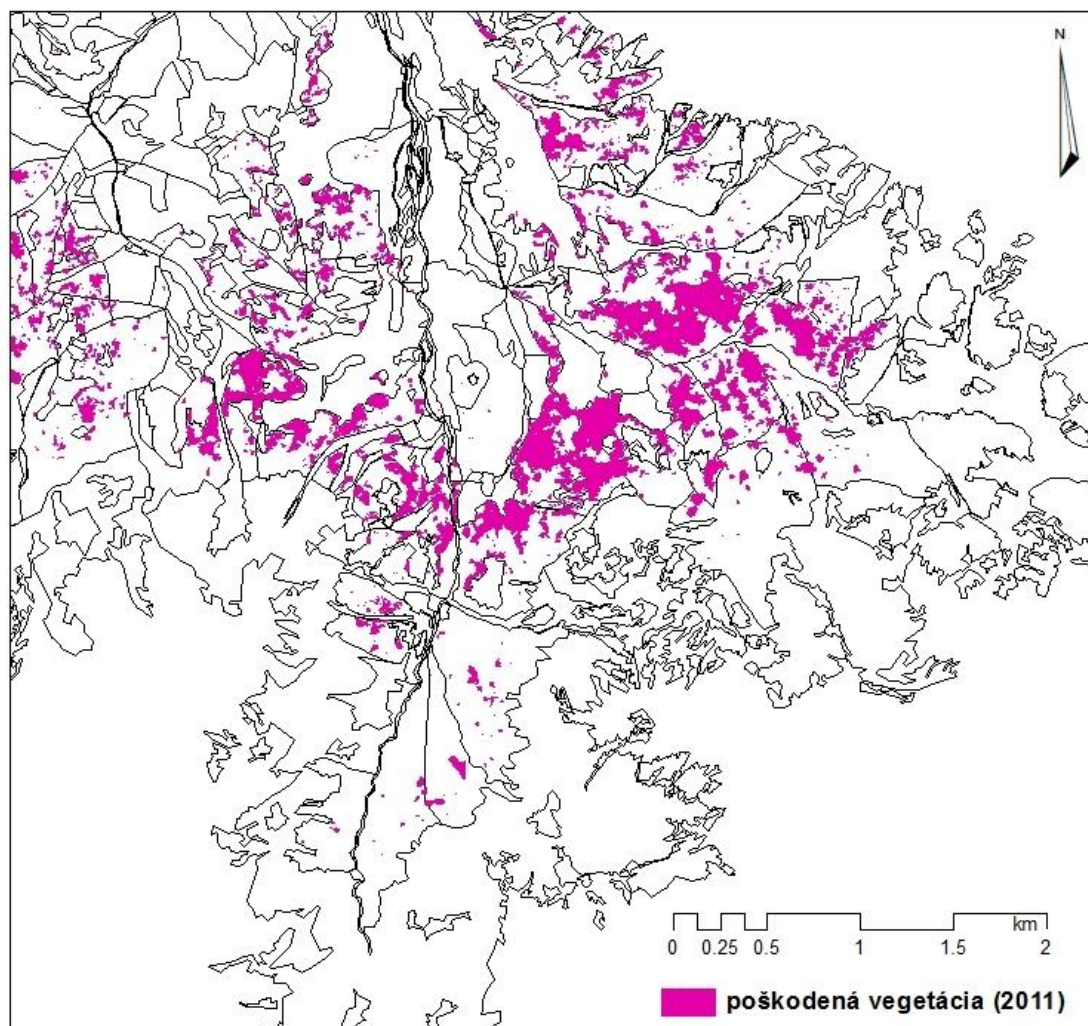
|         | vci11 | vci07       | ndvi11 | ndvi07 | ndmi11 | ndmi07 |
|---------|-------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| p-value | ***   | ***         | ***    | ***    | ***    | ***    |
| $R^2$   | 0.21  | <b>0.68</b> | 0.05   | 0.46   | 0.19   | 0.48   |

