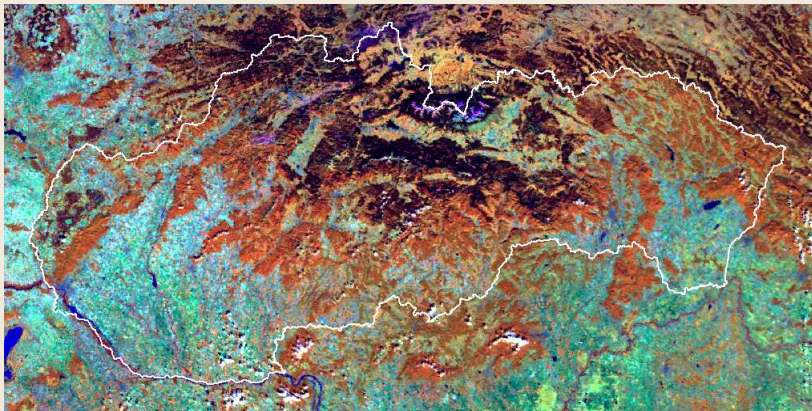


**Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav Zvolen**

**Lesnícka fakulta Technickej univerzity vo Zvolene**

**Agentúra na podporu vedy a vývoja**

**Slovenská lesnícka spoločnosť**



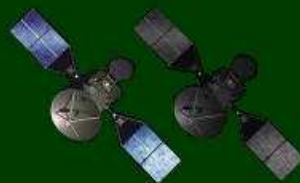
**Tomáš Bucha, Hana Pavlendová (eds.)**

**DIAĽKOVÝ PRIESKUM ZEME –**

**LESY V MENIACICH SA PRÍRODNÝCH PODMIENKACH**

**Zborník príspevkov z vedeckého seminára**

**Zvolen, 19. november 2009**



**Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav Zvolen**

**Lesnícka fakulta Technickej univerzity vo Zvolene**

**Agentúra na podporu výskumu a vývoja**

**Slovenská lesnícka spoločnosť**

**Vedecký seminár**

**DIALKOVÝ PRIESKUM ZEME –  
LESY V MENIACICH SA PRÍRODNÝCH  
PODMIENKACH**

**pri príležitosti životného jubilea –  
75. výročie narodenia doc. Ing. Jána Račka, CSc.**

**Zborník vedeckých prác**

**Zvolen, 19. november 2009**

Vedecký seminár sa uskutočnil v rámci riešenia výskumného projektu „Satelitne založené sledovania odozvy lesných ekosystémov na globálne sa meniace podmienky prostredia“ podporeného Agentúrou na podporu vedy a výskumu na základe zmluvy APVV-670-07.

**Odborní garanti:**

Dr. Ing. Tomáš Bucha, NLC-LVÚ Zvolen

prof. Ing. Ľubomír Scheer, CSc., Lesnícka fakulta TU Zvolen

**Editori:** Dr. Ing. Tomáš Bucha  
Ing. Hana Pavlendová, PhD.

Neprešlo jazykovou úpravou

© Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav  
ISBN 978 - 80 - 8093 - 098 - 1

## **OBSAH**

<b>Scheer, L.:</b> Prínos doc. Ing. Jána Račka, CSc. k rozvoju DPZ a jeho pôsobenie na Lesníckej fakulte Vysokej školy lesníckej a drevárskej vo Zvolene	<b>5</b>
<b>Bucha, T.:</b> Príhovor k jubileu doc. Račka	<b>11</b>
<b>Sitko, R., Scheer, L.:</b> Návrh systému hodnotenia vybraných funkcií lesa na báze údajov DPZ a terestrických informácií	<b>15</b>
<b>Bucha, T., Koreň, M.:</b> Kontinuálne sledovanie odozvy lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prírodného prostredia pomocou údajov DPZ – tvorba údajovej bázy	<b>35</b>
<b>Priwitzer, T., Bucha, T., Koreň, M.:</b> Využitie vegetačného indexu NDVI odvodeného z MODISu pri fenologických pozorovaniach lesných drevín	<b>51</b>
<b>Pavlendová, H., Barka, I., Bucha, T., Priwitzer, T.:</b> Odvodenie indexu listovej plochy z MODISu	<b>65</b>
<b>Pajtík, J.:</b> Odvodenie čistej a hrubej primárnej produkcie lesných ekosystémov s využitím satelitných údajov MODIS	<b>83</b>
<b>Nováková, M., Klikušovská, Z., Mišková, M., Sviček, M.:</b> Analýza produkčnej schopnosti poľnohospodárskej krajiny na základe meraných údajov, DPZ a modelovania	<b>99</b>
<b>Barka, I.:</b> Návrh regionálneho informačného systému ekologického a produkčného stavu lesa na báze údajov DPZ	<b>123</b>



**PRÍNOS DOC. ING. JÁNA RAČKA, CSc.  
K ROZVOJU DIAĽKOVÉHO PRIESKUMU ZEME  
A JEHO PÔSOBENIE NA LESNÍCKEJ FAKULTE  
VYSOKEJ ŠKOLY LESNÍCKEJ A DREVÁRSKEJ  
VO ZVOLENE**

**Vážené dámy, páni, kolegyně, kolegovia,**

stretávame sa tu dnes na vedeckom seminári, ktorý je svojou problematikou zameraný na využívanie diaľkového prieskumu Zeme v lesných ekosystémoch v meniacich sa prírodných podmienkach. Tento seminár je organizovaný, a to by som chcel podčiarknuť, pri príležitosti životného jubilea doc. Ing. Jána Račka, CSc., ktorý tejto problematike venoval podstatnú časť svojej vedeckej, ale aj pedagogickej práce počas svojho pôsobenia na Lesníckej fakulte, vtedajšej Vysokej škole lesníckej a drevárskej vo Zvolene, dnes Technickej univerzite vo Zvolene a neskoršie na Výskumnom ústave lesného hospodárstva vo Zvolene.

Je pre mňa veľkým potešením povedať v tejto úvodnej, slávnostnej časti nášho seminára pár slov k osobe doc. Račka, k jeho pôsobeniu na Lesníckej fakulte VŠLD vo Zvolene ako aj k jeho prínosu k rozvoju diaľkového prieskumu Zeme. Doc. Račko nesporne patrí medzi zakladateľov a priekopníkov využívania diaľkového prieskumu Zeme v lesníctve, je autorom početných lesníckych aplikácií, o čom svedčia výsledky jeho vedecko-výskumnej práce ako aj aktivity v pedagogickej oblasti.

Je pre mňa potešením tu stáť aj preto, že v rokoch 1982–1985 bol doc. Račko mojím školiteľom špecialistom počas mojej internej aspirantúry na Lesníckej fakulte VŠLD a v tom období sme spoločne riešili mnohé úlohy a problémy lesníckych aplikácií DPZ. Zároveň si ho vážim ako odborníka a človeka, ktorý ma formoval a výrazne ovplyvnil moje odborné smerovanie.

Dovoľte mi teraz uviesť základné informácie o našom oslávencovi, o jeho vzdelaní, zamestnaní a pôsobení na Lesníckej fakulte VŠLD vo Zvolene kde pracoval do roku 1985. Jeho pracovné aktivity na VÚLH vo Zvolene v ďalšom vystúpení zhodnotí Ing. T. Bucha.

Doc. Račko sa narodil 16. 11. 1934 v Očovej, v roku 1953 ukončil Gymnázium vo Zvolene. V rokoch 1954 – 1959 študoval na LF VŠLD vo Zvolene, kde mu tiež bola v roku 1971 udelená hodnosť kandidáta poľnohospodársko-lesníckych vied. V roku 1991 obhájil habilitačnú prácu na tému „**Zisťovanie stavu lesa z pozemných a leteckých snímok**“ na Lesníckej fakulte VŠLD a s účinnosťou od 1. marca 1991 bol menovaný docentom pre odbor Hospodárska úprava lesov.

Po skončení gymnázia v roku 1953 pracoval doc. Račko na LZ Vígľaš vo funkcii technika poľesia. Po skončení LF VŠLD v roku 1963 pracoval na Lesoprojekte, Ústave pre hospodársku úpravu lesov, Odbor fotogrametrie ako samostatný inžinier. V roku 1964 nastúpil na Lesnícku fakultu VŠLD vo Zvolene, Katedru hospodárskej úpravy lesov a geodézie, kde pôsobil ako odborný asistent až do roku 1985, teda viac ako 21 rokov. V roku 1985 nastúpil na VÚLH vo Zvolene, kde pracoval ako vedecký pracovník a odkiaľ v roku 1996 odišiel na dôchodok.

Počas svojho pôsobenia vo funkcii odborného asistenta na KHÚLaG doc. Račko viedol cvičenia z predmetov **Štatistické metódy v lesníctve** a **Dendrometria**. Významným medzníkom bol rok 1982, kedy presadil zaradenie nového predmetu **Dial'kový prieskum Zeme v lesníctve** do učebných osnov Lesníckej fakulty. Tento predmet ako výberový zabezpečoval prednáškami aj cvičeniami ako interný pracovník a neskôr, po prechode na VÚLH určité obdobie ako externý pracovník. Tento predmet bol odvtedy stále v ponuke našich študijných programov na LF TU vo Zvolene, najskôr ako povinne voliteľný, v súčasnosti ako povinný predmet študijného programu **Geoinformačné a mapovacie techniky v lesníctve** v 2., inžinierskom stupni štúdia. Z pohľadu súčasnosti bolo zavedenie tohto predmetu veľmi prezieravé v súvislosti s veľkým progresom

a rozvojom v oblasti DPZ a súvisiacich lesníckych aplikácií v nasledujúcich rokoch.

Doc. Račko úspešne viedol mnohých diplomantov, práce ŠVOČ, zúčastňoval sa tiež výchovy vedeckých aspirantov. Presadzoval modernizáciu pedagogického procesu, zavádzanie nových didaktických foriem výučby, programovo riadené učenie na princípoch pedagogickej kybernetiky, využívanie unitátorov vo výučbe, ktoré možno považovať za predchodcov súčasného e-learningu.

Vo svojej vedecko-výskumnej práci sa doc. Račko zamerával hlavne na problematiku lesníckej fotogrametrie, biometrie, DPZ a jeho využitia pre lesnícke účely. Konkrétnejšie na využitie blízkej pozemnej a leteckej stereofotogrametrie pri zisťovaní stromových a porastových charakteristík, využitie leteckých snímok pri zisťovaní zastúpenia drevín, poškodenia lesa a monitoringu zdravotného stavu lesných ekosystémov, ako aj digitálnou klasifikáciou satelitných snímok. Doc. Račko sa staral o zabezpečovanie potrebnej prístrojovej techniky, nosičov snímkovej aparatúry, ako aj experimentálneho snímkového materiálu, čo v tom období nebolo jednoduché a samozrejmé.

Počas svojho pôsobenia na LF VŠLD bol doc. Račko autorom, resp. spoluautorom 16 pôvodných vedeckých prác, 8 výskumných prác a štúdií, 9 odborných prác, vedúcim 3 projektov. Z projektov je potrebné spomenúť hlavne návrh na zriadenie rezortného pracoviska DPZ a fotogrametrie pre lesníctvo na Slovensku. Ďalšie početné publikácie, projekty a expertízy nasledovali počas jeho pôsobenia na VÚLH vo Zvolene.

Prínos doc. Račka k rozvoju DPZ počas jeho pôsobenia na LF VŠLD vo Zvolene spočíval jednak už v spomínanom zavedení tohto predmetu do učebných osnov LF, ale hlavne vo vedecko-výskumných aktivitách, riešených výskumných prácach a projektoch so zameraním na lesnícke aplikácie DPZ, z ktorých mnohé našli svoje uplatnenie pri modernizácii, objektivizácii a racionalizácii prác zisťovania stavu lesa.



Veľmi dôležité bolo aj zabezpečovanie potrebnej prístrojovej techniky a snímkového materiálu. Na tú dobu to boli progresívne a častokrát aj smelé myšlienky, ktoré rozvoj v tejto oblasti posúvali dopredu. Tu je potrebné spomenúť získavanie snímok veľkých mierok cca 1:500 až 1:1000 pomocou meračskej kamery Kiev, ktorá bola nesená meteorologickým balónom, resp. rádiom riadeným modelom lietadla, kde bola nainštalovaná poloautomatická snímková komora ovládaná pomocou zabudovaného servoriadenia. Dôležité bolo aj získavanie stereosnímkov veľkých mierok na princípe normálneho prípadu stereofotogrametrie z pevnej základnice nesenej vrtuľníkom a pod. Začiatkom 80. rokov získavanie takýchto snímkových materiálov nebolo jednoduché, vyžadovalo si špeciálne povolenia a prítomnosť príslušných osôb. Bol získavaný potrebný snímkový materiál novej kvality vo vzťahu k mierkam, ale aj použitých filmových materiálov. Všetky tieto aktivity posúvali dopredu vedecké poznatky a príslušné aplikácie.

Rovnako je potrebné spomenúť aj priekopnícky experiment rozlíšenia a monitorovania populácie lesnej zveri termálnym snímaním, ktorý bol na svoju dobu originálny a naznačil možnosti využitia termovízie pre tieto účely.

Doc. Račko je nielen vysokoškolský pedagóg a vedec, ale dlhé roky pôsobil aj vo folklórnom súbore Poľana pri VŠLD vo Zvolene a v albumoch športových podujatí VŠLD vo Zvolene sú zdokumentované aj jeho futbalové výkony.

Vážené dámy a páni, vážené kolegyně, kolegovia,  
dovoľte mi v závere vyzdvihnúť aj ľudské vlastnosti doc. Račka, ktoré ho charakterizujú ako obetavého pracovníka, učiteľa, kolegu, skromného človeka so zdravým zánietením a chlapčenským nadšením pre presadzovanie progresívnych myšlienok v pedagogickej a vedecko-výskumnej práci.

Úprimne chcem doc. Račkovi pri príležitosti jeho životného jubilea poďakovať za jeho úsilie a výsledky, ktoré dosiahol počas svojho pôsobenia na LF VŠLD vo Zvolene. Je pre mňa česť

*Scheer, L.: Prínos doc. Ing. Jána Račka, CSc. k rozvoju DPZ  
a jeho pôsobenie na Lesníckej fakulte Vysokej školy lesníckej a drevárskej vo Zvolene*

---

a potešenie, že to môžem urobiť ako jeho bývalý žiak, neskoršie kolega a dnes aj oficiálne ako funkcionár TU vo Zvolene.

*prof. Ing. Lubomír Scheer, CSc.*



## PRÍHOVOR K JUBILEU DOC. RAČKA

### Vážení kolegovia,

dovoľte mi aby som nadviazal na slová prof. Scheera a pripomenul „ústavné“ pôsobenie doc. Račka, ktoré začína rokom 1985, keď nastúpil na vtedajší Výskumný ústav lesného hospodárstva. Už niekoľko rokov pred spoločenskými zmenami, aj vďaka jeho intuícii, sa nášmu lesníckemu výskumu podarilo pripojiť na rozvíjajúce sa celoeurópske programy v oblasti **monitoringu zdravotného stavu lesov**. Ale nebolo to len mechanické prebranie európskych myšlienok a tendencií, ako to dnes občas vidíme. Doc. Račko vložil do monitorovacieho systému na tú dobu v európskom meradle nevídaný rozmer – aplikáciu **dial'kového prieskumu Zeme**. Pravdaže, predurčovala ho na tomu celá jeho predchádzajúca praktická, vedecko-výskumná a pedagogická činnosť. Ale práve táto rozsiahla báza poznatkov umožnila urobiť náš národný monitoring v celoeurópskom meradle niečím výnimočným. Dnes už s dostatočne objektívnym nadhľadom aj odstupom môžeme povedať, že esencia nášho súčasného výskumu v tejto oblasti stojí práve na dvoch pilieroch (monitoringu a DPZ), ktoré doc. Račko postavil koncom 80. rokov na našom ústave. Z prezieravosti ho „usvedčujú“ jeho slová z rámcového návrhu programu „*Monitoringu zdravotného stavu lesov SSR*“ spred 23 rokmi, keď tvrdil: „*Pri zisťovaní vývoja stavu lesov SSR je nevyhnutné založiť pravidelnú sieť TMP a sledovať ich v dohovorených časových intervaloch. Zároveň s monitoringom je potrebné postupne budovať IS za pomoci vhodnej počítačovej techniky a techniky na obrazovú analýzu*“. Aj keby s tým niekto nesúhlasil, čas mu dal za pravdu. Ja s potešením a doc. Račko so zadost'účením môžeme tvrdiť, že aj po 23 rokoch si monitoring a DPZ stále majú „čo povedať“.

Dovolím si byť trochu osobnejší a doc. Račko mi to azda nebude zazlievať, pretože ja som už nielen priamy účastník

a svedok, ale aj pamätník dvoch desaťročí fungovania LVÚ. V živej pamäti mám genézu vývoja monitoringu stavu lesov a dodnes (jazykovedci prepáčia) „smekám“ pred cieľavedomosťou, s akou doc. Račko uvedené programy utváral, formoval a realizoval. Nešlo to vôbec ľahko, presne naopak, ako vždy, keď človek príde s niečím novým, ale jemu sa darilo presadzovať veci s akousi tanečnou prirodzenosťou, iste vyplývajúcou s 20-ročného pôsobenia vo funkcii choreografa folklórneho súboru Poľana. Spomínam si, ako som prišiel na LVÚ a posadili ma práve k doc. Račkovi do kancelárie. A nielen to, posadili ma hneď oproti nemu. Docent vzal veľkú knihu s názvom Fotogrametria a s prívetivou nenútenosťou mi povedal „preštudujte si toto, pán inžinier“. A tak som dva mesiace študoval, lebo zoči-voči autorite sa nič iné ani nedalo – a dodnes som mu za to vďačný, lebo som tú knihu poznal takmer naspamäť. Predpokladám, že takto nejak mohol pôsobiť aj na pracovníkov ministerstva pri získavaní zdrojov na financovanie rutinného monitoringu, zdrojov pre výskum a pre investície do potrebného technického vybavenia. Napriek rôznym prekážkam a ťažkostiam doc. Račko krok za krokom vecne naplňal program pozemného monitoringu v sieti 16 x 16 km a postupne rozvíjal metodické prístupy súvisiace s aplikáciou leteckého DPZ.

Dobre si uvedomoval, že bez špičkového technického vybavenia, nie je možný rozvoj progresívnych technológií a následne ani ich praktická realizácia. Bola to jeho zásluha, keď sa koncom roku 1991 na LVÚ dal do prevádzky systém obrazovej analýzy Pericolor 3400 spolu s GIS systémom ArcInfo. Dodnes neviem akým zázrakom získal vtedy ešte embargovanú pracovnú stanicu SUN so systémom UNIX. A o tom, ako kupoval lietadlo Zlín 43 kolujú úsmevné historky. Jeho zásluhou sme dostali najmodernejšie technické vybavenie, ucelenú technologickú linku od získavania snímok až po nástroja po ich vyhodnotenie, interpretáciu a publikovanie. Nasledovali unikátne výsledky. **Fotoletecký monitoring** nie je len termín, ktorý zaviedol doc. Račko, ale aj zrealizovaný pracovný postup hodnotenia zdravotného stavu lesov na monitorovacích plochách.

Samozrejme, nie všetko sa realizuje dodnes v takej podobe ako bolo pôvodne zamýšľané. Ale metodické postupy interpretácie leteckých snímok dodnes využívame napr. pri monitoringu zdravotného stavu lesov ovplyvnených prevádzkou VD Gabčíkovo.

Vývoj oblasti DPZ začiatkom 90. rokov neuveriteľne pokročil a bol to opäť doc. Račko, ktorý nás, ešte ako mladých spolupracovníkov orientoval na nové trendy. Išlo o aplikácie **satelitného DPZ**. Technické vybavenie nám ako jedným z mála na Slovensku umožnilo pracovať aj s týmito údajmi. Celkom logicky sme sa začali rozvíjať medzinárodnú spoluprácu s renomovanou inštitúciou Európskej komisie – JRC v Ispre. Výsledkom projektu Phare Mera 92, ktorý doc. Račko koordinoval bola unikátna satelitná mapa drevinového zloženia lesov Slovenska odvodená so satelitných snímok Landsat. Spolupráca s JRC pretrváva dodnes a po mojom pôsobení je tam náš kolega Raši ako národný expert, čo je znova satisfakcia a dôvod na utvrdenie sa v správnosti cesty započatej v polovici 90. rokov.

Doc. Ján Račko odišiel do dôchodku v roku 1996, no nejaký čas ešte aj potom pracoval pre LVÚ na dohodu. Nevieť ako on na to spomína, treba povedať, že obdobie v druhej polovici 90. rokov bolo turbulentnejšie ako všetky naše lety na Zlíne 43. Nedostatok financií nás nútil vykonávať v oblasti DPZ práce pre kohokoľvek, kto bol ochotný za to zaplatiť. Pre nás mladších spolupracovníkov to bolo poučné a užitočné obdobie, v ktorom sme preberali od docenta Račka skúsenosti z leteckých aplikácií DPZ a aspoň dodatočne treba oceniť, že ak aj mal pocit, že sa k nemu ústav zachoval macošsky, nesťažoval sa a pomohol, keď sme pomoc potrebovali.

Využívam túto príležitosť, aby som v mene svojom ale aj v mene kolegov, ktorí pracovali a pracujú na pracovisku DPZ poďakoval docentovi Jánovi Račkovi za to, že dnes môžeme stavať na tom, čo započal. Napokon, vďaka jeho daru pôsobiť tak, aby nesamozrejmé veci sa diali ako najprirodzenejšie na svete sa tu dnes stretávame, spájame príjemné s užitočným, osobné

s kolektívnym, život oslavujeme prácou a životné jubileum pracovným seminárom. Vek je napokon len číslo. A takéto číslo dnes už oslavuje hocikto. Ale len málokto má nalietané toľko ako doc. Račko! Chcel by som nášmu milému jubilantovi zaželať veľa zdravia, sily a životnej energie do ďalšieho letu.

Ad multos annos!

*Dr. Ing. Tomáš Bucha*

## NÁVRH SYSTÉMU HODNOTENIA VYBRANÝCH FUNKCIÍ LESA NA BÁZE ÚDAJOV DPZ A TERESTRICKÝCH INFORMÁCIÍ

**Roman Sitko, Ľubomír Scheer**

*Technická Univerzita Zvolen, Lesnícka fakulta, T. G. Masaryka  
24, 960 53, Zvolen, e-mail: [sitko@vsld.tuzvo.sk](mailto:sitko@vsld.tuzvo.sk)*

### **Abstrakt**

V práci je prezentovaný navrhnutý systém hodnotenia funkcií lesa. Aplikovaný bol v horských podmienkach na hodnotenie dvoch ekologických funkcií (protierózna, protilavínová) a drevoprodukčnej funkcie lesa. Modelovým územím sú Liptovské Kopy nachádzajúce sa na rozhraní Vysokých a Západných Tatier. Hodnotenie vychádza z kvantifikácie funkčného účinku lesa, a to jednak na úrovni funkčného potenciálu, ale aj funkčného efektu lesa, ktorý je meradlom reálneho plnenia funkcií. Pre účely kvantifikácie funkčného efektu lesa kľúčovým bodom bolo zistenie aktuálneho stavu lesa. Tu okrem tradičných terestrických inventarizačných metód boli aplikované aj efektívne postupy zisťovania stavu lesa z údajov DPZ. Klasifikáciou družicovej snímky Ikonos bolo zistené druhové zloženie lesných porastov aj s aktuálnou priestorovou distribúciou drevín, a to so správnosťou vyjadrenou indexom zhody ( $Kappa$ ) 88 %. Zo snímky boli odvodené aj modely spektrálnej odraznosti na odhad niektorých produkčných charakteristík stavu lesa. Pre výsledné hodnotenie a vzájomné porovnanie hodnoty funkcií lesa bol použitý naturálny koncept založený na poznatkoch teórie neostrých (fuzzy) množín, aplikovaný v systéme EMDS.

**Kľúčové slová:** funkcie lesa, protierózna funkcia, protilavínová funkcia, drevoprodukčná funkcia, Ikonos, EMDS



## **Abstract**

The paper deals with proposal of system for the selected forest functions evaluation. The system was applied for two ecological forest functions (erosion control, avalanche control) as well as for woodproduction function at the mountain area. The model area - Liptovské Kopy - is situated on the border of High and West Tatras. The evaluation system is based on the forest function potential and forest function effect quantification. The function effect is the measure of real function fulfill. The update of the forest inventory data was the important task for real function effect quantification. The efficient methods for processing of remote sensed data as well as traditional terrestrial inventory methods were employed. The tree species composition and its space distribution were classified from Ikonos satellite data with accuracy expressed by Kappa index 88 %. The spectral reflectance models of the production forest characteristics were derived on the basis of image spectral data. The natural concept of forest functions evaluation based on Fuzzy set theory was used. The evaluation procedure was applied in EMDS (Ecosystem Management Decision Support) system.

**Key words:** forest functions, erosion control function, avalanche control function, woodproduction function, Ikonos Satellite Images, EMDS

## **Úvod a rozbor problematiky**

Záverly Ministerskej konferencie vo Viedni v roku 2003 potvrdili potrebu transformácie lesníctva so zameraním sa na trvalo udržateľný rozvoj plnenia spoločenských požiadaviek po verejnoprospešných funkciách lesa. Vyplýva to z narastania dôležitosti a zhoršujúceho sa stavu takých dôležitých prírodných zdrojov akými sú voda, vzduch a ktorých kvalita do veľkej miery závisí od stavu lesného prostredia. Takisto so zvyšujúcou sa životnou úrovňou a pracovným tempom narastá v spoločnosti tlak na využívanie lesného prostredia na oddych a rekreáciu, čo je často krát potrebné zladit' s požiadavkami na zachovanie prírodného bohatstva.

Teoretický základ pre takto orientované hospodárenie v lese tvoria u nás práce PAPÁNEK (1978), MIDRIAK (1981), ZACHAR (1981). Metodicky najpodrobnejšie a pre naše podmienky najkomplexnejšie rozpracoval túto problematiku vo svojej štúdií prvý z citovaných autorov, pričom navrhnutý a v rámci jednorazovej funkčnej typizácie (1979 – 1981) aj aplikovaný systém hodnotenia je založený na *utilitárnom* (antropocentrickom) prístupe. Systém vyúsťuje do ocenenia kvantifikovaných tzv. celospoločenských funkcií lesa, ktoré sú chápané ako služby, ktoré les plní pre človeka.

V Česku, ako krajine, s ktorou sme do roku 1989 zdieľali rovnaký stav v problematike oceňovania funkcií, sa v súčasnosti pre lesné pozemky s porastami používa viackriteriálny expertný systém oceňovania funkcií lesa navrhnutý ako aditívna nadstavba k projektu VYSKOT (2003) - Kvantifikácia a hodnotenie funkcií lesa ČR. Viackriteriálny systém hodnotenia je založený na *ekosystémovom* prístupe, v rámci ktorého sú za funkcie považované účinky lesa vyplývajúce z jeho ekosystémových procesov. Pri stanovení ceny pritom vychádza zo vzťahu medzi kriteriálnym skóre verejnoprospešných funkcií a cenou drevoprodukčnej funkcie lesa (1 m<sup>3</sup> dreva na pni), ako jedinej funkcie realizovanej trhom. KREČMER *et al.* (2006) to hodnotí ako sporný (nepodložený) predpoklad a uvádza, že je potrebné použiť diferencované metódy oceňovania v závislosti od povahy tej ktorej funkcie a že je potrebné zohľadniť aj funkčné účinky lesa, ktoré sa prejavujú často i mimo lesných porastov. Niektoré diferencované metódy prezentujú práce SEBERA 2001, ŠVIHLA 2004, ŠIŠÁK *et al.* 2006, pričom ich zjednocujúcim prvkom je aplikácia tradičného utilitárneho prístupu.

Vývoj v hodnotení funkcií lesa na Slovensku je možné charakterizovať snahou o integráciu oboch prístupov, pričom predmetom klasifikácie sú ekosystémové účinky a predmetom hodnotenia ekosystémové služby lesa (ČABOUN, 2007).

Dôležitým východiskom metód hodnotenia ekosystémových služieb lesa je objektívna kvantifikácia funkčnej účinnosti lesa zohľadňujúca priestorové hľadisko ich pôsobenia.

Detailná priestorová lokalizácia funkcií je dôležitá aj s ohľadom na komplikovanosť vlastníckych vzťahov. Preto sa javí ako výhodné využiť moderné prostriedky geoinformatiky na kvantifikáciu účinkov funkcií lesa formou modelovania týchto dynamických priestorových procesov prostriedkami numerických a štatistických metód v prostredí geografického informačného systému (GIS). Základom uvedeného postupu je zistenie aktuálneho stavu lesa a lesného prostredia a jeho vyjadrenie v priestorovo distribuovanej forme. Pre tento účel ponúka geoinformatika veľké množstvo metód digitálneho spracovania obrazu vo väzbe na využitie materiálov diaľkového prieskumu Zeme (DPZ).

Vývoj v oblasti DPZ sa orientuje na rozvoj metód spracovania digitálnych záznamov s vysokým priestorovým a spektrálnym rozlíšením, v prípade sledovania dynamiky vývoja zmien počas vegetačného obdobia je ťažisko na vysokej časovej rozlišovacej schopnosti snímacích systémov. Z hľadiska spektrálneho rozlíšenia významný rozvoj zaznamenáva využívanie hyperspektrálnych záznamov. V lesníctve majú veľký význam aplikácie týkajúce sa klasifikácie vegetačného krytu až po úroveň určenia druhového zloženia drevín v porastoch. Pre tento účel čoraz častejšie nachádza uplatnenie objektovo orientovaný prístup klasifikácie, založený na segmentácii obrazu, ktorý pre klasifikáciu okrem spektrálnych charakteristík využíva tiež charakteristiky textúry a rôzne fyzikálne resp. rozmerové charakteristiky objektov na snímke. Metódami automatizovanej resp. poloautomatizovanej identifikácie jednotlivých korún stromov sa zaoberá napríklad práca BRANDTBERG (1999). Veľmi aktuálne pre uvedené aplikácie je využitie aktívnych laserových (LiDAR) systémov (KOCH *et al.*, 2006), ktoré je možné využiť tiež na určenie výšky hornej korunovej vrstvy porastov, identifikáciu hraníc porastov a pod. Medzi tradičné aplikácie patrí klasifikácia poškodenia lesa abiotickými a biotickými škodlivými činiteľmi, umožňujúca zachytiť predvizuálne zmeny odraznosti chlorofylu v blízkom infračervenom spektre elektromagnetického žiarenia, alebo mapovanie plošného rozsahu škôd po veterných,

snehových kalamitách a po požiaroch. Využitie analýz multitemporálnych radov je vhodné zas pri monitoringu zdravotného stavu, ťažbovo-obnovných a pestovných postupov v lese.

### **Materiál a metódy**

S ohľadom na efektívnosť využitia metód DPZ pri zisťovaní stavu lesa v ťažko dostupnom členitom horskom teréne a s ohľadom na dôležitosť mimoprodukčných funkcií v území takéhoto charakteru bola za modelové územie vybraná časť povodia Tichého potoka patriaca do orografického celku Západné Tatry. Názov záujmového územia je Liptovské Kopy a jeho výmera je približne 2500 ha. Územie má vysokohorský charakter s členitým reliéfom terénu s rozpätím nadmorských výšok 1100 – 2052 m n.m. Z geologického hľadiska záujmovú oblasť prevažne budujú metamorfity. Z hľadiska pedologického v najnižších polohách sa rozprestierajú kambizeme dystrikové a kambizeme podzolované, na ne nadväzujú podzoly organozemné, typické, v hrebeňových častiach podzoly rankrové, v najvyšších častiach skupiny pôd ochrických (litozeme, regozeme). Z fytoecologického hľadiska v záujmovom území sa prevažne nachádzajú spoločenstvá jarabinových smrečín (*Sorbeto-Piceetum*), v oblasti hornej hranice lesa na ne nadväzujú spoločenstvá limbových smrečín (*Cembreto-Piceetum*), ktoré postupne prechádzajú do spoločenstiev limbovej kosodreviny (*Cembreto -Mughetum*) až do kyslých kosodrevín (*Mughetum acidofilum*). Z drevín má dominantné zastúpenie smrek, ktorý pokrýva rozsiahle plochy. Väčšinou je nerovnoveký, nerovnomerne zmiešaný (hlúčky, skupiny, ostrovčeky), zmiešaný s jarabinou a limbou, ojedinele so smrekovcom. Kosodrevina v oblasti nad hornou hranicou lesa tvorí súvislé porasty, vo vyšších polohách ostrovčeky, skupiny až hlúčky.

Z ekologických funkcií lesa ovplyvňujúcich prírodné procesy prebiehajúce v modelovom území boli pre hodnotenie vybrané *protierózna* a *protilavínová* funkcia a vyhodnotená bola

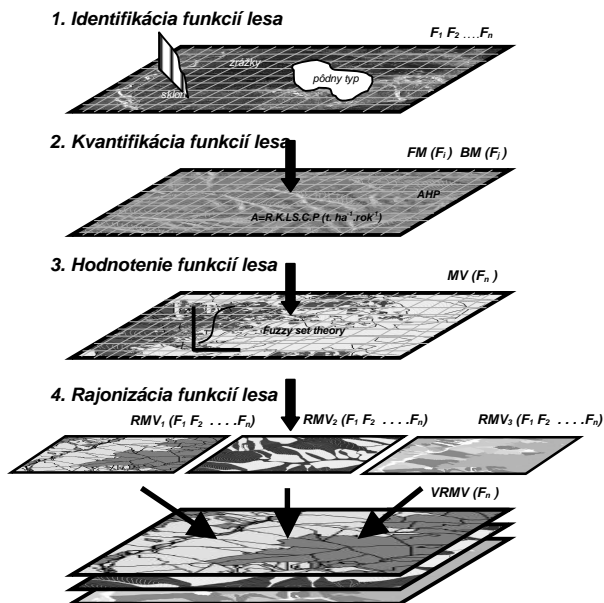
i *drevoprodukčná* funkcia lesa. Pre tento účel boli použité nasledovné zdroje údajov:

- 1 panchromatický a 4 multispektrálne kanály snímky Ikonos
- digitálny model reliéfu (DMR)
- údaje geologických máp a máp katastra lavínových dráh SLP v Jasnej
- údaje LHP a LHE, údaje meteorologických staníc SHMU, ekologického prieskumu lesa (pedologické a typologické mapy) a údaje monitorovacej siete 4x4
- publikované poznatky a výsledky určenia hodnôt faktorov pre empirické modely vodnej erózie
- výsledky vlastného terénneho prieskumu týkajúce sa zisťovania vegetačného krytu (zameranie trénovacích množín GPS prúmačom pre účely klasifikácie snímky Ikonos)

Navrhnutý systém hodnotenia funkcií lesa je súčasťou uceleného štvorfázového postupu vyúsťujúceho do rajonizácie funkcií lesa (*Obrázok 1*).

Náplňou prvej fázy, *identifikácie funkcií lesa*, je identifikácia stavu lesného prostredia resp. lesa plniaceho určité funkcie. Pre tento účel boli použité údaje snímky Ikonos a výberovým spôsobom zisťované identifikátory funkcií lesa. S použitím družicovej snímky bola automatizovaným postupom kontrolovanej klasifikácie zisťovaná drevinová skladba v záujmovom území a na základe toho aj snímkový korunový zápoj. Trénovacie množiny pre zvolených 10 tried vegetačného krytu (1. kosodrevina, 2. limba, 3. smrek, 4. kamenné úsypy, 5. jarabina, 6. Callamagrostis villosa, 7. pôdna deštrukcia, 8. Juncus trifidus, 9. cesta, 10. voda) boli zamerané GPS prúmačom GIS rady, GeoExplorer 3. Celá skupina pôvodných a vylepšených obrazov bola podrobená výberu najvhodnejších pre účely klasifikácie. Výber sa uskutočnil posúdením diskriminačnej sily a divergencie obrazových súborov. Schopnosť prispieť k rozlíšeniu klasifikovaných tried (diskriminačná sila) bola posúdená na základe výsledkov krokovej diskriminačnej analýzy.

Divergencia (rozdiely) v štatistických charakteristikách tried sa vyhodnotila výpočtom charakteristiky nazvanej transformovaná divergencia. Pre vybrané obrazové súbory boli pre polohy tréningových množín (polygónov) vypočítané spektrálne signatúry. Na základe nich bola potom vykonaná klasifikácia metódou maximálnej pravdepodobnosti. Jednou z výhod uvedenej metódy je, že umožňuje zadefinovať apriórne poznatky o klasifikovaných triedach. V práci boli takto využité poznatky o prirodzenom vertikálnom rozšírení jednotlivých druhov drevín a vyjadrené boli formou obrazov apriórnych pravdepodobností. Z kvantitatívnych charakteristík boli pomocou empirických modelov spektrálnej odraznosti odhadnuté: hektárová zásoba, zakmenenie, vek porastov a index redukovanej úrovne zásoby.



Obrázok 1 Schéma navrhovaného metodického postupu rajonizácie funkcií lesa v prostredí GIS ( $F_n$  – funkcie lesa, FM – faktorová mapa, BM – booleovská mapa, MV – mapa vhodnosti, RMV – rajonizovaná mapa vhodnosti, VRMV – výsledná rajonizovaná mapa vhodnosti)

Formou povrchov boli modelované údaje o nadmorskej výške, morfometrické charakteristiky reliéfu – prispievajúca plocha, výška, sklon a expozícia povodia, dĺžka odtoku. Na základe klimatických charakteristík boli interpolované povrchy pre priemerný počet intenzívnych dažďových oddielov, klimatický faktor zrážok, z pôdných charakteristík to bol obsah humusu v pôde.

Druhou fázou navrhnutého metodického postupu je *kvantifikácia funkcií lesa*. Pre tento účel boli použité empirické a semi-empirické prístupy modelovania procesov vodnej erózie a určenia dosahu lavín a to pre scenár optimálneho a aktuálneho stavu lesa a stav bez ochranného účinku lesa. Pre modelovanie potenciálnej erózie bol použitý model STEHLÍK (1970), pre modelovanie reálnej erózie zodpovedajúcej aktuálnemu stavu lesa to bola Modifikovaná univerzálna rovnica straty pôdy MUSLE (MOOR, WILSON, 1992). Na určenie dosahu lavín bola použitá empirická metóda Alfa-Beta a v prostredí poznatkovej bázy NetWeaver bol v spolupráci so Strediskom lavínovej prevencie (SLP) v Jasnej vytvorený expertný systém identifikácie odtrhových zón. Produkčný potenciál bol kvantifikovaný prostredníctvom CPP hodnotového a to na základe simulácie rastu lesa v prostredí rastového simulátora Sibyla, kde základnou priestorovou jednotkou pre simuláciu boli HSLT. Reálny produkčný stav lesa bol tak ako pri ekologických funkciách zisťovaný pre bunky rastra s veľkosťou 4 m. Dve charakteristiky (% sortimentov I.-III.A a štíhlostný koeficient  $h/d$ ) boli zistené z údajov LHP, LHE a charakteristika produkčnej úrovne stanovišťa (index redukovanej úrovne zásoby  $I_{red}$ ) a zakmenenie boli odvodené použitím modelov spektrálnej odraznosti z údajov snímky Ikonos.

Finálna fáza *hodnotenia funkcií lesa* bola koncepčne navrhnutá ako vyhodnotenie funkčnej účinnosti lesa a to na dvoch úrovniach. Prvou je vyhodnotenie funkčného potenciálu lesa a druhou vyhodnotenie funkčného efektu lesa, ktorý je meradlom reálneho plnenia funkcií. Z rozdielu oboch vyhodnotení boli identifikované a lokalizované rezervy vo využívaní funkčného

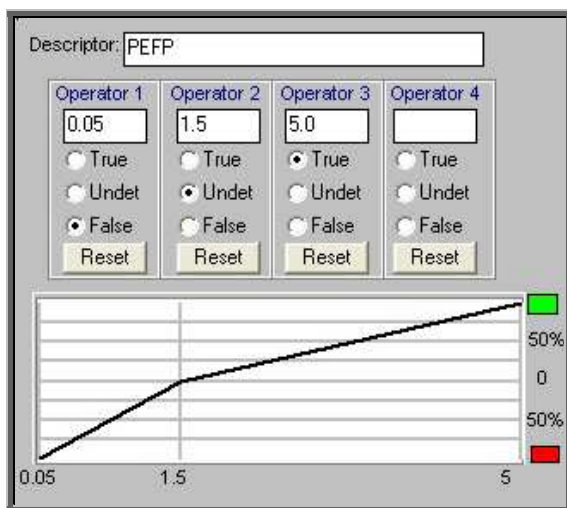
potenciálu lesa. Za účelom vyjadrenia hodnoty jednotlivých funkcií bol aplikovaný naturálny koncept hodnotenia vychádzajúci z teórie neostrej množiny (ZADEH, 1965). Úlohou fázy hodnotenia funkcií je transformácia definičného oboru kvantifikovaných charakteristík a modelovaných procesov do oboru hodnôt z intervalu  $[-1, 1]$ , pričom  $-1$  predstavuje žiadnu podporu pre plnenie funkcie lesa a  $1$  je hodnota zodpovedajúca maximálnej podpore plnenia funkcie. Uvedená transformácia sa uskutočňuje na základe zostrojenia funkcie príslušnosti do neostrej množiny, čo je možné považovať za kľúčový krok navrhnutého postupu hodnotenia funkcií. Pre účely zadefinovania funkcie príslušnosti bolo použité už spomínané prostredie poznatkovej bázy NetWeaver, ktoré je súčasťou systému na podporu priestorového rozhodovania EMDS (Ecosystem Management Decision Support). Vo vytvorených mapách vhodnosti (MV) bolo výsledné kritériálne skóre hodnotenej funkcie vyjadrené hodnotami  $[0, 100]$  a to na základe lineárneho prevodu hodnôt z intervalu  $[-1, 1]$  používaných v systéme EMDS.

## Výsledky a diskusia

Vyhodnotenie protieróznej, protilávínovej a drevoprodukčnej funkcie v záujmovom území je pilotnou aplikáciou navrhnutého systému hodnotenia funkcií lesa na báze údajov DPZ a terestrických informácií. S ohľadom na tematické zameranie seminára v prezentovaných výsledkoch bude hlavná pozornosť venovaná zhodnoteniu vplyvu databázovej neurčitosti na hodnotenie funkcií, vyplývajúcej z využitia údajov DPZ.

Protierózny funkčný potenciál PEFP lesa bol určený na základe kvantifikácie potenciálneho odnosu pôdy vodnou eróziou  $E_{max}$  modelom STEHLÍK (1970), pri ktorej sa neuvažovalo s ochranným účinkom vegetácie. Konštrukcia funkcie príslušnosti do neostrej množiny v prostredí NetWeaver vychádzala z poznatkov o kompenzačnej resp. tolerovanej erózii na silikátových horninách MIDRIAK (1995) a jej priebeh je znázornený na *Obrázku 2*.





Obrázok 2 Funkcia príslušnosti v systéme NetWeaver na hodnotenie protierózneho funkčného potenciálu lesa

Na základe aplikácie zostrojenej funkcie príslušnosti sa zistilo, že väčšina záujmového územia (ZU) má veľmi veľký až výnimočný PEFP (erózia nad  $5 \text{ mm.rok}^{-1}$ ), pričom priemer potenciálnej erózie dosahuje v ZU hodnotu  $8,98 \text{ mm.rok}^{-1}$ . Pre vyhodnotenie protierózneho funkčného efektu PEFE lesa bola použitá rovnaká funkcia príslušnosti a to pre vypočítaný rozdiel potenciálnej erózie  $E_{max}$  a reálnej erózie  $E_{akt}$  určenej modelom MUSLE pre aktuálny stav vegetačného krytu v ZU.