3.2 Porovnanie najvhodnejšieho indexu s referenčnými leteckými derivátmi

Napriek nižšej korelácii medzi referenčnými leteckými derivátmi a reklasifikovanými satelitnými snímkami vizuálnym porovnávaním pozorujeme pomerne vysokú zhodu medzi lokalitami poškodenej vegetácie determinovanú reklasifikáciou satelitných snímok (Obrázok 4) a derivátov leteckých snímok (Obrázok 5). Metodika porovnávania lokalizácie jednotlivých pixlov vyžaduje vysokú presnosť, ktorá môže byť ovplyvnená ďalšími faktormi ako je výška snímkovania Landsat, uhol dopadu slnečných lúčov, tieň na severne orientovaných dolinách, ako je aj O.o. Javorina.



Obrázok 4 Lokalizácia poškodenej vegetácie podľa NDMI (pomocou satelitných snímok Landsat) pri použití NDMI na úrovni priemer - 1,75 násobku SD za roky 2006, 2007, 2008 a 2010 a 2011



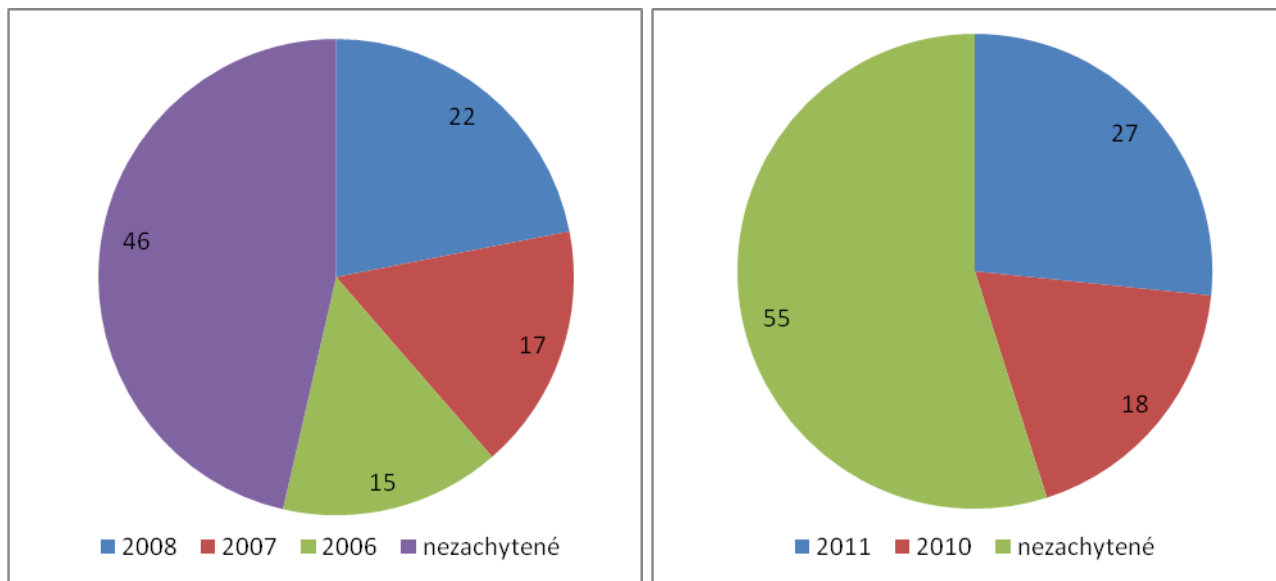
Obrázok 5 Lokalizácia poškodenej vegetácie podľa derivátov leteckých snímok za rok 2011. Dáta boli použité ako referenčné k satelitným snímkam Landsat