Výsledná správnosť klasifikácie aktuálneho stavu vegetačného krytu zo snímky Ikonos nadobudla hodnotu vyjadrenú Kappa indexom 88 %, čo je hodnota porovnateľná s klasifikáciami využívajúcimi objektový prístup. Z rozboru a porovnania dosiahnutých výsledkov, spolu s porovnaním s výsledkami práce TUČEK *et al.* (2005) je možné vyvodit' závery o tom, čo prispelo k dosiahnutiu tejto pomerne vysokej správnosti klasifikácie:

- použitím obrazov *apriórnych pravdepodobností*, vyjadrujúcich poznatky o vertikálnom rozšírení jednotlivých

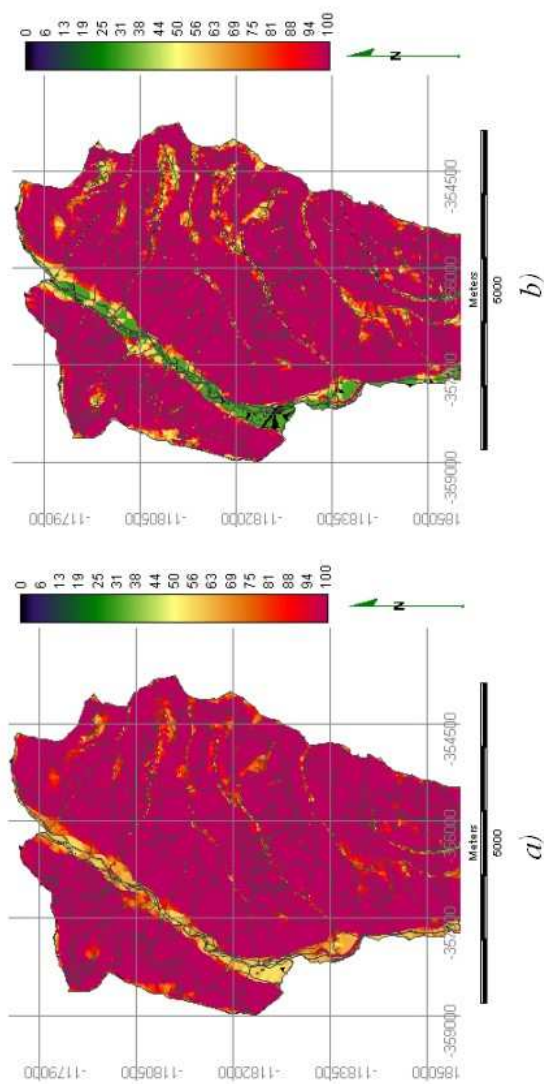
druhov drevín je možné zvýšiť správnosť klasifikácie približne o 10 %. V práci bolo v závislosti od použitých obrazových súborov dosiahnuté zlepšenie o 9 až 13 %.

- zahrnutie *textúry* ako ďalšej premennej, ktorá mimo spektrálnych charakteristík bola použitá v postupe automatizovanej, kontrolovanej klasifikácie drevín, napomohlo zvýšiť výslednú správnosť hodnoty Kappa indexu o 6 %. Tento výsledok sa viaže ku klasifikácii v triede *limba*, ktorá sa výrazne prejavuje svojou charakteristickou textúrou. Nadhodnotenie v uvedenej triede sa použitím textúry upravilo a chyba z nadhodnotenia klesla z 0,85 na 0,08, chyba z podhodnotenia z 0,82 na 0,44.

- *digitálna forma záznamu, spektrálna a priestorová rozlišovacia schopnosť snímky Ikonos* sa ukázali ako veľmi vhodné pri riešení uvedenej úlohy. V porovnaní s posledne citovanou prácou, v ktorej bola použitá infračervená letecká snímka, bola dosiahnutá vyššia hodnota Kappa indexu o 15 %.

Mapy hodnotenia PEFP a PEFE lesa sú znázornené na *Obrázku 3 a) a b)*. Z rozdielu PEFP a zisteného PEFE lesa vyplýva, že využívanie protierózneho potenciálu územia je na veľmi vysokej úrovni a prakticky si nevyžaduje plánovanie rozsiahlejších podporných opatrení. Svedčí o tom malý rozdiel v priemernej hodnote výsledného kritériálneho skóre, ktoré pre PEFP nadobudlo hodnotu 95,9 a pre PEFE lesa hodnotu 91,5.

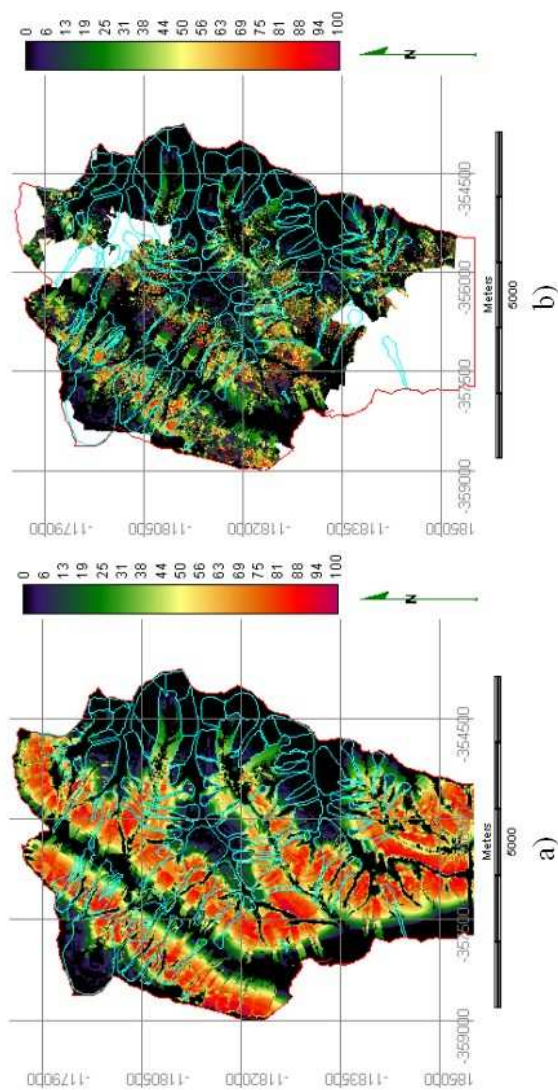
Pre hodnotenie protilavínového funkčného potenciálu PLFP a protilavínového funkčného efektu PLFE lesa bola v systéme EMDS vytvorená poznatková báza osobitne na hodnotenie primárnej funkcie a osobitne pre sekundárnu protilavínovú funkciu. Výsledné hodnoty kritériálneho skóre v mapách vhodnosti vytvorených vyhodnotením poznatkovej bázy boli ešte korigované triedou ohrozenia (škodlivosti), pričom použitá bola klasifikácia na tri základné a štyri odvodené triedy ohrozenia používaná pri klasifikácii lavínových dráh v mapách katastra lavínových dráh SLP.



Obrázok 3 Mapa a) protierózneho funkčného potenciálu PEFP a b) protierózneho funkčného efektu PEFE lesa

PLFP bol určený z rozdielu kvantifikovanej vierohodnosti vzniku resp. pádu lavíny a to pre maximálnu lavínovú aktivitu  $L_{max}$  (bez uvažovaného ochranného vplyvu stromovej vegetácie) a pre minimálnu lavínovú aktivitu  $L_{min}$  (pri optimálnom stave stromovej vegetácie) t.j.  $PLFP = L_{max} - L_{min}$ . Optimálny stav lesa pre určenie  $L_{min}$  bol vyjadrený rozhraním nadmorských výšok pre prirodzený výskyt protilavínovo účinnej stromovej vegetácie s korunovým zápojom 100 %.

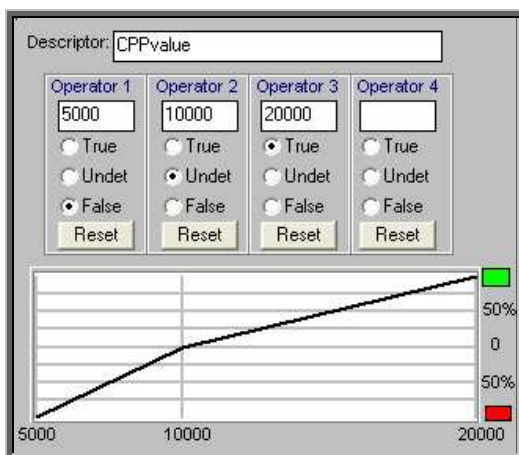
PLFE lesa bol určený z rozdielu  $L_{max} - L_{akt}$ , kde  $L_{akt}$  predstavuje lavínovú aktivitu kvantifikovanú pre aktuálny stav lesa. Výsledný model lavínových dráh bol porovnaný s mapami katastra lavínových dráh a vyhodnotený bol Kappa indexom zhody. Porovnávaná bola zhoda tried lavínové dráhy (LD) a územie bez lavín a to medzi modelom a LD známymi z máp katastra SLP. V rámci ZU dosiahol Kappa index celkovo hodnotu 0,58, pre triedu LD hodnotu 0,82. Došlo teda k výraznému nadhodnoteniu triedy LD v území, kde neboli mapované aktívne lavíny. Z priestorového posúdenia výslednej mapy modelu lavín sa zistilo, že prevažná väčšina nadhodnotenej plochy spadá na územie nad hornou hranicou lesa, kde pri tvorbe máp katastra lavínových dráh SLP nebolo možné z použitých leteckých snímok jednoznačne identifikovať maximálne dosahy lavín. Model použitý pri určovaní maximálneho dosahu lavín v rámci riešenej úlohy môžeme preto považovať za objektívnejší a výsledok modelovania za spresnenie z hľadiska určenia dosahov lavín pre územie nad hornou hranicou lesa. K nadhodnoteniu modelu pod hornou hranicou lesa však prispela aj databázová neurčitost' spôsobená výrazným nadhodnotením klasifikácie protilavínovo menej účinnej triedy vegetačného krytu *jarabina*, v prevažnej miere na úkor ihličnatých drevín. Chyba z nadhodnotenia dosiahla hodnotu 0,59, čo znamená, že až 59 % z referenčných obrazových prvkov klasifikovaných v triede *jarabina* nepatrí uvedenej triede, ale protilavínovo účinnejším triedam ihličnatých drevín, hlavne *smreku*. Uvedená chyba klasifikácie sa následne odrazila aj v podhodnotení výsledného kritériálneho skóre v mape vhodnosti pre PLFE lesa (Obrázok 4b).



Obrázok 4 Mapa a) profilavinového funkčného potenciálu PLFP a b) profilavinového funkčného efektu PLFE lesa.

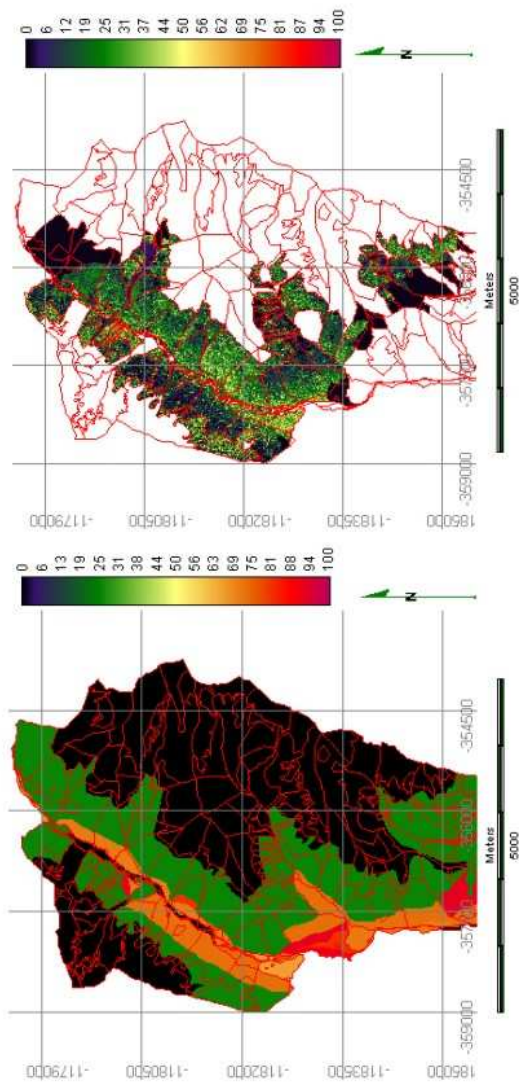
Pri porovnaní PLFE s mapou vhodnosti pre PLFP lesa (*Obrázok 4a*) sú dobre viditeľné rezervy v plnení protilavínovej funkcie. V celom území dosiahla priemerná diferencia výsledného kritériálneho skóre medzi PLFP a PLFE lesa hodnotu 14, čo poukazuje na nedostatočné využitie protilavínového funkčného potenciálu lesa v záujmovom území, resp. potrebu plánovania podporných opatrení. Reálne rezervy v naplnení protilavínového potenciálu sú však v skutočnosti menšie čo vyplýva z už uvedeného podhodnotenia PLFE lesa spôsobeného nesprávnou klasifikáciou triedy vegetačného krytu *jarabina*. Nevyhodnotené (biele) plochy v mape vhodnosti pre PLFE lesa reprezentujú územie, kde chýbali údaje o aktuálnom zastúpení drevín. Na snímke Ikonos boli tieto miesta pokryté oblačnosťou a preto boli vyňaté z klasifikácie vegetačného krytu.

Pri drevoprodukčnej funkcii lesa boli v záujmovom území aplikované dve rôzne úrovne a boli použité rôzne kritériá hodnotenia produkčného funkčného potenciálu (PFP) a produkčného funkčného efektu (PFE) lesa a preto výsledkom hodnotenia nebola identifikácia rezerv v plnení drevoprodukčnej funkcie lesa. Na základe uskutočnenej simulácie v prostredí stromového rastového simulátora Sibyla sa zistilo, že najviac zastúpené Vysokohorské smrečiny s limbou (HSLT 729) majú potenciál nadobudnúť v rubnom veku hodnotou CPPH 7612 Sk/ha, čomu v rámci navrhutej funkcie príslušnosti (*Obrázok 5*) zodpovedá výsledné kritériálne skóre 26. Druhým najzastúpenejším je HSLT 698 (Kamenné smrečiny s jedľou) s hodnotou CPPH 14576 Sk/ha a výsledným kritériálnym skóre 78. Bezprostredne na ne nadväzovali nad hornou hranicou lesa HSLT 840 (Limbová kosodrevina) a 820 (Kosodrevina) s nulovou hodnotou drevoprodukčnej funkcie. Mapa vhodnosti pre PFP lesa je znázornená na *Obrázku 6a*.



Obrázok 5 Funkcia príslušnosti v systéme NetWeaver na hodnotenie produkčného funkčného potenciálu lesa

PFE vyhodnotený na základe kritéria využitia produkčného priestoru (zakmenenie), produkčnej úrovne stanovišťa ( $I_{red}$ ), bezpečnosti (h/d) a kvality produkcie (% I.-III.A), nadobudol v ZU pre hodnotené smrekové porasty hodnotu 18, čo poukazuje na ich nízku úroveň plnenia drevoprodukčnej funkcie (Obrázok 6b). Zo snímky Ikonos bolo zakmenenie modelmi spektrálnej odraznosti odhadnuté so strednou chybou  $\pm 9,8$  %, index redukovanej úrovne zásoby s chybou  $\pm 27,5$  %. Uvedené stredné chyby zhruba korešpondujú s výsledkami dosiahnutými v práci ŠMELKO *et al.* (1996) a preto v zhode s citovanou prácou môžeme prezentované postupy zistenia spomínaných kvantitatívnych charakteristík porastu považovať za hrubé odhady a odporučiť ich pre zefektívnenie zisťovania v kombinovaných aplikáciách dvojfázového snímko-terestrického postupu. Podrobnejšie sa rozboru modelov spektrálnej odraznosti pri odhade aj ďalších charakteristík ( $V \cdot ha^{-1}$ , vek) venuje práca SCHEER, SITKO (2007).



a) b) *Obrázok 6* Mapa a) produkčného funkčného potenciálu PFP a b) produkčného funkčného efektu PFE lesa.



Pre analýzu faktorov spôsobujúcich rozdiely v produkčnom potenciáli a efekte lesa je však potrebné zjednotiť výber kritérií a úroveň hodnotenia drevoprodukčnej funkcie lesa. Preto na základe známych poznatkov a dosiahnutých výsledkov boli ako jeden z výsledkov navrhnuté štyri hodnotiace kritériá pre hodnotenie drevoprodukčnej funkcie – zakmenenie, CPPh, šťíhlostný koeficient a vek porastu. Zakmenenie ako ukazovateľ využitia produkčného priestoru sa spolu s vekom dá spomedzi uvedených kritérií relatívne najpresnejšie aktualizovať z digitálnych záznamov DPZ. CPP hodnotový je vhodným integrujúcim ukazovateľom množstva a kvality drevnej produkcie, ktorý sa dá exaktným spôsobom prognózovať na základe použitia platných produkčných modelov v prostredí rastového simulátora. Pre účely hodnotenia produkčného potenciálu sa odporúča vychádzať z najpodrobnejších typologických jednotiek, lesných typov. Z hľadiska možností čo najdetailnejšieho zistenia CPPh pre aktuálny stav lesa sa navrhuje použiť údaje LHP na úrovni jednotlivých dielcov lesných porastov a z uvedených údajov sa pre tieto priestorové jednotky určí aj hodnota šťíhlostného koeficienta. Pre zistenie hrúbky a výšky t.j. veličín potrebných na odvodenie šťíhlostného koeficienta sa ako perspektívne ukazujú aj údaje získané pomocou aktívnych pozemných a leteckých laserových systémov, o čom svedčia aj mnohé súčasné geoinformaticky orientované aktivity v lesníckom výskume.

## **Literatúra**

- BRANDTBERG, T., 1999. Automatic Individual Tree-Based Analysis of High Spatial Resolution Remotely Sensed Data. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Swedish University of Agricultural Science, Silvestria 118, 47 s.
- ČABOUN, V., 2007. New solution and classification of forest functions and the resulting priorities. International symposium : Bottlenecks, Solutions, and Priorities in the Context of Functions of Forest Resources, The 150th

- Anniversary of Forestry Education in Turkey, Istanbul 17-19 October 2007, s. 253 – 261
- KOCH, B., DIEDERSHAGEN, O., HEYDER, U., STRAUB, CH., WEINACKER, H. (2006). 3D data for forest and environmental planning. [online]. *Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, 14<sup>th</sup>-15<sup>th</sup> Feb 2006, Vienna, [december 2006]. In: <<http://www.rali.boku.ac.at/7162.html>>
- KREČMER, V., ŠIŠÁK, L., ŠACH, F., ŠVIHLA, V., FLORA, M., 2006. K ekonomickému hodnocení mimotržních funkcí lesa z hledisek lesopolitických. *Zprávy lesnického výzkumu*, 3, 34 s.
- MIDRIAK, R., 1981. Diferencované obhospodarovanie lesa podľa integrovaných funkcií. In: *Lesnícke štúdie* č. 31, VÚLH Zvolen, 222 s.
- MIDRIAK, R., 1995. Ekologické vplyvy hospodárenia na krajinu. Prípadová štúdia z Čergova. *Vedecké a pedagogické aktuality* 3/1995. Zvolen, 52 s.
- MOORE, I. D., WILSON, J. P., 1992. Length-slope factors for the Revised Universal Soil Loss Equation: Simplified method of estimation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47, s. 423-428
- PAPÁNEK, F., 1978. Teória a prax funkčne integrovaného lesného hospodárstva. *Lesnícke štúdie* č. 29, VÚLH Zvolen, 215 s.
- SEBERA, J., 2001. Oceňování škod na mimoprodukčních funkcích lesa. *Lesnícka práce*, Roč. 80, č. 11
- SCHEER, L., SITKO, R., 2005. Growing stock assessment and regionalization employing IKONOS satellite data. In: *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Environmental Studies, Application in Forestry*, Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Band 138, s. 303-311.
- STEHLÍK, O., 1970. Geografická rajonizace půdy v ČSR. Metodika zpracování. *Studia Geographica* 13, GÚ ČSAV, Brno, 40 s.

- ŠIŠÁK, L., ŠACH, F., ŠVIHLA, V., ČERNOHOUS, V., 2006. Metodika sociálně-ekonomického hodnocení funkcí lesa. Lesnícky průvodce. Metodika pro praxi, VÚLHM, 32 s.
- ŠMELKO, Š., SCHEER, L., ĎURSKÝ, J., 1996. Poznatky z monitorovania zdravotného stavu lesa v imisnej oblasti Horná Orava. Vedecké štúdie, TU vo Zvolene, 16/1996/A, 137 s.
- ŠVIHLA, V., 2004. Věcné a peněžní hodnocení společenských funkcí lesa. *Lesnícka práce*, Roč. 80, č. 4
- TUČEK, J., SCHMID, M., CELER, S., 2005. Klasifikácia vegetačného krytu vo vysokohorských podmienkach z materiálov DPZ s vysokým rozlíšením pri uplatnení apriórnych poznatkov. In: *Acta Facultatis forestalis Zvolen, XLVII*, s. 83-98
- VYSKOT, I. a kol., 2003. Kvantifikace a hodnocení funkcí lesů České republiky. Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha, 186 s.
- ZADEH, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8, s. 338-353
- ZACHAR, D., 1981. Tvorba krajiny ČSSR. Bratislava, 591 s.

## **KONTINUÁLNE SLEDOVANIE ODOZVY LESNÝCH EKOSYSTÉMOV NA MENIACE SA PODMIENKY PRÍRODNÉHO PROSTREDIA POMOCOU ÚDAJOV DPZ – TVORBA ÚDAJOVEJ BÁZY**

**Tomáš Bucha<sup>1</sup>, Milan Koreň<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Národné lesnícke centrum–Lesnícky výskumný ústav, T. G. Masaryka 22, 960 92 Zvolen,  
e-mail: [bucha@nlcsk.org](mailto:bucha@nlcsk.org)*

<sup>2</sup>*Technická Univerzita Zvolen – Lesnícka fakulta, T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen,  
e-mail: [mkoren@vsld.tuzvo.sk](mailto:mkoren@vsld.tuzvo.sk)*

**Abstrakt:** V príspevku riešime problematiku výberu produktov zo spektrorádiometra MODIS pre kontinuálne sledovanie odozvy (reakcie) lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prírodného prostredia. Ako optimálny sme vybrali produkt MOD09 „Surface reflectance“, z ktorého odvodzujeme normalizovaný vegetačný indexu (NDVI) ako indikátor odozvy. Navrhujeme postup pre identifikáciu údajov, ktorých kvalita nie je vyhovujúca. K tomu využívame vrstvu kvality produktu MOD09. Pre obrazové prvky, ktoré nevyhoveli stanoveným kritériám kvality, hodnotu NDVI interpolujeme z údajov časového radu. Priebeh NDVI počas jedného roka modelujeme pomocou sigmoidnej krivky. Pre interpoláciu údajov ako aj pre modelovanie priebehu NDVI sme vyvinuli aplokáciu „Phenological profile“.

**Kľúčové slová:** MODIS, kvalita údajov, vegetačný index, modelovanie

**Abstract:** We solve the matter of MODIS product selection for continuous evaluation of forest ecosystems response on environment changes. The product MOD09 Surface reflectance was selected as an optimal product. We derive Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from MOD09 as the indicator of forest ecosystem response and we propose the method for identification of MOD09 pixel with unsuitable quality. The quality layer of the MOD09 product we utilize for quality assessment. We interpolate the value for the pixels that did not pass through the quality criteria, using NDVI values derived before and after the day with unsuitable value. The annual course of NDVI we model by sigmoid curve. We developed the software package Phenological profile for interpolation and for modelling as well as.

**Keywords:** MODIS, data quality, vegetation index

## ÚVOD A PROBLEMATIKA

Iniciatívy zamerané na zachovanie a ochranu lesných ekosystémov (Kjótsky protokol) majú globálny charakter a potreba ich rozvoja sa neustále zvyšuje. Les je chápaný ako významný komponent, ktorý ovplyvňuje energetickú bilanciu, hydrológiu, klímu, biochemické cykly, je citlivým indikátorom prírodných a antropogénnych vplyvov. Časová a priestorová analýza lesných ekosystémov sa tak stáva kľúčovou úlohou pre pochopenie prebiehajúcich procesov tak na regionálnej ako aj globálnej úrovni. Rozvíjajú sa aplikácie založené na využití satelitných snímok pri monitorovaní biofyzikálnych premenných (Gobron et al., 2005, Hill et al., 2006) pri fenologických pozorovaniach (Kang et al., 2003; Zhang et al., 2003; Fisher, Mustard, 2007) a pri modelovaní produkcie (Hunt, 1994; Turner et al., 2003; Dong et al., 2003; Hazarika et al., 2005; Zhao et al., 2005; Coops et al., 2007).

Európska komisia (EK) v spolupráci s Európskou kozmickou agentúrou (ESA) definovali v rámci Global monitoring Environment and Security (GMES) iniciatívy kľúčové okruhy environmentálnych problémov, ktorých efektívne riešenie si vyžaduje uplatnenie prostriedkov diaľkového prieskumu Zeme (DPZ), predovšetkým nových senzorov komplexne monitorujúcich jednotlivé zložky biosféry, vrátane lesných ekosystémov. Európske iniciatívy zároveň odrážajú procesy, ktoré sú realizované na globálnej úrovni napr. vytvorenie „Globálneho monitorovacieho systému planéty“ (GPOS). Z lesníckeho hľadiska je podstatné, že oblasti ako minimalizácia škôd spôsobených prírodnými a antropogénnymi faktormi, riešenie problémov spojených s klimatickou zmenou, ochrana terestrických ekosystémov a zachovanie biodiverzity, sú zahrnuté do GMES ako aj GPOS iniciatívy.

Nové možnosti kontinuálneho monitorovania zemského povrchu ponúka najmä nová generácia spektrorádiometrov MODIS, umiestnených na družiciach Terra (vynesená na orbit v roku 1999) a Aqua (vynesená na orbit v roku 2002). Široký spektrálny rozsah (0.4 – 14.5  $\mu\text{m}$ ), priestorová rozlišovacia schopnosť od 250 do 1000 m a denné snímanie nášho územia umožňujú kontinuálne monitorovať a kvantifikovať stav a vývoj lesných ekosystémov.

Pri analýze procesov prebiehajúcich v lesných ekosystémoch na regionálnej až globálnej úrovni sú veličiny monitorované na trvalých monitorovacích plochách (TMP) a výskumných objektoch základom pre parametrizáciu a overenie produktov odvodených z údajov DPZ. Na národnej úrovni k tomu využívame monitorovaciu sieť zameranú na hodnotenie stavu a vývoja lesných ekosystémov založenú už v roku 1987. Pozostáva zo 112 TMP umiestnených v sieti 16 x 16 km. Rozšírený intenzívny monitoring zameraný na objasnenie dopadov znečistenia ovzdušia a globálnych klimatických zmien je realizovaný od roku 1996 na 8 TMP.

V riešenom projekte prepájame pozemný monitoring so satelitnými údajmi. Cieľom je využiť produkty MODIS pre

monitorovanie časového a priestorového vývoja biofyzikálnych veličín charakterizujúcich lesné ekosystémy a takýmto spôsobom priebežne sledovať reakciu lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prírodného prostredia.

V predkladanej práci riešime problematiku výberu vhodných produktov MODIS, overujeme ich kvalitu a vytvárame údajovú bázu satelitných snímok, z ktorých odvodzujeme ako biofyzikálny indikátor vegetačný index NDVI. Objektom riešenia sú lesné porasty celého územia Slovenska.

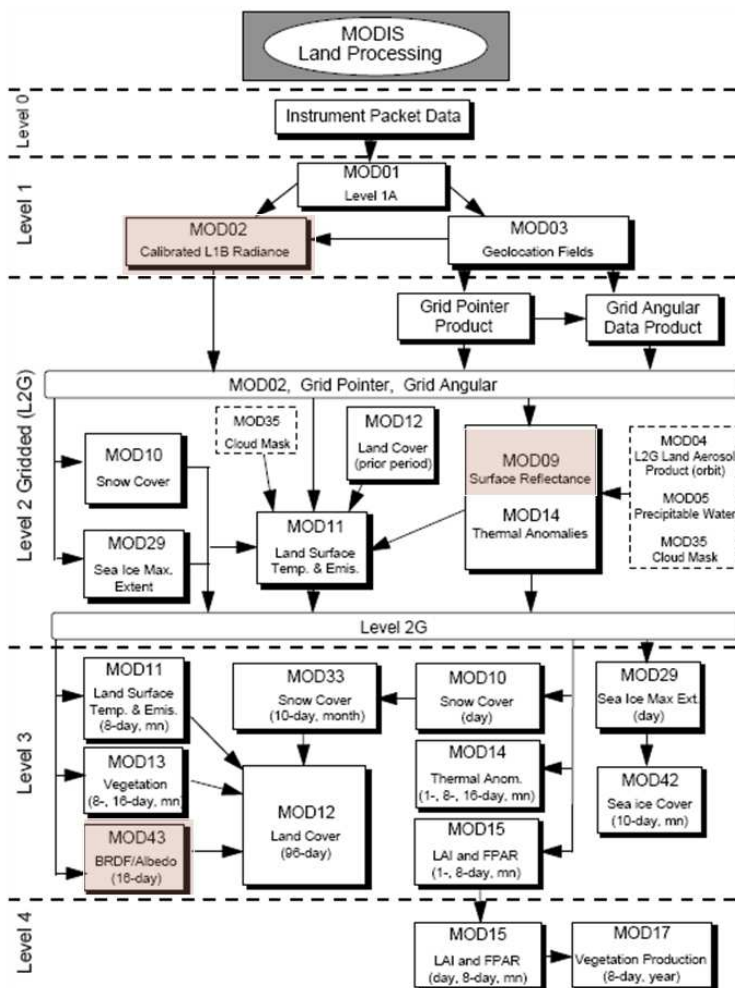
## **MATERIÁL A METÓDY**

### **Výber produktov MODIS**

MODIS ponúka celú škálu produktov (obr. 1). V predkladanej práci analyzujeme produkty MODIS vhodné pre odvodenie biofyzikálnych indikátorov akými sú vegetačné indexy. Zamerali sme sa na produkty MOD02, MOD09 a MOD43.

Produkt MOD02 udáva spektorrádiometrom namerané odrazené žiarenie. Produkt MOD09 poskytuje odhad spektrálnej odrazivosti, ktorá by bola meraná nad plochou, ktorá žiarenie odrazila. Pri výpočte odrazivosti sa vychádza z nameraného žiarenia (produktu MOD02) so zavedenými atmosférickými korekciami. Hodnoty sa upravujú o korekcie rozptylu a absorpcie žiarenia v atmosfére.

Pri výpočte odrazivosti pri produkte MOD09 sa vychádza zo zjednodušeného predpokladu, že povrch je lambertovský, t.j. odráža žiarenie rovnomerne do všetkých smerov. V realite táto podmienka je málokedy splnená. Produkt MOD43 BRDF/Albedo modeluje reálnu odrazivosť prostredníctvom dvojsmernej funkcie odrazivosti (BRDF). V porovnaní s MOD09 poskytuje vyššiu a presnejšie úroveň spracovania odrazeného žiarenia.



**Obr. 1** Produkty MODIS. Farebne sú označené produkty, ktoré využívame na sledovanie reakcie lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prírodného prostredia.

Zdroj: NASA:

<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/pdf/MODISdataflowdia.pdf>



## **Analýza kvality vybraných produktov MODIS**

Pre analýzu kvality údajov využívame súbor kvality produktu, ktorý je súčasťou jednotlivých produktov MODIS. Súbor kvality produktu definuje kvalitu odvodenia hodnoty danej charakteristiky v obrazovom elemente (pixeli). Ich začlenenie do procesu tvorby údajovej bázy umožňuje identifikovať a odladiť potenciálne zdroje chýb.

Presnosť polohovej lokalizácie produktov MOD02 a MOD09 sa uvádza približne 50 m ( $1\sigma$ ) v nadire (Wolfe et al. 2002). Hodnota spektrálnej odrazivosti v každom obrazovom prvku je čiastočne ovplyvnená aj spektrálnym prejavom susedných pixelov (Townshend et al. 2000). Obe skutočnosti majú vplyv na kvalitu analýz, môžeme ich považovať za chyby merania. Dôsledky sa prejavujú napríklad pri analýzach časových radov zvýšením variability zaznamenaných hodnôt odrazivosti. Jedným zo spôsobov zníženia variability je vylúčenie najviac ovplyvnených pixelov. Ide najmä o obrazové prvky na rozhraní lesných porastov a ostatných prvkov krajiny pokrývky.

## **Validačné údaje**

Okrem satelitných údajov MODIS sme zabezpečili prístup k potrebným validačným údajom. Zdrojom týchto údajov sú objekty dlhodobého výskumu najmä trvalé monitorovacie plochy (TMP) monitorovacieho systému ČMS Lesy. Ide hlavne o údaje z terénnych meraní listového indexu a sledovanie nástupu jednotlivých fenologických fáz. Ďalej máme k dispozícii aktuálne celoslovenské údaje z opisu porastov podľa základných jednotkách priestorového rozdelenia lesa (JPRL). Sú spracované vo forme geografickej databázy v prostredí systému ArcGIS.

## **NDVI ako biofyzikálny indikátor**

Ako indikátor stavu lesných porastov využívame normalizovaný vegetačný index NDVI. Odvodzujeme ho podľa vzťahu:  $NDVI = (RED - IRED) / (RED + IRED)$ , kde RED je spektrálna odrazivosť v červenom kanáli a IRED v infračervenom kanáli. Na základe analýzy časových radov NDVI je možné

skúmať reakciu lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prostredia. V súčasnej etape riešenia analyzujeme možnosti opisu celoročného vývoja vegetačného indexu pomocou sigmoidnej krivky (Fisher, 2007).

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

Parametre  $v_{\min}$  a  $v_{\text{amp}}$  zodpovedajú minimálnej hodnote vegetačného indexu (NDVI) a amplitúde, parametre  $m_{1,2}$  a  $n_{1,2}$  kontrolujú tvar a sklon krivky v jej nástupnej (jarnej) a zostupnej (jesennej) fáze.

Ďalšie využitie NDVI predpokladáme pri spresnení globálnych MODIS produktov s rozlíšením 1 km, a to listového indexu a fotosynteticky aktívnej radiácie (LAI a FPAR – produkt MOD15). Pôjde o zvýšenie priestorového rozlíšenia na 250 m, a to na základe korelačných vzťahov k NDVI. NDVI bude taktiež využitý na predikciu hlavných fenologických udalostí lesných porastov.

## **PREDBEŽNÉ VÝSLEDKY A DISKUSIA**

### **Výber produktov MODIS**

Na základe posúdenia charakteristík produktov MODIS sme riešenie úlohy na založili produkte MOD09, ktorý reprezentuje spektrálnu odrazivosť na povrchu v 250 m a 500 m priestorovej rozlišovacej schopnosti. Výhodou oproti produktu MOD02 je, že na produkte MOD09 sú vykonané rádiometrické a atmosférické korekcie, t.j. eliminovaný je vplyv absorbcie a rozptylu žiarenia v atmosfére. Z porovnania s produktom MOD43 BDFD/Albedo vyplynuli nasledovné rozdiely. MOD09 je k dispozícii každodenne, MOD43 v 16 dňových intervaloch. MOD09 predpokladá odrazivosť podľa lambertovského zákona, MOD43 ju modeluje podľa typu krajinnej pokrývky. Klasifikácia krajinnej pokrývky je však zatiaľ pomerne hrubá a na úrovni

priestorového rozlíšenia 1 km. Z dôvodu časovej rozlíšiteľnosti a neistoty modelovanej hodnoty BRDF sme pre ďalšie analýzy uprednostnili produkt MOD09, z ktorého odvodzujeme normalizovaný vegetačný index NDVI.

### **Získanie a predspracovanie satelitných snímok**

Snímky MODIS (produkt MOD09), získavame bezplatne z NASA údajového centra, a to cez webovú aplikáciu WIST (Warehouse Inventory Search Tool) zo stránky <https://wist.echo.nasa.gov/~wist/api/imswelcome/>. Na predspracovanie snímok pozostávajúce z výberu záujmového územia, výberu vrstiev a transformácie sinusoidálnej projekcie sme využili produkt MODIS Reprojection Tool version 4.0. Keďže v tomto produkte nie je preddefinované naše národné kartografické zobrazenie S-JTSK, použili sme Lambertovo konformné kónické zobrazenie. Riešenie nebolo optimálne z hľadiska prácnosti a preto sme pristúpili k naprogramovaniu vlastného postupu predspracovania snímok. Výsledkom je plná automatizácia procesu od prihlásenie sa na NASA server, cez stiahnutie snímok až po ich uloženie v systéme JTSK v archíve snímok. Riešenie je založené na platforme ESRI, vytvorený skript s grafickým rozhraním je spustiteľný z menu v prostredí ArcGIS.

### **Analýza kvality vybraného produktu MOD09**

Predmetom posúdenia kvality boli jednotlivé získané satelitné snímky produktu MOD09. Ide hlavne o elimináciu pixelov ovplyvnených oblačnosťou, tieňom z oblakov a posúdenie vplyvu geometrie snímania. Doposiaľ sme v archíve MODIS prezreli všetky snímky od roku 2000 do 2009. Na základe vizuálneho hodnotenia kvality sme snímky zaradili do 4 kategórií podľa miery ich využiteľnosti:

- (i) snímky vysokej kvality – bezoblačné celé územie Slovenska
- (ii) snímky veľmi dobrej kvality – časť územia je ovplyvnená oblačnosťou

- (iii) snímky dobrej kvality – väčšia časť územia je ovplyvnená oblačnosťou, časť je bezoblačná
- (iv) nekvalitné snímky – väčšina alebo celé územie je ovplyvnené oblačnosťou

Ďalším kritériom pre výber snímky bola pozícia satelitu v čase snímania vzhľadom k polohe Slovenska. Ako vhodné sme vybrali snímky, keď bol satelit priamo nad Slovenskom, t.j. snímame v nadíre. V týchto prípadoch je zabezpečené priestorové rozlíšenie cca 250 m. Vylúčené boli snímky snímané pod uhlom väčším ako cca. 45°. Výsledkom je zoznam dní, z ktorých snímky sú využiteľné pre riešenie projektu. Snímky v kvalite (i) až (iii) sme skopírovali do nášho archívu. V súčasnosti je v archíve uložených 291 snímok za obdobie 2000–2009.

Okrem vizuálnej kontroly kvality snímok, sme analyzovali dodané súbory kvality, ktoré umožňujú posúdiť kvalitu zaznamenananej odraznosti na úrovni pixelu. Výsledkom tohto rozboru pre produkt MOD 09 je informácia o kvalite jednotlivých pixelov podľa hodnoty bitu v 16 bitovom priestore a návrh optimálnej kombinácie hodnôt jednotlivých bitov, ktorú uplatníme pri rozhodovaní o zaradení daného pixelu do analýzy.

**Tab. 1** Optimálna kombinácia hodnôt bitu pri vrstve kvality produktu MOD09.

Bit No.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Optimálny prípad	0	0	0	0	0	1	0	0/1	0	0	1	0	0	0	0	0
Hodnota	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024	2048	4096	8192	16384	32768

Na základe uvedeného sme vytvorili systém kritérií kvality. Stanoveným kritériám vyhovujú tie obrazové prvky, v ktorých príslušný pixel vo vrstve kvality nadobúda jednu z hodnôt: 8, 72, 76, 136, 140, 200 a 8200. Hodnoty odrazivosti v ostatných prvkoch sú nahradené 0.

**Tab. 2** Stav alebo kvalitu parametrov kvality hodnôt odrazivosti podľa jednotlivých bitov.

Bit No.	Názov parametra	Kombinácia bitov – stav parametra
0-1	Stav oblačnosti	00 – Jasno; 01 – Oblačnosť; 10 – Zmiešaný; 11 – Nehodnotený, predpoklad jasno
2	Ovplyvnenie tieňom z oblakov	1 – Áno; 0 – Nie
3-5	Charakteristika krajinnej pokrývky: suchozemský povrch / voda	000 - Plytký oceán; 001 – Pevnina; 010 - Pobrežie oceánu alebo jazier; 011 - Plytká voda jazier; 100 - Občasná voda; 101 - Hlboká voda jazier; 110 - kontinentálny/plytký oceán; 111 - Hlboký oceán
6-7	Množstvo aerosólu	00 – Klimatológia; 01 – Nízky; 10 – Priemerný; 11 – Vysoký
8-9	Detekcia cirusov	00 – Žiadny; 01 – Malý; 10 – Priemerný; 11 – Vysoký
10	Interný algoritmus indikácie oblačnosti	1 – Oblak; 0 - Bez oblaku
11	Interný algoritmus indikácie požiaru	1 – Požiar; 0 - Bez požiaru
12	Detekcia snehu/ľadu (MOD 35 produkt)	1 – Áno; 0 – Nie
13	Detekcia ovplyvnenia okolitou oblačnosťou	1 – Áno; 0 – Nie
14	BRDF korekcia	1 – Áno; 0 – Nie
15	Interná maska snehu	1 – Sneh; 0 - Bez snehu

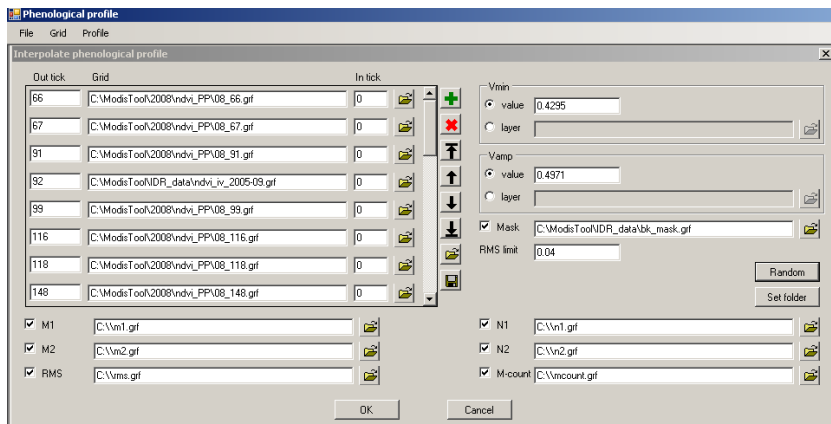
Popis kvality pre 250 m, 500 m a 1 km MOD09 produkt;  
Optimálny stav = hodnota na zelenom pozadí.

### **Odvodenie časových radov, interpolácia chýbajúcich hodnôt NDVI**

Z každej snímky sme odvodili vegetačný index NDVI. Vznikla tak časová séria NDVI za roky 2000–2009. Pre obrazové prvky s hodnotou 0, t.j. prvky ktoré neprešli zadanými kritériami kvality, hodnota NDVI je taktiež 0. Pre potreby analýzy časových

radov NDVI ako aj z dôvodov obmedzení pri práci s nulovými hodnotami pri softvéri IDRISI Taiga, bolo potrebné vytvoriť vlastné softvérové nástroje pre modelovanie ročného priebehu NDVI a nástroja pre doplnenie chýbajúcich hodnôt NDVI.

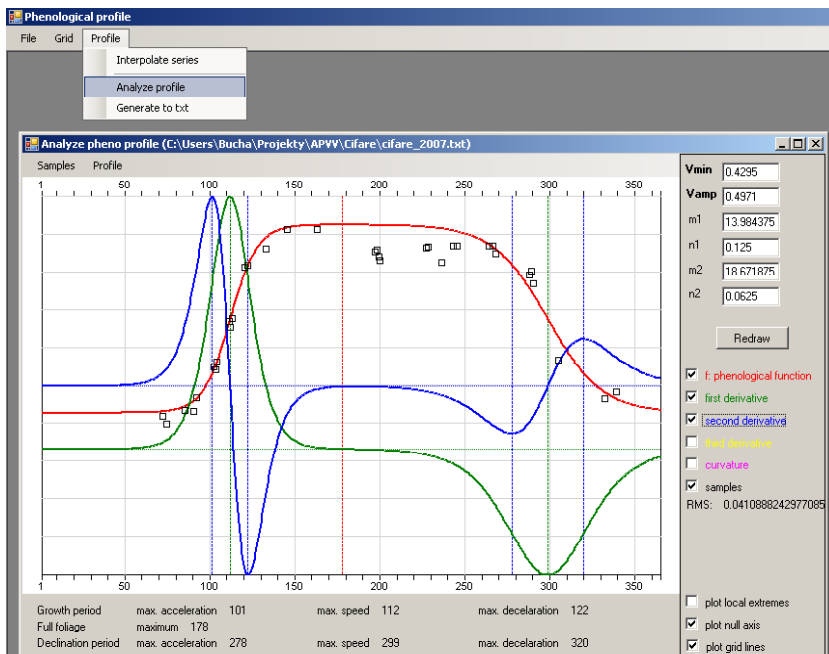
Problém nahradenia hodnoty 0 v obrazových pixeloch riešime vlastným metodickým postupom, a to nahradením chýbajúcej hodnoty interpolovanou hodnotou. Využívame pritom reálne hodnoty NDVI pred a po dni s chýbajúcou hodnotou, pričom pre interpoláciu využívame sigmoidnú funkciu podľa vzťahu [1]. Na obr. 2 je zobrazené užívateľské grafické rozhranie k tomuto účelu vyvinutej aplikácie Phenological profile (© Milan Koreň). Vstupom sú snímky časovej série po aplikácii súboru kritérií kvality. Prvým a najdôležitejším výstupom sú NDVI súbory doplnené o interpolované chýbajúce hodnoty.