Vypracované grafy hodnotia podiel správne klasifikovaných pixlov (1 = poškodená vegetácia, Obrázok 6) stanovených pomocou nami zvoleného najvhodnejšieho vegetačného indexu (na úrovni SD) z celkového počtu pixlov poškodenej vegetácie stanoveného pomocou derivátov. Z počtu pixelov stanoveného derivátom za rok 2007 prislúcha sa podarilo presne určiť 15% z roku 2006 a 17% z roku 2007. Zároveň predpokladáme, že detekcia pomocou satelitných snímačov zachycuje aj predvизuálne zmeny vegetácie, preto sme sa klasifikovali aj rok 2008, ktorý preukázal 22% zhodu určených pixlov. Nezachytených ostalo v roku 2007 46% pixelov, čo odráža zistenú nižšiu koreláciu medzi leteckými a satelitnými snímkami. Satelitné snímky nezachycujú až 55% pixlov v roku 2010, čo je spôsobené jednak nezaradením roku 2012 do klasifikácie, nakoľko nie je momentálne dostupný. Rok 2011 je však zachytený celkom 27%, rok 2010 18%, teda celkom satelity zachytili 45% poškodenej vegetácie.

Vplyv na nezachytenie poškodenej vegetácie pomocou senzorov Landsat to môže mať viacero príčin ako je vznik snímky či už leteckej alebo satelitnej v priebehu roka, zachytávajúcej aktuálny stav vegetácie (pred, počas alebo po vegetačnom období), čo nemusí priamo odrážať sledované poškodenie (v našom prípade pôsobením lykožrúta). Napriek použitiu masky lesa sme sa nevyhli klasifikovaniu holín do kategórie poškodená vegetácia, hoci letecké snímky na v tejto kategórii neboli zaradené. Vznik holín však môžeme priradiť náhodnej ťažbe v ochrannom pásme O.o. Javorina spôsobenej práve spracovaním ohnísk lykožrúta. Na určitú nepresnosť mohla mať vplyv aj orientácia dolín na sever, čo spôsobuje vznik tieňov a teda skreslenie dát. Rovnako, hoci sme pre potreby našej štúdie považovali deriváty leteckých snímok za tzv. pravdivé, pri interpretácii rovnakého súboru dát dochádza k rôznej interpretácii skutočnosti [4].

Vizuálne sme potvrdili trend lepšej detekcie poškodenej vegetácie pomocou satelitných snímačov Landsat pri rastúcich plochách poškodenia – t.j. lepšia detekovateľnosť pri snímke z roku 2011 (kombinácia leteckých snímok z rokov 2006, 2007, 2008 a 2011 a teda nárast plochy poškodenie) ako pri snímke z roku 2007 (letecké snímky z roku 2006 a 2007) čo odpovedá nižšiemu rozlíšeniu snímača, vhodnejšiemu pre detekciu

väčších plôch poškodenia vegetácie [17]. Zároveň treba spomenúť, že pri rozlíšení Landsat-u 30 x 30 m nebolo možné v dostatočnej miere zachytiť poškodenie jednotlivých stromov, iba ich skupiniek, čo rovnako mohlo spôsobiť skreslenie dát.



Obrázok 6 Podiel prírastku poškodenej vegetácie určenej pomocou NDMI ( $1,75 \cdot SD$ ) za daný rok z celkového počtu pixlov určených ako správne na základe derivátov v rokoch 2007 (vľavo) a 2011 (vpravo). Číslo = percentuálny podiel zachytenej poškodenej vegetácie, nezachytené = podiel pixlov nezachytených satelitom, iba derivátmi leteckých snímok

#### 4 ZÁVER

Voľne dostupné satelitné snímky Landsat majú veľký potenciál pre potreby lesníckej praxe ako i pre monitoring poškodenej vegetácie a lesných disturbancií v chránených územiach. V modelovom území O.o. Javorina sa nám podarilo identifikovať viac ako 45% poškodenej vegetácie stanovenej pomocou derivátov leteckých snímok. Presnosť vypracovanej metodiky budeme ďalej zlepšovať použitím rozsiahlejšieho časového radu snímok. Ako najvhodnejší index pre stanovenie poškodenia vegetácie sa pomocou Phi korelácie preukázal index NDMI na hranici priemer – 1,75-násobok štandardnej odchýlky. Analýza variancie potvrdila vhodnosť použitia vybraných vegetačných indexov pre detekciu poškodenia vegetácie.