**Obr. 2.** Grafické užívateľské menu software Phenological profile. Ukážka funkcionality pre interpoláciu chýbajúcich údajov.

Ďalším výstupom sú súbory s odhadnutými parametrami funkcie [1], t.j. parametre  $m_{1,2}$  a  $n_{1,2}$  kontrolujúce tvar a sklon krivky v jej nástupnej (jarnej) a zostupnej (jesennej) fáze. Parametre  $v_{min}$  a  $v_{amp}$ , ktoré zodpovedajú minimálnej hodnote vegetačného indexu (NDVI) a amplitúde sú odhadnuté z celoslovenských

údajov a nie sú predmetom štatistického výpočtu. Hornú hranicu strednej kvadratickej odchýlky interpolovanej funkcie (RMS) zadávame podľa nami zvolenej presnosti odhadu, ktorú chceme dosiahnuť. Skutočná RMS podľa jednotlivých obrazových prvkov je uložená v samostatnom výstupe. Do posledného výstupného súboru je uložený počet hodnôt, ktoré boli použité na interpoláciu krivky.



**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 ose x je uvedené poradové číslo dňa v roku.

NDVI využijeme k monitorovaniu odozvy lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prírodného prostredia ako biofyzikálnu premennú. Ročný priebeh NDVI modelujeme

pomocou sigmoidnej funkcie [1]. Pre tento účel sme vyvinuli samostatnú funkcionalitu, ktorá je súčasťou produktu Phenological profile. Funkcionalita na základe vstupných údajov (poradový deň v roku – Julian deň a NDVI) umožňuje odhadnúť parametre krivky danej funkciou [1], vypočíta hodnoty prvej až tretej derivácie krivky a krivosť krivky. Okrem toho umožňuje vizualizovať ich priebeh vrátane extrémov funkcií. Na obr. 3 je zobrazený vývoj vegetačného indexu NDVI a priebeh prvej a druhej derivácie vegetačnej krivky.

Odladením časových radov NDVI a odvodením extrémov vegetačnej krivky sme uzavreli problematiku získania vstupných údajov. Vytvorili sme potrebnú údajovú bázu pre následnú analýzu časových radov za obdobie 2000–2009. V ďalšom sa zameriame na výskum časovej a priestorovej premenlivosti NDVI a posúdenie trendov v tvare a priebehu vegetačnej krivky, a to najmä vo vzťahu k extrémom krivky.

## **ZÁVER**

V práci riešime problematiku tvorby údajovej bázy zo satelitných snímok MODIS pre potreby systému kontinuálneho a plošného sledovania odozvy lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prírodného prostredia pomocou biofyzikálnych charakteristík.

Prvá oblasť riešenia je zameraná na výber a analýzu kvality produktov MODIS. Výsledkom rozboru vhodnosti produktov MOD02, MOD09 a MOD43 bol výber produktu MOD09 „Spektrálna odrazivosť“. Pre analýzu kvality údajov využívame vrstvu kvality, ktorá je súčasťou produktu MOD09. Kvalitu hodnoty odrazivosti usudzujeme na základe hodnoty bitu v 16 bitovom priestore. Na základe tejto hodnoty sme navrhli optimálnu a akceptovateľnú kombináciu hodnôt jednotlivých bitov, ktoré sme uplatnili pri rozhodovaní o zaradení daného pixelu do analýzy alebo jeho vylúčení z analýzy. Ďalším kritériom pre výber snímky bola pozícia satelitu v čase snímania



nad našim územím. Vylúčené boli snímky snímané pod uhlom vyšším ako cca. 45°. Problém nahradenia hodnôt, ktoré nevyhoveli kritériám kvality riešime vlastným metodickým postupom, a to nahradením chýbajúcej hodnoty interpolovanou hodnotou. Interpolácie vykonávame na vegetačnom indexe NDVI, ktorý odvodzujeme z produktu MOD09. Využívame pritom reálne hodnoty NDVI časového radu. Interpoláciu sa robí pomocou sigmoidnej funkcie podľa vzťahu [1]. K tomuto účelu sme vyvinuli aplikáciu Phenological profile.

Predmetom ďalšieho výskumu bude vzťah extrémov vegetačnej krivky k terénnym pozorovaniam nástupu jednotlivých jarých a jesenných fenofáz a ku klimatickým údajom. Pôjde o modelovanie fenologického vývoja a hľadanie vzťahov medzi priebehom NDVI a klimatickými údajmi. Upravené časové rady NDVI budeme analyzovať v prostredí IDRISI Taiga Edition. Predpokladáme využitie jeho funkcionalít pre modelovanie časopriestorového vývoja NDVI, pre analýzu časových sérií a analýzu sezónnych výkyvov.

### ***Pod'akovanie***

*Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0670-07.*

## **LITERATÚRA**

- COOPS N.C., BLACK, T.A., JASSAL, R.S., TROFYMOW, J.A., MORGENSTERN, K., 2007: Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. *Remote Sensing of Environment*, 107, 385–401.
- DONG, J. et al., 2003: Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources, and sinks. *Remote Sensing of Environment*, 84, 393–410.

- FISHER, J. I., MUSTARD J.F., 2007: Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 109, 261–273.
- GOBRON N., B. PINTY, M. TABERNER, F. MÉLIN, M. M. VERSTRAETE & J.-L. WIDLOWSKI, 2005: Monitoring the Photosynthetic Activity of Vegetation from Remote Sensing Data. *Advances in Space Research*, doi:10.1016/j.asr.2003.07.079.
- HAZARIKA M., K., YASUOKA, Y., ITO, A., DYE, D., 2005: Estimating of net primary productivity by integrating remote sensing data with an ecosystem model. *Remote Sensing of Environment*, 94, 298–310.
- HILL, J.M., SENARATH, U., LEE, A., ZEPPEL, M., NIGHTINGALE, J.M., WILLIAMS, R.J., MCVICAR, T.R., 2006: Assessment of the MODIS LAI product for Australian ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 101, 495–518.
- HUNT, E. R. Jr., 1994. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 1725–1730.
- KANG, S. et al., 2003: A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: an application of MODIS leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 86, 232–242.
- TOWNSHEND, J. R. G. , HUANG, ., KALLURI, S. N. V. ., DEFRIES, R. S. ., LIANG, S. 2000: Beware of per-pixel characterization of land cover. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 21, no. 4, 839–843.
- TURNER D. P. et al., 2003: Scalling Gross Primary Production (GPP) over boreal and deciduous forest landscape in support of MODIS GPP product validation. *Remote Sensing of Environment*, 88, 256–270.
- WOLFE, E. R. et al., 2002: Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. *Remote Sensing of Environment*, 83, 31–49.

- ZHAO, M., HEINSCH, F.A., NEMANI, R. R., RUNNING, S. W.,  
2005: Improvements of the MODIS terrestrial gross and net  
primary production global data set. *Remote Sensing of  
Environment*, 95, 164–176.
- ZHANG, X., et al., 2003: Monitoring vegetation phenology using  
MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471–475.

## **VYUŽITIE VEGETAČNÉHO INDEXU NDVI ODVODENÉHO Z MODISU PRI FENOLOGICKÝCH POZOROVANIACH LESNÝCH PORASTOV**

### **UTILIZATION OF VEGETATION INDEX NDVI DERIVED FROM MODIS FOR PHENOLOGICAL OBSERVATION OF FOREST STANDS**

**Tibor Priwitzer<sup>1</sup>, Tomáš Bucha<sup>1</sup>, Milan Koreň<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Národné lesnícke centrum–Lesnícky výskumný ústav, T. G. Masaryka 22, 960 92 Zvolen,  
e-mail: [bucha@nlcsk.org](mailto:bucha@nlcsk.org)*

*<sup>2</sup>Technická Univerzita Zvolen – Lesnícka fakulta, T. G. Masaryka 24, 960 92 Zvolen,  
e-mail: [mkoren@vsld.tuzvo.sk](mailto:mkoren@vsld.tuzvo.sk)*

**Abstrakt:** V príspevku prezentujeme prvé výsledky súvisiace s odvodením a výpočtom biofyzikálnych charakteristík zo satelitných údajov zo spektorádiometra MODIS, ktoré budú použité v systéme kontinuálneho a plošného sledovania fenologických prejavov lesných ekosystémov. Riešená je problematika odvodenia ročného priebehu normalizovaného vegetačného indexu (NDVI) pomocou sigmoidnej logistickej krivky a analýzy vzťahov medzi priebehom fenologickej krivky a fenologickými pozorovaniami. Pre potreby modelovania a interpretácie priebehu fenologickej krivky využívame nami vyvinutý produkt Phenological profile.

**Kľúčové slová:** MODIS, lesnícka fenológia, NDVI

**Abstract:** The paper presents the first results from derivation and calculation of biophysical characteristics of forest ecosystems

derived from satellite data from spectroradiometer MODIS, which we utilize in the system for continuous evaluation of phenological phases of forest ecosystems. The solved problems are aimed at derivation of annual dynamic of Normalised difference vegetation index (NDVI) by using sigmoid curve and analysis of the curve course in relation to the observed phenophases. We developed the software product Phenological profile for modelling and interpretation of course of phenological curves.

**Keywords:** MODIS, forest phenology, NDVI

## ÚVOD A PROBLEMATIKA

Satelitné založené zisťovanie biofyzikálnych a štruktúrnych vlastností lesných porastov umožňuje prehĺbiť poznatky o reakcii lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prostredia. Vypustením družíc Terra a Aqua (NASA Earth Observation System Satellites) so spektorrádiometrom MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sa otvorili nové možnosti kontinuálneho a globálneho monitorovania charakteristík lesných ekosystémov, akými sú: Normalizovaný vegetačný index (NDVI), listový index (LAI), podiel fotosynteticky aktívnej radiácie pohltenej vegetáciou (FPAR). Uvedené charakteristiky sú dôležité identifikátory zdravotného a ekologického stavu lesa, a následne sú využívané ako vstupy do fenologického modelu (Zhang et al., 2003). Vychádza sa z overených poznatkov, že existuje úzky vzťah medzi ekofyziologickými meraniami (NDVI, LAI, FPAR) v lesných porastoch a odrazivosťou, meranou satelitnými senzormi (Shabanov, 2003, Gobron et al., 2005). Pre validáciu a parametrizáciu výstupov DPZ sa využívajú údaje a výsledky z terestrických meraní (Cohen et al., 2003). Existujúce MODIS produkty sú využiteľné predovšetkým pre potreby globálneho monitorovania Zeme. Regionálna premenlivosť monitorovaných

veličín nie je dostatočne zachytená a vysvetlená (Hill et al. 2006; Coops et al. 2007). Využitie globálnych MODIS produktov na regionálnej úrovni obmedzuje aj skutočnosť, že ich rozlišovacia schopnosť je vo väčšine prípadov 1 km. Pre uvedené sa javí validácia globálnych MODIS algoritmov, ich parametrizácia na regionálnej úrovni a tvorba regionálnych produktov s vyšším priestorovým rozlíšením ako veľmi aktuálna a potrebná.

Na Slovensku sa nevykonávajú kontinuálne celoplošné merania ekologických a produkčných charakteristík lesa. Údaje o stave lesa sú získavané výberovým spôsobom z monitoringu a inventarizácie lesov. Vzhľadom na uplatnenú intenzitu výberu je odvodenie spoľahlivých údajov na nižšej ako celoslovenskej úrovni problematické. Riešenie je možné cez integráciu existujúceho údajového spektra z terestrických zisťovaní s kontinuálne získavanými údajmi diaľkového prieskumu Zeme (DPZ). Jedným z hlavných cieľov riešenia je návrh systému kontinuálneho a plošného sledovania fenologických prejavov lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prostredia pomocou vegetačného indexu NDVI odvodeného zo satelitných údajov spektoradiometra MODIS. Záujmový región tvoria lesné porasty Slovenska. Predmetom analýz je časový rad NDVI z rokov 2000-2009.

Za základnú jednotku priestorového rozdelenia lesa, ku ktorej môžeme vzťahovať údaje odvodené z MODISu považujeme dielec. Jeho výmera (cca od 5 do 20 ha) približne korešponduje s veľkosťou obrazového elementu MODIS (6.25 ha).

## **MATERIÁL A METÓDY**

### **Výber a analýza kvality produktov MODIS a integrácia informačných zdrojov**

Satelit Terra a Aqua so spektoradiometrom MODIS prelietajú nad naším územím denne, pričom ho sníma v 36 spektrálnych kanáloch pri priestorovej rozlišovacej schopnosti (od 250 m do 1 km). Prístup k údajom je bezplatný. Riešenie

úlohy zakladáme na produkte MOD09, ktorý reprezentuje spektrálnu odrazivosť na povrchu terénu v 250 a 500 m priestorovej rozlišovacej schopnosti. Ide o denný produkt, na ktorom boli vykonané rádiometrické a atmosférické korekcie, t.j. eliminovaný je vplyv absorpcie a rozptylu žiarenia v atmosfére. Z produktu MOD09 odvádzame NDVI.

Pre analýzu kvality údajov využívame súbor kvality produktu, ktorý je súčasťou produktu MOD09. Súbor kvality produktu definuje kvalitu odvodenia hodnoty odrazivosti v obrazovom elemente (pixeli). Implementáciou poznatku o kvalite údaje do procesu tvorby údajovej bázy sme identifikovali nevyhovujúce obrazové prvky. Tieto hodnoty sme vylúčili z ďalšej analýzy.

### **Modelovanie fenologického vývoja lesných porastov**

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. Na 4 monitorovacích plochách dlhodobo sledujeme nasledovné fenologické fázy listnatých opadavých drevín: začiatok pučania, zalisťovanie (začiatok a všeobecné), jánске výhonky, letné žltnutie listov, jesenné žltnutie listov (začiatok a všeobecné), opad listov (začiatok a koniec). 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).

Za počiatkový deň fenologických pozorovaní v jednotlivých rokoch, je stanovený prvý apríl, pričom terestrické pozorovania sa vykonávajú buď v pravidelných dvojtýždňových intervaloch, alebo podľa dostupnosti TMP v intervaloch kratších. Za nástup fenofázy je považovaný deň, keď viac ako 50 % pozorovaných jedincov dosiahne danú fenofázu. Dĺžka trvania fenofázy je stanovená počtom dní medzi nástupom dvoch po sebe nasledujúcich fenofáz. Pozorovania sa vykonávajú individuálne,

pomocou ďalekohľadu. Na každej monitorovacej ploche sa hodnotí 10 úrovňových jedincov a to z drevín s najvyšším podielom zastúpenia. Do sledovania sú zahrnuté aj hodnotenia plochy ako celku. Do sledovania máme zahrnuté nasledovné listnaté opadavé dreviny: buk, dub, jaseň a javor. V roku 2009 boli za účelom detailnejšieho fenologického pozorovania založené štyri fenologické tranzекty a to v lokalitách: Čifáre, Turová, Pustý Hrad a Košice. Na tranzекtoch Turová a Košice sú sledované väčšie a súvislejšie komplexy bučín, na lokalite Čifáre sú to lesné porasty s dominanciou duba cerového a na lokalite Pustý Hrad sú hodnotené dubovo hrabové porasty s primiešaním buka, lipy a javorov. Jednotlivé tranzекty boli vytýčené v časti záujmového územia v dĺžke 500 m, na každom z uvedených tranzекtov sa nachádza rôzny počet pozorovacích stanovišť. Jednotlivé stanovištia sa nachádzajú od seba 30 - 60 m. Na každom stanovišti sa vykonáva hodnotenie jednotlivých vertikálnych zložiek lesného porastu v poradí: prízemná vegetácia (byliny, trávy, prirodzené zmladenie), podúroveň (podrast) a dreviny hlavnej úrovne. Z drevín hlavnej úrovne sa hodnotí vždy 10 najbližších stromov okolo stredového bodu stanovišťa.

Pod modelovaním fenologického vývoja lesných porastov rozumieme predikciu hlavných fenologických udalostí. V súčasnej etape riešenia analyzujeme možnosť opisu celoročného vývoja vegetačného indexu pomocou sigmoidnej logistickej krivky (Fisher, 2007).

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

Parametre  $v_{\min}$  a  $v_{\text{amp}}$  zodpovedajú minimálnej hodnote vegetačného indexu (NDVI) a amplitúde, parametre  $m_{1,2,3,4}$  kontrolujú tvar a sklon krivky v jej nástupnej (jarnej) a zostupnej (jesennej) fáze. Fenologickú krivku využijeme k odvodeniu dňa nástupu rozhodujúcich fenologických udalostí. Tieto sa odvodnia zo stanovenej krivky prostredníctvom výpočtu derivácií funkcie a jej krivosti. Fenologické pozorovania z TMP a tranzекtov



použijeme k overeniu hypotézy, že extrémne hodnoty (lokálne minimum a maximum) miery zmeny krivosti súvisia s nástupom jednotlivých fenologických udalostí.

## **PREDBEŽNÉ VÝSLEDKY A DISKUSIA**

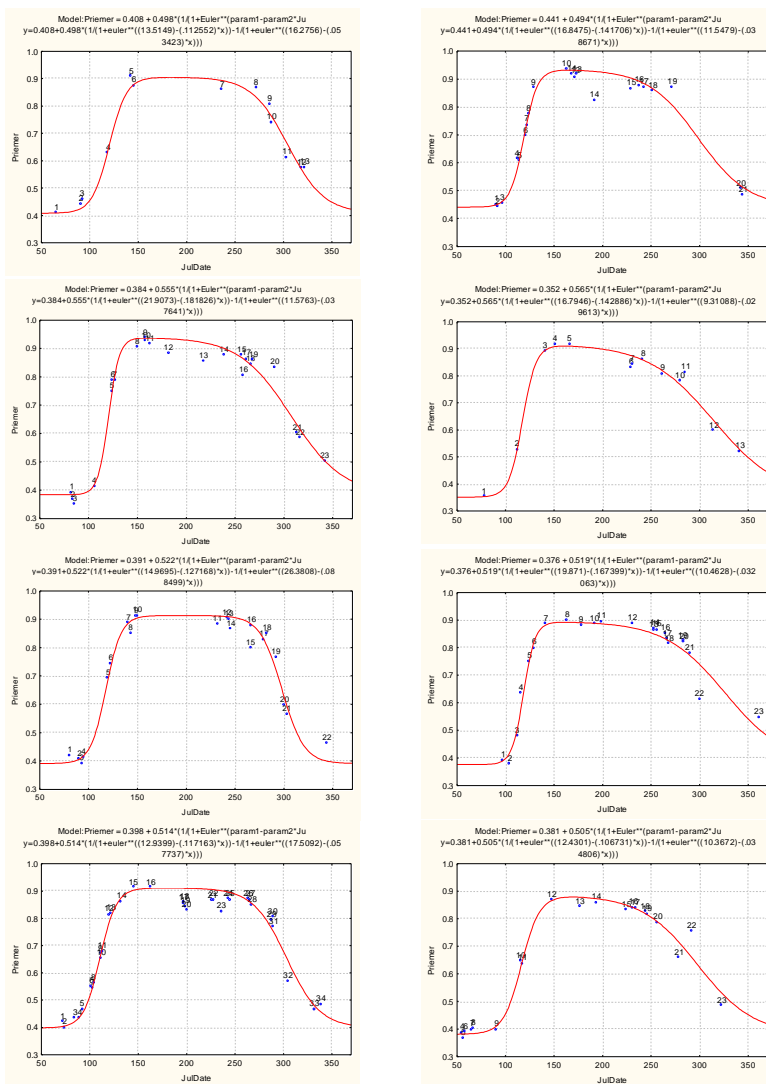
### **Výber a analýza kvality produktov MODIS a integrácia informačných zdrojov**

Predmetom posúdenie kvality boli jednotlivé satelitné snímky produktu MOD09, z ktorých odvádzame vegetačný index NDVI. Eliminovali sme obrazové prvky ovplyvnené oblačnosťou, tieňom z oblakov, väčším množstvom aerosólu. Zpracovaním poznatkov o kvalite údajov sme ďalej z analýzy vylúčili vodné plochy a pixely kde odrazivosť bola ovplyvnená snehovou pokrývkou. Za obdobie 2000–2009 máme v archíve uložených 266 snímok.

Okrem satelitných údajov MODIS sme zabezpečili prístup k potrebným validačným údajom. Zdrojom týchto údajov sú objekty dlhodobjšieho výskumu najmä trvalé monitorovacie plochy (TMP) monitorovacieho systému ČMS Lesy. Ide hlavne o údaje zo sledovania časového nástupu a priebehu jednotlivých fenologických fáz. K dispozícii sú aktuálne celoslovenské údaje z opisu porastov po základných jednotkách priestorového rozdelenia lesa (JPRL) v grafickej aj textovej podobe integrovaných v prostredí ArcGIS.

### **Modelovanie fenologického vývoja lesných porastov**

Na obr. 1 uvádzame priebeh NDVI v rokoch 2001 až 2008. NDVI sme odvodili z červeného a infačerveného kanála produktu MOD09. Výsledok sa vzťahuje na porasty s prevahou dreveniny dub cerový (*Quercus cerris* L.) z okolia trvalej monitorovacej plochy (TMP) Čifáre. Tvar krivky zohľadňuje oba základné stavy listnatých drevín, stav olistenia a stav po opade listov, a to prostredníctvom 6 parametrov. Podrobne je charakteristika použitej funkcie [1] vysvetlená v práci Fisher a kol. (2006, 2007).



**Ob. 1.** Vývoj vegetačného indexu NDVI odvodeného z MODIS-u (produkt MOD09) v rokoch 2001–2008 na súbore porastov v okolí TMP Čifáre. Na osi x je uvedené poradové číslo dňa v roku, na osi y priemerná hodnota NDVI odvodená zo získaných údajov MODIS.

Odvođená fenologická krivka je základom pre ďalšie analýzy, a to pre stanovenie nástupu jednotlivých fenofáz lesných drevín. V súčasnosti overujeme vzťah medzi hodnotami extrémov funkcií s pozorovaniami na trvalých monitorovacích plochách (tab. 3). Cieľom je preveriť možnosť využitia takto jednoznačne definovaných bodov, pri stanovení nástupu jednotlivých fenofáz. V ďalšom kroku ich plánujeme využiť ako indikátory pre posúdenie zmien vo fenológii porastov.

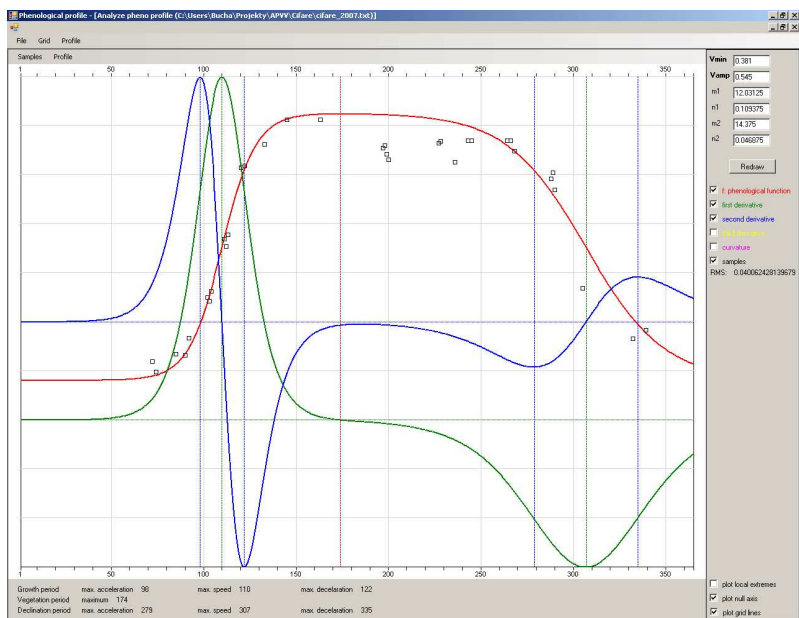
Z údajov uvedených na obrázku 1 a v tabuľke 3 je preukázateľný rôzny dátum nástupu jednotlivých fenologických fáz v jednotlivých rokoch. Priebeh jarných fenofáz je dominantne určený charakterom ukončenia zimy a nástupom jarného oteplenia, pričom priebeh počasia v jarnom období môže mať značne premenlivý charakter, kedy teplé periódy sú striedané s periódami chladu - vpády arktických vzduchových hmôt (Priwitzer a Mind'áš 1998). Škvareninová (2009) uvádza, že pri smreku súvisia rôzne začiatky nástupu fenofáz s teplotami vzduchu a dĺžkou trvania snehovej pokrývky.

Na obrázku 2 je zobrazený vývoj vegetačného indexu NDVI a priebeh prvej a druhej derivácie fenologickej krivky na príklade z roku 2007, a to vo vlastnom softvérovom produkte Phenological profile. Produkt na základe vstupných údajov (Julian deň a NDVI) umožňuje odhadnúť vstupné parametre fenologickej krivky danej funkciou [1], vypočíta hodnoty prvej a druhej derivácie fenologickej krivky a krivosť krivky. Okrem toho umožňuje vizualizovať ich priebeh vrátane extrémov funkcií.

Tab. 3 Fenologické fázy lesných drevín na TMP Čífare odsledované v rokoch 2001–2008. Drevina: dub cer

Rok	Začiatok pučania	Zalískovanie		Letné žltnut.	Žltnutie listov		Opad listov	
		začiatok	všeobecné		začiatok	všeobecné	začiatok	koniec
2001	25.4.	-	3.5.		25.9. (146)	26.10. (27)	26.10.	-
2002	26.4.	-	13.5.		11.10. (152)	23.10. (13)	11.10.	5.12. (56)
2003	17.4.	29.4. (13)	-		3.10.	17.10. (15)	3.10.	28.11. (57)
2004	16.4.	30.4. (15)	28.5. (29)		15.10. (141)	29.10. (15)	29.10.	26.11. (29)
2005	22.4.	29.4. (8)	27.5. (29)		30.9. (127)	14.10. (15)	28.10.	25.11. (29)
2006	21.4.	28.4. (8)	12.5. (15)		29.9. (140)	27.10. (29)	29.09.	24.11. (26)
2007	13.4.	27.4. (15)	11.5. (15)		12.10. (155)	26.10. (15)	26.10.	9.11. (15)
2008	25.4.	-	6.5.		9.10. (157)	23.10. (15)	23.10.	20.11. (29)

\* údaj v zátvorke je trvanie fenofázy (dni)



**Obr. 2.** Ukážka modelovania priebehu fenologickej krivky porastov duba cerového na modelovom území Čífare v roku 2007. Zobrazený je vývoj vegetačného indexu NDVI a priebeh prvej a druhej derivácie fenologickej krivky. Na osi x je uvedené poradové číslo dňa v roku. Softvérový produkt Phenological profile (© Milan Koreň)

Z porovnania fenologicky pozorovaného nástupu jarných fenofáz (tab. 3) s priebehom vegetačného indexu (NDVI) odvodeného so satelitných snímok MODIS (obr. 2) vyplýva, že NDVI sa začína zvyšovať o 6-7 dní skôr v rokoch 2004, 2006 a 23 až 26 dní skôr v ostatných sledovaných rokoch ako je pozorovaný začiatok pučania duba cerového (103 až 116 deň v roku). Vysvetľujeme to tým, že v podrade duba cerového sa hojne vyskytuje krovinná vegetácia, predovšetkým slivka trnková a zob vtáčí, ktoré pučia skôr ako dub cerový. Túto hypotézu sme overovali v roku 2009, kedy sme uskutočnili podrobné

pozorovania jednotlivých zložiek porastu na feno-tranzekte založenom pre tieto účely. Fenologické pozorovania začali (3.IV.2009 – 93 deň). Podrastová vegetácia bola len slabo rozvinutá, prípadne rozkvitnutá (drieň), nová bylenná a trávnatá zložka podrastu bola tak isto minimálne rozvinutá na všetkých sledovaných stanovištiach. Krivka NDVI v tomto období vykazovala vyrovnané hodnoty (NDVI 0,41 - 0,43).

Začiatok zalisťovania bol v jednotlivých rokoch zaznamenaný od 27.IV. do 30.IV. (117-120 deň v roku), pričom tento bod sa na fenologickej krivke nachádza za inflexným bodom. V tomto čase boli zaznamenané najmenšie rozdiely medzi vypočítanými a pozorovanými hodnotami. Na základe toho je možné vysloviť predpoklad, že v tomto prípade sa na hodnote NDVI prejavuje spektrálna odrazivosť už rozliseného hlavného porastu. Nástup fenofázy všeobecného zalisťovania bol v jednotlivých rokoch pozorovaný od 3.V. do 28.V. (od 123 do 149 dňa v roku) v tejto fenofáze dosahujú asimilačné orgány fyziologickú dospelosť, nakoľko sa veľkosť ich plochy stabilizuje. Na fenologickej krivke sa NDVI v tomto čase približuje k maximu svojej hodnoty. Z fenologických pozorovaní sa ukazuje, že listy boli plne vyvinuté skôr ako ukazuje NDVI. Rozdiely sa pohybovali od 7 až do 64 dní v jednotlivých rokoch. Touto skutočnosť sa bude potrebné v ďalšom období detailnejšie zaoberať.

Pokles hodnôt NDVI v priebehu vegetačnej sezóny (v čase plného zalistenia) je tiež stále predmetom skúmania. Tento pokles bol zaznamenaný v rokoch 2002, 2003 a 2007. Z fenologických pozorovaní nebolo zaznamenané letné žltnutie listov ani výrazné poškodenie asimilačného aparátu (napr. listožravým hmyzom) v sledovanej oblasti (Pavlenka a kol. 2008)

Jesenné žltnutie listov začínalo na sledovanom území od 25.IX. do 15.X.(268 – 289 deň v roku). Uvedenej skutočnosti zodpovedá modelovaná hodnota NDVI, ktorá je blízka hodnote 0,8. V porovnaní s maximálnou hodnotou NDVI je 0,1 nižšia. V grafe uvedenému dňu zodpovedá minimálnu hodnotu druhej derivácie. Nástup jesenných fenofáz najmä fázy žltnutia (úbytok

chlorofylu v listoch) viacerí autori spájajú s predchádzajúcim výskytom chladnejšieho a dostatočne vlhkého obdobia s výskytom zrážok (Haspelová-Horvatovičová 1981).

Za konečné fázy fenologického kalendára možno označiť začiatok opadu a úplný opad listov. Fenofáza začiatok opadu nastala od 29.IX. po 29.X.(279 - 314 deň v roku) a listy boli úplne opadnuté od 9. XI. až po 5.XII. (313 -340 deň). Vzhľadom na to, že NDVI mal naďalej klesajúci priebeh až do konca roku, možno opäť uvažovať s vplyvom krovinej vrstvy na jeho hodnotu.

Predmetom ďalšieho riešenia bude spresnenie interpretácie dní nástupu jednotlivých fenofáz, predovšetkým možnosti využitia extrémov funkcií a posúdenie vplyvu krovinej vegetácie na hodnotu NDVI.

## **ZÁVER**

V práci analyzujeme možnosti uplatnenia vegetačného indexu NDVI odvodeného z MODISu ako indikátora pre kontinuálne a plošné sledovania odozvy lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prírodného prostredia.

Prvá oblasť riešenia je zameraná na analýzu kvality produktu MOD09, ktorý bol vybraný ako optimálny pre odvodenie vegetačného indexu NDVI. Pre analýzu kvality údajov využívame vrstvu kvality. Na jej základe sme navrhli optimálnu kombináciu hodnôt jednotlivých bitov, ktorú sme uplatnili pri rozhodovaní o zaradení daného pixelu do analýzy alebo jeho vylúčení z analýzy.

Druhou oblasťou riešenia je 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], vypočíta hodnoty prvej až tretej derivácie fenologickej krivky a krivosť krivky. Hodnoty extrémov fenologickej krivky vzťahujeme k terénnym pozorovaniam

nástupu jednotlivých jarných a jesenných fenofáz. Výsledky z modelového územia Čifáre poukazujú na potrebu uvažovať s krovinnou a bylinnou vrstvou vegetácie pri vzájomnej interpretácii fenologickej krivky a fenologických pozorovaní a to z dôvodu možného ovplyvnenia odrazivosti touto vegetáciou.

### ***PodĎakovanie***

*Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0670-07*

### **LITERATÚRA**

- BRASLAVSKÁ, O., KAMENSKÝ, L., 1996: Fenologické pozorovanie lesných rastlín. Metodický predpis. SHMÚ Bratislava, 22 s.
- COHEN, W. B. et al., 2003: Comparisons of land cover and LAI estimates derived from ETM+ and MODIS for four sites in North America: a quality assessment of 2000/2001 provisional MODIS products. *Remote Sensing of Environment*, 88, 233–255.
- COOPS N.C., BLACK, T.A., JASSAL, R.S., TROFYMOW, J.A., MORGENSTERN, K., 2007: Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. *Remote Sensing of Environment*, 107, 385–401.
- FISHER, J. I., MUSTARD J.F., 2007: Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 109, 261–273.
- GOBRON N., B. PINTY, M. TABERNER, F. MÉLIN, M. M. VERSTRAETE & J.-L. WIDLOWSKI, 2005: Monitoring the Photosynthetic Activity of Vegetation from Remote Sensing Data. *Advances in Space Research*, doi:10.1016/j.asr.2003.07.079.
- GOWARD, S. N., TUCKER, C. J., DYE, D. G. 1985. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7



- Advanced Very High Resolution Radiometer. *Vegetatio*, 64, 3–14.
- HASPELOVÁ-HORVATOVIČOVÁ, A., 1981: Asimilačné farbivá v zdravej a chorej rastline. *Veda*, Bratislava, 308 s.
- HILL, J.M., SENARATH, U., LEE, A., ZEPPEL, M., NIGHTINGALE, J.M., WILLIAMS, R.J., MCVICAR, T.R., 2006: Assessment of the MODIS LAI product for Australian ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 101, 495–518.
- KANG, S. et al., 2003: A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: an application of MODIS leaf area index *Remote Sensing of Environment*, 86, 232–242.
- PAVLENDA, P., PAJTÍK, J., ĎURKOVIČOVÁ, J., IŠTOŇA, J., LEONTOVÝČ, R., PAVLENDOVÁ, H., PRIWITZER, T., RAŠI, R., STANČIKOVÁ, A., TÓTHOVÁ, S., VODÁLOVÁ, A., 2008: Monitoring lesov Slovenska. *Forest Focus, ČMS Lesy 2007*. 1. vyd. Zvolen : NLC, 122 s. ISBN 978-80-8093-057-8
- 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., MINDÁŠ, J., 1998: Výsledky fenologických pozorovaní lesných drevín v rokoch 1993 - 1997 na lokalite Poľana - Hukavský grúň. *Vedecké práce LVÚ, zv. 42., LVÚ Zvolen - SAP Bratislava*, s. 17-32
- SHABANOV, N.V. et al., 2003: Effect of foliage spatial heterogeneity in the MODIS LAI and FPAR algorithm over broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment*, 85, 410–423.
- ŠKVARENINOVA, J., 2009: Priebeh vegetatívnych fenologických fáz autochtónnych populácií smreka obyčajného (*Picea abies* L.) zo Slovenska. *Lesnícky časopis – Forestry Journal*, 55 (1), s. 13–27.
- ZHANG, X., et al., 2003: Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84, 471–475

## ODVODENIE INDEXU LISTOVEJ PLOCHY Z MODISU

**Hana Pavlendová, Ivan Barka, Tomáš Bucha, Tibor Priwitzer**

*Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav Zvolen,  
T. G. Masaryka 22, 96001 Zvolen, [pavlendova@nlcsk.org](mailto:pavlendova@nlcsk.org)*

### **Abstrakt**

Príspevok sa zaoberá metódami zisťovania indexu listovej plochy (LAI) so zameraním na odvodzovanie LAI s využitím metód diaľkového prieskumu Zeme. Priestorové údaje o LAI sa pre lesné porasty Slovenska odvodzujú s využitím satelitných snímok spektorradiometra MODIS umiestneného na obežných družiciach Terra a Aqua. V rámci projektu sú v súčasnosti stiahnuté a spracované hotové produkty MOD15A2 LAI/FPAR s 1 km rozlišovacou schopnosťou a 8-dňovým krokom. Zároveň je za účelom validácie satelitných metód vykonaná prvá časť terestrického zisťovania LAI vo vybraných modelových územiach. Predbežné výsledky naznačujú nadhodnotenie LAI odvodeného z MODISu v porovnaní s terestrickými meraniami. V práci sú diskutované možnosti odvodenia LAI s rozlišovacou schopnosťou 250 m v rámci ďalšej fázy riešenia projektu.

**Kľúčové slová:** index listovej plochy LAI, lesné ekosystémy, MODIS, hemisférická fotografia

### **Abstract**

This paper deals with methods of assessment of leaf area index (LAI) with focusing on retrieval of LAI from remote sensing data. The spatial distribution of LAI is derived from multiband images of spectroradiometer MODIS located on satellites Terra and Aqua. All available data of product MOD15A2 LAI/FPAR at 8-day basis and 1 km resolution were collected and basic

procession was done. The first part of ground measurement of LAI was done in 2009 within selected study areas for validation of satellite derived data. The first results showed overestimation of LAI retrieved from MODIS in comparison to ground measurements. The possibility of LAI derivation at resolution of 250 m within the next phase of project solution is discussed here.

**Keywords:** leaf area index LAI, forest ecosystems, MODIS, hemispherical photography

## ÚVOD

Index listovej plochy LAI (leaf area index), je pomer celkového vrchného povrchu listovej plochy delený povrchom zeme na ktorej vegetácia rastie. LAI je bezrozmerná jednotka, s typickými hodnotami od 0 pre holý povrch bez vegetácie do 6 pre hustý les.

Index listovej plochy je parameter, ktorý dáva jedinečnú charakteristiku porastu najmä z hľadiska jeho produkčného potenciálu a ukazovateľa schopnosti prijímať CO<sub>2</sub> a iné plyny, transpirovať vodnú paru a podobne. Z tohoto dôvodu je často podstatným parametrom vstupujúcim do mnohých produkčných a bilančných modelov (produkcia biomasy, toky CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, emisie BVOC, vodná bilancia porastu a pod.).

V lesníctve je LAI často definované ako povrch jednej strany zelených listov na jednotku plochy pre listnaté porasty. Pre ihličnaté porasty je stanovenie LAI zložitejšie a bývajú používané tri nasledovné definície:

- celkový povrch ihlíc na jednotku plochy
- celkový povrch ihlíc na jednotku plochy delený dvoma
- premietnutá plocha ihlíc na jednotku plochy

Posledná definícia sa v súčasnosti čoraz častejšie využíva i pri stanovovaní LAI pre listnaté porasty, vzhľadom k tomu, že vyššie spomenutá definícia pre listnaté porasty sa dá využiť iba za predpokladu, že všetky listy v poraste sú v horizontálnej polohe, čo väčšinou nie je splnené. V súčasnosti i väčšina metód

používaných na stanovovanie LAI (nedeštruktívne metódy) vychádza z premietnutej plochy asimilačných orgánov na jednotku zemského povrchu. Často je označovaná aj ako PLA (projected leaf area). Pri optických metódach na stanovovanie LAI sa stretávame s pojmom LAI<sub>e</sub>, efektívny index listovej plochy, čo je vlastne premietnutá plocha všetkých vegetačných súčastí (listy, stonky, konáre...).

Okrem indexu listovej plochy sa v lesníctve často využíva vegetačný index VAI, VI (vegetation area index, vegetation index), niekedy označovaný aj ako index rastlinnej plochy PAI (plant area index), ktorý okrem listovej plochy zahŕňa premietnutú plochu všetkých vegetačných súčastí (stonky, drevo).

### **Metódy používané na stanovovanie LAI**

V zásade rozoznávame priame a nepriame metódy na stanovovanie indexu listovej plochy.

Priame metódy sa ďalej delia na deštruktívne – stanovovanie LAI zo štatisticky významného počtu *vzorníkových stromov* (táto metóda je však extrémne prácna a náročná na čas) a nedeštruktívne, medzi ktoré zaraďujeme *zber opadu* do tzv. lapačov opadu (opadomerov). Táto metóda je však vhodná iba pre listnaté porasty a neumožňuje sledovať sezónnu dynamiku LAI.

Nepriame metódy delíme na kontaktné a nekontaktné.

Medzi kontaktné patria *alometrické metódy* (stanovujú LAI na základe vzťahu medzi listovou plochou a iného parametra rastliny, napr. hrúbka, výška, nasadenie koruny a pod., tento vzťah je však špecifický pre rôzne typy porastov) a *metóda šikmého bodového kvadrátu* (inclined point quadrates), ktorá je založená na meraní počtu dotykov listov s dlhou tenkou ihlou pod určitým známym uhlom. Táto metóda je vhodná iba pre nižšie porasty (poľnohospodárske plodiny, lúky, príp. mladé porasty). V súčasnosti sa táto metóda zdokonalila využitím *laserového lúča*, avšak prístroj na zisťovanie LAI takýmto spôsobom je pre bežné použitie v lesníctve finančne náročný (napr. ILRIS 3D).

Medzi nepriame nekontaktné metódy patria *optické metódy* na stanovovanie LAI. Sú založené na určení množstva svetla

penikajúceho pod korunovú úroveň, a teda množstva radiácie pohltenej vegetáciou. Na optickom princípe je založených niekoľko komerčne vyrábaných prístrojov, napr. DEMON (meria prienik priameho slnečného lúča cez vegetáciu), Ceptometer (meria podiel slnečných škvŕn, alebo množstvo preniknutého fotosynteticky aktívneho žiarenia), LAI 2000 (meria difúzne žiarenie v sústredených kruhoch s rôznym uhlom, porovnáva s nadkorunovou úroňou), TRAC (meria nielen podiel medzier v korunovej vrstve ale aj ich distribúciu, umožňuje sledovať aj architektúru koruny), hemisférická fotografia (tzv. fish-eye, rybie oko, princíp zisťovanie podielu medzier v korunovej vrstve, môže byť použitá smerom hore – koruna, ale aj smerom dole – prízemná vegetácia, nevyžaduje porovnávacie meranie nad korunovou úrovňou, obraz zostáva permanentne zaznačený pre budúce porovnanie) a *hybridné metódy* (napr. MVI multiband vegetation imager, zaznamenáva obraz v dvoch rôznych spektrách elektromagnetického žiarenia, je schopný odlíšiť podiel zelenej asimilujúcej plochy).

Samostatnou metódou, ktorú však možno zaradiť medzi nepriame nekontaktné metódy je stanovenie LAI pomocou metód DPZ (satelitné snímky s vysokým a stredným priestorovým rozlíšením v rôznych spektrách elektromagnetického žiarenia). Validácia údajov získaných zo satelitných snímok však musí byť vykonaná pomocou terestrických metód (Bréda 2003).

### **Algoritmus odvodzovania LAI z MODISu**

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) je spekrorádiometer umiestnený na palube družíc Terra a Aqua. Sníma odraznosť zemského povrchu v rôznych kanáloch spektra. Na základe tejto odraznosti EOS (Earth Observing System) produkuje širokú škálu biofyzikálnych produktov, ktoré sú dostupné v rôznom stupni priestorového rozlíšenia (250 m až 1 km) prostredníctvom systému DAAC (Data Active Archive Centre).