#### POĎAKOVANIE

Táto štúdia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Prognosticko-informačné systémy pre zvýšenie efektívnosti manažmentu, ITMS: 26220220109, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

## 5 BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Zúbrik and A. Kunca, *Hmyz a huby našich lesov. Atlas škôd na drevinách spôsobených hmyzími a hubovými škodlivými činiteľmi*. Zvolen: Národné lesnícke centrum, 2011, p. 200.
- [2] J. Ferenčík, "Dynamika šírenia podkôrníkovitých a vybraných druhov hmyzu v tatrách," in *Aktuálne problémy v ochrane lesa 2012*, A. Kunca, Ed. Tatranská Lomnica: , 2012, pp. 86–91.
- [3] C. Nikolov, "Časovo-priestorová klasifikácia šírenia lykozrúta smrekového po rozsiahlej vetrovej kalamite vo Vysokých Tatrách," Technická univerzita vo Zvolene, 2012.
- [4] J. W. E. Harris, A. F. Dawson, and R. G. Brown, "Evaluation of mountain pine beetle damage using aerial photography," 1980.
- [5] B. Konôpka, Ed., *Výskum smrečín destabilizovaných škodlivými činiteľmi*. Zvolen: Národné lesnícke centrum, 2010, p. 354.
- [6] T. Bucha and H. Pavlendová, "DIALKOVÝ PRIESKUM ZEME – LESY V MENIACICH SA PRÍRODNÝCH PODMIENKACH Zborník príspevkov z vedeckého seminára," 2009.
- [7] M. E. Newcomer, J. E. Bird, S. M. Sabatine, G. C. Sady, T. A. Wheeler, and A. M. Stalzer, "Utilising NASA satellite missions to identify Bark Beetle Infestation in Sequoia National Park," in *ASPRS 2010 Annual Conference*, 2010, no. 2008, p. 11.
- [8] J. G. Lyon, D. Yuan, R. S. Lunetta, and C. D. Elvidge, "A Change Detection Experiment Using Vegetation Indices," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 64, no. 2, pp. 143–150, 1998.
- [9] M. A. Wulder, C. C. Dymond, J. C. White, D. G. Leckie, and A. L. Carroll, "Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities," *Forest Ecology and Management*, vol. 221, no. 1–3, pp. 27–41, Jan. 2006.
- [10] P. Mezei, R. Jakuš, M. Blaženec, S. Belánová, and J. Šmídt, "The relationship between potential solar radiation and spruce bark beetle catches in pheromone traps," vol. 55, no. 2, 2012.
- [11] R. Jakuš, W. Grodzki, M. Ježík, and M. Jachym, "Definition of Spatial Patterns of Bark Beetle *Ips typographus* ( L . ) Outbreak Spreading in Tatra Mountains ( Central Europe ), Using GIS," in *Ecology, Survey and Management of Forest Insect*, 2002, pp. 25–32.
- [12] J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering, and J. C. Harlan, "Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation," *Security*, no. September 1972, p. 371, 1974.
- [13] L. Filchev, "An Assessment of European Spruce Bark Beetle Infestation using WorldView-2 Satellite Data," in *Best practices: Application of GIS technologies for conservation of natural nad cultural heritage sites*, 2012, pp. 9–16.
- [14] M. E. Jakubauskas and K. P. Price, "Empirical Relationships between Structural and Spectral Factors of Yellowstone Lodgepole Pine Forests," vol. 63, no. 1, pp. 1375–1381, 1997.
- [15] S. Jin and S. a. Sader, "Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances," *Remote Sensing of Environment*, vol. 94, no. 3, pp. 364–372, Feb. 2005.
- [16] E. P. Crist and R. J. Kauth, "The Tasseled Cap De-Mystified," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, no. 1, pp. 81–86, 1986.



- [17] A. J. H. Meddens, J. a. Hicke, L. a. Vierling, and A. T. Hudak, "Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery," *Remote Sensing of Environment*, vol. 132, pp. 49–58, May 2013.