Index listovej plochy (LAI) a frakcia fotosynteticky aktívneho žiarenia pohltenej vegetáciou (FPAR) sú súčasťou

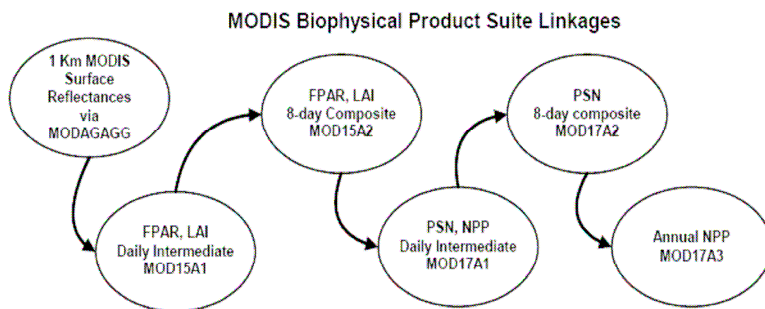
základného produktu MODISu MOD15A2, ktorý je v 1 km rozlíšení poskytovaný pre 8-dňový cyklus. LAI definuje dôležitú štruktúrálnu vlastnosť porastu, ktorou je plocha jednej strany listu na jednotku plochy. FPAR meria podiel dostupného žiarenia v pásme fotosynteticky aktívnej vlnovej dĺžky (0,4-0,7 mm) absorbovaného porastom. LAI a FPAR sú biofyzikálne premenné, ktoré opisujú štruktúru porastu a sú spojené s cyklami výmeny energií a hmoty. Obidve hodnoty, LAI a FPAR sú široko používané ako satelitne odvodené parametre na priestorové modelovanie fotosyntézy, evapotranspirácie a ročnej čistej primárnej produkcie.

**Tab. 1.** MOD15A2 FPAR, LAI 8 dňové vstupy

Vstup	ESDT	Použité premenné
Agregovaná 1 km povrchová odraznosť	MODAGAGG	<b>Surface_refl.</b> Povrchová odraznosť pre kanály 1, 2 (3, 4, 5, 6, 7). Pozn.: kanály tučným sú používané teraz, a kanály v zátvorkách znamenajú potenciálne pásy ešte nevyužívané v produkcii. <b>Angles.</b> Uhly (v stupňoch) pre senzory a solárny azimut a uhly zenitu z každého pásu).
Globálna 1 km štvrťročná definícia klasifikácie pôdneho krytu	MOD12Q1	<b>Land_Cover_Type_3</b> , 6-biómový vegetačný kryt používaný v kolekcii 4, 8-biómový v kolekcii 5 . V kolekcii 1 – 3 <b>Land_Cover_Type_1</b> bola použitá IGPB klasifikácia premostená na 6 biómov.
Pomocné údaje	MOD15 Anc_RIx.hdf	Lookup tables (LUT) koeficientu radiatívneho transferu, LUT záložného algoritmu a výstupy vlastností premenných.

Algoritmus pozostáva z radu úkonov, ktorý využíva súbor informácií o povrchovej odraznosti získanej z MODISu v rôznych častiach spektra (potenciálne využitie až 7 pásov). Družica pokryje celú Zem v priebehu 8 dní. Výsledkom sú odraznosti v rôznych uhloch, polohách slnka a pásoch viditeľného spektra pre každý pixel. Trojúrovňová (trojdimenzionálna) formulácia LAI/FPAR inverzného problému sprevádza celý postup. Algoritmus vyžaduje klasifikáciu vegetačného krytu. Takže algoritmus má prepojenie na produkty MODISu MODAGAGG (agregovaná povrchová odraznosť – surface reflectance) a MODQ12Q1 (vegetačný kryt – Land Cover Product). Parametre priepustnosti, odraznosti a pohltivosti jednotlivých typov porastu a pôd pre výpočet sú uložené v tzv. LUT (Look Up Table). Prehľad požadovaných vstupov algoritmu na odvodenie LAI a FPAR je v tabuľke 1.

Biofyzikálne produkty MODISu sa vyznačujú tesnou vzájomnou prepojenosťou. Vysoká úroveň prepojenia biofyzikálnych produktov MODISu je ilustrovaná na obr. 1.



**Obr. 1** Ukážka prepojenosti biofyzikálnych produktov MODISu

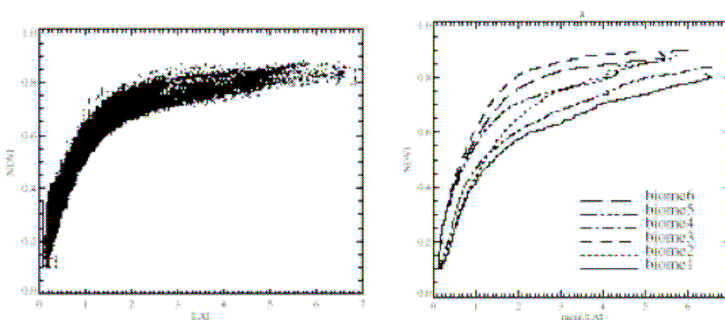
Algoritmus porovnáva pozorované a modelované odraznosti porastu pre typ štruktúry porastu a pôdnych typov, ktoré reprezentujú rozsah očakávaných prírodných podmienok. Všetky typy porastu/pôdy, pre ktoré sa modelované a pozorované hodnoty odrazností BRDF (bidirectional reflectance distribution function) líšia nanajvýš do hodnoty korešpondujúcej neistoty, sú

považované za prijateľné riešenia. Priemerná hodnota LAI a FPAR je získaná spriemerovaním všetkých prijateľných riešení (vážený priemer v súlade s frekvenciou výskytu danej hodnoty), veľkosť rozptylu indikuje spoľahlivosť (Myneni et al. 2003, Knyazikhin et al. 1999, Knyazikhin et al. 1998).

Väčšinou nie je možné využiť na odvodenie LAI všetky údaje (napr. kvôli výskytu oblačnosti). V prípade, že zlyhá hlavný algoritmus, spúšťa sa záložný algoritmus na odhad LAI a FPAR, ktorý využíva vegetačné indexy. Predpokladá, že index listovej plochy je funkciou vegetačného indexu [1].

$$\text{LAI} = f(\text{NDVI}) \quad [1]$$

Záložný algoritmus odvodí LAI a FPAR z priamej závislosti od NDVI, odvodenej pre všetky typy biómov (6 typov biómov pre kolekciu 4, 8 pre kolekciu 5) (Obr. 2).



**Obr. 2** Odvodenie závislosti LAI na NDVI pre rôzne typy biómov (Knyazikhin et al. 1999)

## MATERIÁL A METÓDY

### Údaje z diaľkového prieskumu Zeme

Ako základný vstup bol použitý hotový produkt LAI z MODISu v rozlíšení 1 x 1 km. Jedná sa o produkt MOD15A2, s 8 dňovým krokom, jeho súčasťou je 6 vrstiev údajov:



- FPAR – frakcia fotosynteticky aktívneho žiarenia (validácia úroveň 1)
- LAI – index listovej plochy (validácia úroveň 2)
- FPAR\_LAI\_QC – kontrola kvality, základná údaje o kvalite
- FparExtra\_QC – kontrola kvality, podrobné údaje o kvalite
- FparStDev – smerodajná odchýlka FPAR
- LaiStDev – smerodajná odchýlka LAI

Ďalšími vstupmi z MOSISu využitými v rámci riešenia časti projektu týkajúcej sa indexu listovej plochy budú normalizovaný vegetačný index (NDVI, MOD09) a klasifikácia biómov (Land Cover Type, MOD12).

### **Drevinové zloženie**

Kvôli určeniu rozdielov v závislosti indexu listovej plochy od vegetačného indexu pre rôzne drevinové druhy bolo vypočítané priemerné zastúpenie hlavných druhov drevín (bk, db, hb, sm, bo) pre jednotlivé bunky rastra (1 km). Drevinové zloženie bolo odvodené z porastovej mapy lesných porastov Slovenskej republiky, ktorá obsahuje údaje z LHP (lesných hospodárskych plánov) pre jednotlivé JPRL.

### **Terestrické merania**

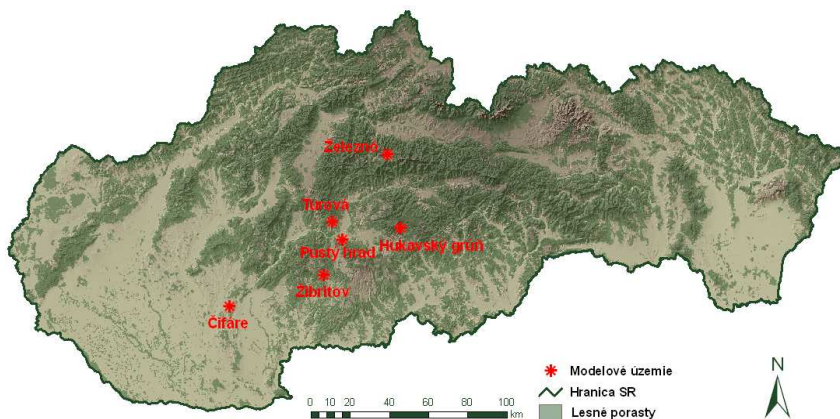
Na validáciu LAI odvodeného zo satelitných snímok budú využité vlastné terestrické merania na vybraných modelových územiach (tri tranzekty a merania na existujúcich jadrových plochách intenzívneho monitoringu). Modelové územia boli vybrané tak, aby porasty v rámci bunky rastra s 1 km rozlíšením (zhodným s rastrom 1 km produktov MODISu) boli čo najhomogénnejšie z hľadiska drevinového zloženia a štruktúry porastov (homogenita bola hodnotená s využitím leteckých snímok, porastových máp a vegetačného indexu s rozlíšením 250 m). Na základe týchto kritérií bolo na merania LAI vybraných päť existujúcich trvalých monitorovacích plôch (TMP) (plochy intenzívneho monitoringu projektu FutMon) a založené tri nové

tranzekty v rámci celkovo šiestich modelových území (Tab. 2). Na obrázku 3 je znázornená mapa s prehľadom modelových území v rámci Slovenskej republiky.

**Tab. 2** Prehľad modelových území na terestrické zisťovanie indexu listovej plochy

Modelové územie	Prevládajúce dreviny	Tranzekt	TMP
Pustý hrad	db, bk, hb	■	
Čifáre	cr	■	■
Turová	bk	■	■
Žibritov	db		■
Poľana	bk, sm, jd		■
Železnô	sm		■

Pozn.: Modelové územie Poľana nespĺňa kritérium homogenity, bolo zahrnuté na základe drevinového zloženia (typická karpatská zmes).



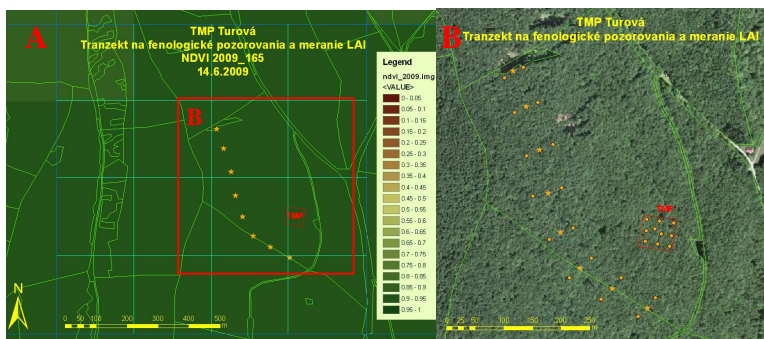
**Obr. 3** Prehľad modelových území v rámci Slovenska

Na meranie LAI bola použitá metóda hemisférickej fotografie, s následným spracovaním snímok v prostredí GLA (Gap Light Analyzer).

Minimálny počet meracích stanovišť v rámci tranzektov 16 bol určený na základe predpokladanej variability hodnôt LAI

s využitím rovnice na odvodenie minimálneho rozsahu výberu (Šmelko 1991) pre chybu nepresahujúcu 10 % so spoľahlivosťou 95 %. Počet meracích stanovišť na TMP bol 10, resp. 16 (10, resp. 40 na TMP Poľana), v súlade s manuálom FutMon (FutMon 2009).

Príklad rozmiestnenia meracích stanovišť v rámci modelového územia Turová je znázornený na obrázku 4.



**Obr. 4** Modelové územie Turová. Časť A znázorňuje variabilitu NDVI na pozadí siete 1 km (tmavomodrá) a 250 m (svetlomodrá), časť B znázorňuje detailné rozmiestnenie meracích stanovišť v rámci modelového územia na pozadí leteckej snímky.

Na všetkých tranzektoch a na TMP Čifáre, Turová a Žibritov merania prebiehali vo viacerých termínoch počas vegetačnej sezóny, aby sa zachytil ročný chod LAI, na ostatných TMP meranie prebehlo jednorázovo (s jedným, max. dvoma kontrolnými meraniami), aby sa zistil údaj o maximálnom LAI.

## PREDBEŽNÉ VÝSLEDKY A DISKUSIA

### Stav riešenia problematiky

V prvej fáze riešenia projektu boli pre územie SR stiahnuté všetky dostupné údaje produktu MOD15A2 (LAI a FPAR), údaje sú dostupné v 8-dňovom kroku za obdobie VI/2002 – X/2009 vo formáte \*.hdf (high definition feature) v sinusoidálnej projekcii.

Z týchto súborov boli vyextrahované požadované vrstvy, bola vykonaná projekcia do S-JTSK a následne boli orezané na požadovaný rozmer. Za týmto účelom bol vytvorený skript, pomocou ktorého základné spracovanie údajov prebiehalo automatizovane v prostredí ArcInfo.

Produkt LAI verzie 5 MODISu je validovaný na úroveň 2, t.j. bol overený na rozsiahlom súbore lokalít s využitím viacerých prístupov. Produkt FPAR verzie 5 MODISu je validovaný na úroveň 1, t.j. bol overený na vybranom súbore lokalít. Obidva súbory údajov sú však vo formáte vhodnom na ďalšie vedecké použitie.

Pre jednotlivé bunky rastra (zhodného s vrstvou LAI) bolo vypočítané priemerné zastúpenie hlavných druhov drevín (bk, db, hb, sm, bo), s využitím údajov o drevinovom zložení jednotlivých JPRL v databáze NLC. Drevinové druhy boli rozdelené na základe rozdielov v hodnotách odraznosti jednotlivých druhov zisťovanej na tréningových plochách (Bucha 1999).

Bola vytvorená vrstva údajov, pre ktorú sa okrem zastúpenia vybraných drevín generalizujú hodnoty NDVI z rozlíšenia 250 na 1 km, odvodené z produktu MOD09 s jednoduchým krokom pre všetky snímky s dobrou kvalitou údajov.

V priebehu vegetačnej sezóny 2009 bola vykonaná séria meraní LAI na založených tranzektoch a existujúcich TMP. Pre každú plochu a termín merania bola získaná sada hemisférických digitálnych fotografií s rozlíšením 12 Mpix (4-8 snímok na jedno stanovište, s fixnou clonou 5,6 a rôznou dobou expozície v závislosti od svetelných podmienok). Vzhľadom na vysokú časovú náročnosť na post-processing snímok, ešte stále postupne prebieha spracovanie jednotlivých meraní. V súčasnosti sú spracované merania z modelových území Pustý hrad a Turová, čiastočne Čifáre a Žibritov za rok 2009. V prostredí GLA (Gap Light Analyzer) boli odvodené hodnoty LAI<sub>e</sub> (efektívny index listovej plochy), zahŕňajúci všetky vegetačné súčasti (vrátane

drevných častí). Merania poskytujúce údaje nevyhnutné pre výpočet podielu drevnej hmoty bude potrebné vykonať v období mimo vegetačnej sezóny.

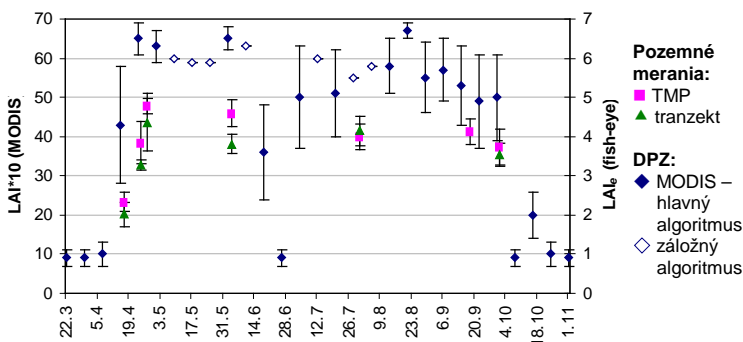
### **Predbežné výsledky**

Vzhľadom k tomu, že projekt je iba v štádiu riešenia, spracovanie získaných údajov je časovo veľmi náročné a v rámci doterajšieho riešenia nemáme k dispozícii všetky vstupné údaje pre odvodenie a validáciu LAI pre lesné ekosystémy Slovenska, v nasledujúcej časti prezentujeme iba čiastočné výsledky riešenia na príklade modelového územia Turová pre rok 2009.

Hlavným drevinovým druhom na lokalite Turová je buk lesný (*Fagus sylvatica* L.), so zastúpením 95 %. Na tejto lokalite bol na základe hodnôt indexu listovej plochy odvodených z MODISu zistený začiatok vegetačnej sezóny v termíne od 7.4.2009, zalíšovanie bolo ukončené 23.4.2009. Hodnoty LAI dosahovali počas vegetačnej sezóny vyrovnanú hodnotu, mierny pokles bol zaznamenaný na prelome júla a augusta, kedy počas vegetačnej sezóny dochádza v dôsledku sucha, žeru listožravého hmyzu, prípadne iných biotických a abiotických faktorov k čiastočnej strate asimilačných orgánov. Pokles hodnôt LAI sa potom mierne zrýchlil v priebehu septembra, kedy už často nastáva predčasná zmena sfarbenia a strata asimilačných orgánov. Výrazné zmeny sfarbenia a strata asimilačných orgánov (jesenné fenofázy) však nastala až na prelome septembra a októbra, na základe údajov z MODISu táto fáza prebiehala od 30.9.2009 do 24.10.2009.

Terestrické merania indexu listovej plochy na tranzekte a TMP modelového územia Turová prebiehali vo viacerých termínoch počas vegetačnej sezóny. Vzhľadom k tomu, že ešte neboli vykonané doplnkové merania, na základe ktorých sa získaná hodnota upraví o podiel plochy drevných súčastí ( $\alpha$ ), ktorý výslednú hodnotu zníži a index zhlukovania ( $\Omega$ ), ktorý výslednú hodnotu zvýši, uvádzame v nasledujúcom texte hodnotu efektívneho indexu listovej plochy LAI<sub>e</sub>, ktorá je plochou všetkých vegetačných súčastí.

Hodnoty  $LAI_e$  zistené pozemnými meraniami majú zhodný priebeh s hodnotami odvođenými zo satelitných snímok, zistili sme však medzi nimi štatisticky významné rozdiely. Index listovej plochy zistený pozemnými meraniami dosahoval hodnoty nižšie o 16 – 53 % v jednotlivých termínoch merania (v absolútnych hodnotách rozdiel 0,8 – 3,2  $m^2 \cdot m^{-2}$ ), v priemere na TMP o 29 % a 38 % na tranzekte. I v prípade využitia korekčného faktora, ktorým sa prepočítava  $LAI_e$  na skutočný LAI, je pre drevinu buk malý predpoklad, že LAI zistené terestrickými meraniami dosiahnu také vysoké hodnoty, ako LAI odvođené z MODISu (Bréda 2003). Nadhodnotenie LAI odvođeného z MODISu pre rôzne typy lesných ekosystémov bolo uvedené už v predchádzajúcich prácach (Wang et al. 2004, Fang et al. 2005). Toto sa čiastočne podarilo odstrániť úpravami algoritmu, zvýšením počtu biómov zo 6 na 8 typov a zjemením parametrov v LUT (Shabanov et al. 2007). Porovnanie priebehu hodnôt LAI odvođených z MODISu a zistených pozemnými meraniami v roku 2009 v modelovom území Turová je znázornený na obrázku 5.



**Obr. 5** Priebeh hodnôt indexu listovej plochy na lokalite Turová počas vegetačnej sezóny roku 2009 odvođených pomocou metód diaľkového prieskumu Zeme (MODIS) a terestrickými meraniami (hemisférická fotografia)

Vyššie uvedené údaje sú v súlade s fenologickými pozorovaniami na lokalite Turová (nepublikované), kedy bolo pučanie buka zaznamenané 14.4.2009, začiatok zalisťovania 17.4.2009 a plné olistenie 24.4.2009. Mierny posun termínov v porovnaní s údajmi MODISu mohol byť spôsobený jednak 8-dňovým krokom produktu LAI, jednak skorším nástupom prízemnej vegetácie oproti stromovej úrovni. Termíny jesenných fenofáz na tejto lokalite sa takisto zhodujú s pozorovanými hodnotami LAI z MODISu. Začiatok žltnutia bol pozorovaný 5.10.2009, začiatok opadu 19.10.2009, 100 % žltnutie 2.11.2009 a úplná strata asimilačných orgánov 18.11.2009. Z hľadiska indexu listovej plochy, ktorý je hodnotou povrchu zelenej časti vegetačných súčastí, môže byť za koniec vegetačnej sezóny považovaná úplná zmena sfarbenia asimilačných orgánov.

### **Ďalší postup riešenia**

Pri odvodení LAI a FPAR z MODISu sa vychádza z klasifikácie krajiny do 8-ich biómov, ktoré sú definované súborom štrukturálnych charakteristík uložených v LUT, pre lesné porasty sú definované 4 typy biómov (listnaté stálezelené, listnaté opadavé, ihličnaté stálezelené, ihličnaté opadavé), z toho lesných porastov na území Slovenska sa týkajú 2, čiastočne 3 typy. Táto klasifikácia je možným prvým zdrojom nepresnosti odvodenia LAI a FPAR.

Ďalšími zdrojmi neistoty sú kvalita odvodenia vstupných údajov. Pre správnu interpretáciu údajov bude nevyhnutná dôsledná analýza vrstvy kvality vo vybranom produkte MODISu. Z dôvodu zvýšenia kvality vstupných údajov pre zisťovanie závislosti LAI/FPAR od NDVI budeme využívať hodnoty NDVI odvodené s jednodňovým krokom z produktu MOD09 pre dni s vysokou kvalitou snímok (nízka oblačnosť, resp. bez iných atmosférických vplyvov) agregované do 1 km rastra.

Na základe zistenej korelácie LAI a NDVI pre jednotlivé drevinové druhy, resp. typy porastov sa odvodí hodnoty LAI a FPAR na rozlišovacej úrovni 250 m.

Na interpoláciu chybných a chýbajúcich údajov uvažujeme s overením možnosti využitia fenologického modelu Phenological Profile, keďže priebeh LAI počas sezóny má tvar rovnaký ako priebeh NDVI.

## **ZÁVER**

Odvodenie indexu listovej plochy (LAI) pre lesné ekosystémy na území Slovenska sa vykonáva v rámci projektu Satelitné sledovanie odozvy lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prostredia. Ako základný vstupný zdroj údajov je využitý produkt MODISu MOD15A2 (LAI/FPAR) s 1 km rozlišovacou schopnosťou a 8-dňovým krokom. Všetky dostupné súbory tohto produktu sú v súčasnosti stiahnuté a spracované tak, aby mohli byť priamo využité pre ďalší výskum.

Na validáciu LAI odvodeného zo satelitu sú využívané terestrické merania zo súboru šiestich modelových území. V prvom roku merania bola vykonaná séria meraní zachytávajúcích priebeh hodnôt LAI počas vegetačnej sezóny v štyroch modelových územiach a maximálnu hodnotu LAI pre ostatné modelové územia.

Predbežné výsledky z modelového územia Turová, ktoré máme k dispozícii, naznačujú zhodný priebeh hodnôt LAI odvodených z MODISu a zisťovanými terestrickými meraniami počas vegetačnej sezóny, avšak hodnoty LAI odvodené z MODISu sú oproti hodnotám z terestrických meraní nadhodnotené. Obidva typy údajov o LAI sú v zhode s fenologickými pozorovaniami na tejto lokalite.

V ďalšej fáze riešenia projektu plánujeme na základe závislosti LAI od NDVI odvodiť LAI s rozlišovacou schopnosťou 250 m s využitím NDVI odvodeného zo snímok s vysokou kvalitou a drevinového zloženia SR.

## **POĎAKOVANIE:**

*Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0670-07.*



## **LITERATÚRA**

- BRÉDA, N., J., J., 2003: Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies, *Journal of Experimental Botany*, Vol. 54, No. 392, pp. 2403-2417, November 2003
- BUCHA, T., 1999: Classification of tree species composition in Slovakia from satellite images as a part of monitoring of forest ecosystem biodiversity. *Acta Instituti Forestalis.*, 9, 1999, pp. 65-84
- FANG, H., LIANG, S., 2005: A hybrid inversion method for mapping leaf area index from MODIS data: experiments and application to broadleaf and needleleaf canopies. *Remote Sensing of Environment* 94 (2005) 405-424
- KNYAZIKHIN, Y., GLASSY, J., PRIVETTE, J. L., TIAN, Y., LOTSCH, A., ZHANG, Y., WANG, Y., MORISETTE, J. T., VOTAVA, P., MYNENI, R., B., NEMANI, R., R., RUNNING, S., W., 1999: MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15). Algorithm Theoretical Basis Document, <http://eosps0.gsfc.nasa.gov/atbd/modistables.html>, 1999.
- MYNENI, R., KNYAZIKHIN, Y., GLASSY, J., VOTAVA, P., SHABANOV, N., 2003: FPAR, LAI (ESDT: MOD15A2) 8-day Composite NASA MODIS Land Algorithm. User's Guide. <http://cybele.bu.edu/modismisr/products/modis/userguide.pdf>
- SHABANOV, N., SAMANTA, A., MYNENI, R., B., KNYAZIKHIN, Y., VOTAVA, P., NEMANI, R., 2007: Collection 5 MODIS LAI and FPAR Products. [http://modis.gsfc.nasa.gov/sci\\_team/meetings/c5meeting/pres/day1/shabanov.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/sci_team/meetings/c5meeting/pres/day1/shabanov.pdf)
- ŠMELKO, Š., 1991: Štatistické metódy v lesníctve. VŠLD Zvolen, 1991, pp. 160-162
- WANG, Y., WOODCOCK, C., E., BUERMANN, W., STENBERG, P., VOIPIO, P., SMOLANDER, H., HÄME, T., TIAN, Y., HU, J.,

KNYAZIKHIN, Y., MYNENI, R., B., 2004: Evaluation of the MODIS LAI algorithm at a coniferous forest site in Finland. *Remote Sensing of Environment* 91 (2004) 114-127



## **ODVODENIE ČISTEJ A HRUBEJ PRIMÁRNEJ PRODUKCIE LESNÝCH EKOSYSTÉMOV S VYUŽITÍM SATELITNÝCH ÚDAJOV MODIS**

**Jozef Pajtk**

*Národné lesnícke centrum–Lesnícky výskumný ústav, T. G.  
Masaryka 22, 960 92 Zvolen,  
e-mail: [pajtk@nlcsk.org](mailto:pajtk@nlcsk.org)*

**Abstrakt:** V príspevku prezentujeme prvé výsledky súvisiace so získaním a odvodením vstupných údajov a produkčných charakteristík zo satelitných údajov zo spektorradiometra MODIS, ktoré budú použité v systéme kontinuálneho a plošného sledovania odozvy lesných ekosystémov na meniace sa podmienky prostredia. Riešená je problematika použitia a predovšetkým spresnenia algoritmu MOD17 (ktorý je určený na odvodenie GPP a NPP v globálnom meradle) na regionálnej úrovni. Model bude spresnený zvýšením priestorového rozlíšenia na 250x250 m, vstupom klimatických údajov z národnej siete meteorologických staníc a použitím údajov o fotosynteticky aktívnej radiácii (PAR), ktoré budú vymodelované z údajov radiometra AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer).

**Kľúčové slová:** MODIS, PAR, FPAR, produkcia lesných ekosystémov

**Abstract:** The first results are provided in the paper regarding the input data retrieval and extrapolation altogether with the production characteristics of spectroradiometer MODIS satellite data, applied in the system of continuous and spatial monitoring of forest ecosystems response to the changing conditions of the environment. Utilization and especially particularization of

MOD17 algorithm issue is solved (appointed for GPP and NPP extrapolation in global measure) on regional level. Model will be refined by spatial distinguish increase to 250 x 250 m, by input climate data from meteorological stations national network by applying photosynthetic active radiation data (PAR) formed from radiometer AVHRR data (Advanced Very High Resolution Radiometer).

**Keywords:** MODIS, PAR, FPAR, primary production of forest ecosystem

## ÚVOD A PROBLEMATIKA

Ekosystémy s dominantnou zložkou drevín zaberajú okolo 11 % zemského povrchu (toto zodpovedá 38 % súše a 57 mil. km<sup>2</sup>). Napriek tomu, že tento podiel nie je vysoký je v nich akumulovaná väčšina biomasy vytvorenej na našej planéte. Je odhadnutá na 1700 Gt (93 % všetkej fyto biomasy Zeme (Whittaker, Likens 1975, in Klimo 1994)). Celková čistá primárna produkcia predstavuje podľa tohto zdroja 80 Gt. Priemerná čistá produkcia lesných ekosystémov je štyrikrát väčšia ako svetový priemer, dvakrát vyššia ako je priemer poľnohospodárskych pôd a je vyššia ako produkcia oceánov. Tieto čísla svedčia o význame lesných ekosystémov z hľadiska stability a produkcie svetového ekosystému.

Možnosti štúdia produkcie lesov, uhlíkového cyklu a alokácie uhlíka sa výrazne rozšírili po zavedení metód diaľkového prieskumu Zeme do hodnotenia ekosystémových procesov v globálnom merítku. Modelovanie GPP pomocou diaľkového prieskumu je založené na predpoklade, že fyziologické vlastnosti rastlín súvisia s biochemickým zložením listov, a že toto zloženie sa odzrkadľuje v ich spektrálnej odraznosti. Od vypustenia prvého satelitu vybaveného senzormi v sedemdesiatych rokoch minulého storočia sú vedci limitovaní počtom a šírkou dostupných kanálov na senzoroch a frekvenciou

pozorovaní vhodných na určenie priestorových a časových zmien primárnej produkcie vegetácie. Vypustenie družíc Terra v roku 1999 a Aqua v roku 2002, ktoré sú vybavené spektorrádiometrom MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) bolo ďalším významným krokom vo výskume biofyzikálnych a štrukturálnych charakteristík lesných ekosystémov. Výhodou dát získaných z tohto spektorrádiometra je každodenné snímanie nášho územia, široký spektrálny rozsah (od 0,4 do 14,5  $\mu\text{m}$ ), snímania v 36 spektrálnych kanáloch, priestorová rozlišovacia schopnosť (od 250 m do 1 km) a bezplatný prístup k údajom. Existujúce MODIS produkty sú využiteľné predovšetkým pre potreby globálneho monitorovania Zeme. Regionálna premenlivosť monitorovaných veličín nie je dostatočne zachytená a vysvetlená (Hill et al. 2006; Coops et al. 2007). Využitie globálnych MODIS produktov na regionálnej úrovni obmedzuje aj skutočnosť, že ich rozlišovacia schopnosť je vo väčšine prípadov 1 km. Pre uvedené sa javí validácia globálnych MODIS algoritmov, ich parametrizácia na regionálnej úrovni a tvorba regionálnych produktov s vyšším priestorovým rozlíšením ako veľmi aktuálna a potrebná.

Na Slovensku sa nevykonávajú kontinuálne celoplošné merania produkčných charakteristík lesa. Údaje o stave lesa sú na úrovni celého lesného pôdneho fondu SR získavané výberovým spôsobom z monitoringu a inventarizácie lesov. Vzhľadom na uplatnenú intenzitu výberu je odvodenie spoľahlivých údajov na nižšej ako celoslovenskej úrovni problematické. Kvôli finančnej náročnosti sa opakovanie meraní realizuje väčšinou v perióde od 1 do 10 rokov. Takýto stav je limitujúcim faktorom tak pri pochopení procesov, ktoré prebiehajú v našich lesných ekosystémoch v meniacich sa podmienkach prostredia ako aj prijímaní potrebných opatrení. Riešenie načrtnutých problémov je možné cez integráciu existujúceho údajového spektra z terestrických zisťovaní s kontinuálne získavanými údajmi diaľkového prieskumu Zeme (DPZ) a návrh nových metód a postupov ich vyhodnotenia.

Hlavným cieľom riešenia je odvodenie čistej a hrubej primárnej produkcie lesných ekosystémov na území Slovenskej republiky. Analýzy budú vykonané na časovom rade záznamov z rokov 2007-2008, získavaných v osemďňových intervaloch.

Za základnú jednotku priestorového rozdelenia lesa, ku ktorej môžeme vzťahovať údaje odvodené z MODISu považujeme dielec. Jeho výmera (cca od 5 do 20 ha) približne korešponduje s veľkosťou obrazového elementu MODIS (6.25 ha).

## **MATERIÁL A METÓDY**

### **Výber a analýza kvality produktov MODIS a integrácia informačných zdrojov**

Pre analýzu kvality údajov využívame súbor kvality produktu, ktorý je súčasťou jednotlivých produktov MODIS. Súbor kvality produktu definuje kvalitu odvodenia hodnoty danej charakteristiky v obrazovom elemente (pixeli). Ich implementácia do procesu tvorby údajovej bázy umožní identifikovať a odladiť potenciálne zdroje chýb.

Globálne MODIS produkty s rozlíšením 1 km, a to listový index a frakciu fotosynteticky aktívnej radiácie (LAI a FPAR – produkt MOD15) prevzorkujeme na 250 m produkt, a to na základe korelačných vzťahov k NDVI. Na analýzu kvality využívame opäť vrstvu kvality, ktorá je súčasťou týchto produktov.

Produkt MOD17 (modelovanie NPP a GPP) využijeme na porovnanie s výsledkami nášho riešenia, reprezentovaného v priestorovej rozlišovacej schopnosti 250 m.

### **Koncept odvodenia čistej a hrubej primárnej produkcie (NPP, GPP) lesných ekosystémov**

Pri modelovaní GPP a NPP vychádzame z 3 teoretických predpokladov:

- 1. Rastlinná NPP je priamo úmerná absorbovanej*

### *slnečnej energii.*

Na tento vzťah poukázalo viacero štúdií (napr. Monteith 1972, 1977, Asrar 1984, Goward 1985, Landsberg et al., 1996). Monteith (1972) naznačil, že NPP jednoročných rastlín na úrodných a zavlažovaných stanovištiach je lineárne závislá od množstva slnečnej energie, ktorú rastliny absorbujú počas rastovej sezóny. V tejto úvahe, ktorej však chýba väčšia komplexnosť sa kombinujú meteorologické obmedzenia prístupného slnečného žiarenia s ekologickými obmedzeniami množstva listovej plochy. Hodnoty nameranej absorbovanej fotosynteticky aktívnej radiácie (APAR) sú ovplyvňované geografickou a sezónnou variabilitou dĺžky dňa a dennou oblačnosťou a množstvom aerosolov rozptýlených v ovzduší.

### *2. Existuje vzťah medzi absorbovanou slnečnou energiou a satelitne odvodenými vegetačnými ukazovateľmi.*

Spektrálne vegetačné ukazovatele odvodené z dát diaľkového prieskumu majú viacero foriem (Heute et al. 2002), v súčasnosti je najčastejšie používaný NDVI, ktorý je počítaný z odraznosti v červených (red) a blízkočervených (NIR) dĺžkach:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{red}) / (\text{NIR} + \text{red}) \quad (1)$$

a

$$\text{APAR} / \text{PAR} \sim \text{NDVI} \quad (2)$$

Algoritmus MODIS využíva na výpočet GPP iný spektrálny ukazovateľ a tým je FPAR (frakcia fotosynteticky aktívnej radiácie). FPAR je funkciou vlastnosti zápoja porastu a slnečného zenitového uhla a jeho hodnota sa môže meniť počas dňa, ale aj sezóny. FPAR stanovišťa môže byť počítaný pre každý deň v roku použitím nasledujúcej rovnice (Chen 1996):

$$\text{FPAR} = 1 - \rho_1 - (1 - \rho_2) \cdot e^{\left(-0,45 \cdot \frac{L_{\text{eg}}}{\cos\theta}\right)} \quad (3)$$

kde  $\rho_1$  a  $\rho_2$  sú špecifické konštanty pre druh dreviny,  $L_{\text{eg}}$  je LAI



zelenej asimilujúcej časti (effective green LAI) a  $\theta$  je slnečný zenitový uhol.

Rozdiely v hodnotách NDVI a FPAR sú malé, môžeme povedať, že

$$\text{FPAR} = \text{APAR} / \text{PAR} \sim \text{NDVI} \quad (4)$$

### *3. Existujú biofyzikálne dôvody redukcie aktuálnej účinnosti premeny absorbovanej snežnej energie.*

Na redukciu APAR slúži koeficient radiačnej účinnosti  $\epsilon$ , ktorý vyjadruje aký podiel absorbovanej snežnej energie je využité na tvorbu primárnej produkcie. Tento značne kolíše pre rozličné vegetačné typy (Field et al. 1995, Prince a Goward 1995, Turner et al. 2003). Sú dva základné zdroje tejto variability. Poprvé, každá vegetácia časť fotosyntézy okamžite spotrebuje na udržiavanie respirácie. Jednoročné rastliny z pôvodnej práce Monteitha (1972) mali tieto respiračné nároky minimálne, takže  $\epsilon$  bolo typicky okolo 2 gC.MJ<sup>-1</sup>. Respiračné nároky sa však zväčšujú s veľkosťou viacročných rastlín. Hunt (1994) zistil, že publikované hodnoty  $\epsilon$  pre drevnú vegetáciu boli oveľa nižšie, okolo 0,2 až 1,5 gC.MJ<sup>-1</sup> a vyslovil hypotézu, že toto bolo výsledkom respirácie 6-27 % živých buniek bele v kmeni. Druhý zdroj variability  $\epsilon$  je prisudzovaný nerovnakým klimatickým podmienkam. Pri extrapolácii Monteithovej originálnej teórie, určenej pre dobre zavlažované jednoročné rastliny iba počas rastovej sezóny na trvalky žijúce niekoľko rokov musia byť rešpektované určité vážne klimatické obmedzenia. Monteith do svojej definície zahrnul maximálnu radiačnú účinnosť premeny absorbovanej fotosynteticky aktívnej radiácie ( $\epsilon_{\max}$ ). Rovnaký základný postoj bol uplatnený v iných aplikáciách konceptu radiačnej účinnosti, kde najväčšie rozdiely medzi týmito prístupmi boli v určení hodnoty  $\epsilon_{\max}$  a funkčného tvaru na jej redukciu.

## **MOD17 algoritmus na výpočet GPP a NPP**

Tento algoritmus (Heinsch et al., 2003) požaduje vstupné dáta z troch zdrojov:

- (1) špecifické parametre pre jednotlivé biómy preberá z Biome Properties Look Up Table (BPLUT). Hodnoty týchto parametrov pre denný a ročný algoritmus pochádzajú všetky, priamo alebo nepriamo z Biome-BGC (BioGeochemical Cycles) modelu. Tento model požaduje tri skupiny informácií: (a) denné meteorologické dáta; (b) geomorfologické a pôdne charakteristiky a environmentálne dáta; (c) špecifické ekofyziologické parametre pre biómy.
- (2) informácie o všeobecnej plošnej meteorológii získava z údajovej databázy NASA Data Assimilation Office (DAO). Táto zbiera dáta zo všetkých dostupných meteorologických staníc každé 3 hodiny. DAO potom tieto údaje interpoluje, spúšťa globálny klimatický model pre krátke časové sekvencie a produkuje odhad klimatických podmienok vo svete 10 m nad povrchom (aproximuje pomery na túto úroveň výšky zápoja) v rozlíšení 1° až 1,25°. Z týchto údajov MODIS 17 algoritmus vyberá 4 hodnoty:
  - priemerná 24-hodinová denná teplota (°C)
  - denná 24-hodinová minimálna teplota (°C)
  - aktuálny tlak vodných pár (Pa)
  - dopadajúce krátkovlnné slnečné žiarenie (MJ.m<sup>-2</sup>), SWRad, ktoré algoritmus MOD17 prepočíta na dopadajúce PAR (IPAR) pomocou vzťahu:

$$\text{IPAR} = \text{SWRad} * 0,45 \quad (5)$$

- (3) satelitne merané údaje FPAR a LAI

GPP a NPP v tomto algoritme je počítaná pre každý pixel v globálnej sieti 1x1 km. Tieto výpočty, zosumarizované a znázornené na obrázku 1 predstavujú sériu krokov, z ktorých

niektoré (napr. GPP) sú počítané na úrovni dňa, iné (napr. NPP) na úrovni roka. Niektoré z týchto údajov (GPP, PSNnet) sa sumujú a archivujú na úrovni 8-dňových období. Výpočet GPP je založený na odvodení množstva fotosynteticky aktívnej radiácie (0.4–0.7  $\mu\text{m}$ ) absorbovanej vegetáciou (APAR),

$$\text{APAR} = \text{PAR} * \text{FPAR} \quad (6)$$

kde PAR – hustota toku fotosynteticky aktívnej radiácie v  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{deň}^{-1}$  získaná z denných hodnôt z DAO, FPAR – podiel PAR pohltenej vegetáciou (v rozpätí 0 – 1)

V súčasnosti používa MODIS GPP algoritmus datový produkt MOD15A, ktorý poskytuje 8-dňové FPAR pozorovania. MODIS FPAR algoritmus získava hodnoty FPAR z denných údajov o odraznosti v červenej (648 nm) a blízkočervenej (858 nm) oblasti spektra v 1 km rozlíšení. Algoritmus MOD15 je založený na jednoduchom výbere pomocou maximálneho FPAR (počas 8 dní), ktorý je zvolený na začlenenie do výstupného pixla. Rovnaký deň, ktorý reprezentuje FPAR je vybraný aj na vloženie LAI hodnoty. MOD17 tak nutne predpokladá, že LAI a FPAR nevarujú počas danej 8-dňovej periódy. Vypočítané hodnoty FPAR sú porovnávané so súborom hodnôt, ktoré reprezentujú predpokladaný rozsah typických hodnôt pre daný typ biómu. Algoritmus však môže zlyhať ak neistota vstupných údajov o odraznosti je väčšia ako stanovená hraničná hodnota v algoritme. Hlavnou príčinou chybného odvodenia FPAR je oblačnosť a snehová pokrývka, pretože FPAR algoritmus nemôže zvládnuť pozorovania, ktoré sú narušené prítomnosťou oblačnosti a iných atmosférických javov (Myneni et al., 2002). Súčasná analýza ukazuje, že spoľahlivosť odvodenia FPAR je na úrovni 70 % (Yang et al., 2006).

Aby sme vypočítali GPP musíme z vyššie spomenutých dôvodov redukovať APAR pomocou koeficientu radiačnej účinnosti  $\epsilon$ :

$$GPP = \varepsilon * APAR \quad (7)$$

Koeficient účinnosti  $\varepsilon$  prevádza APAR na GPP. Hodnota koeficientu účinnosti  $\varepsilon$  je rozdielna pre jednotlivé biómy vzhľadom na rozdielnosť v množstve spotrebovanej energie na dýchanie a klimatické podmienky. V MODIS GPP algoritme sa výpočet koeficientu účinnosti vykonáva pomocou skalárov TMIN a VPD:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} \cdot TMIN\_skalár \cdot VPD\_skalár \quad (8)$$

kde TMIN je minimálna denná teplota, VPD je deficit tlaku vodných pár počas dňa a  $\varepsilon_{\max}$  je hodnota prevzatá z BPLUT tabuľky. Hodnoty TMIN\_skalár a VPD\_skalár sa pohybujú v intervale 0-1. Hraničné hodnoty pri ktorej TMIN\_skalár=0 je -8 °C a VPD\_skalár=0 je 2500 Pa. V globálnom zovšeobecnení môžeme povedať, že algoritmus nepočíta dennú GPP, keď je minimálna denná teplota nižšia ako -8 °C a horná hranica deficitu tlaku vodných pár je väčšia ako 2500 Pa. Pri týchto teplotách dochádza k zatvoreniu listových stomat a zastaveniu fotosyntézy. Je dôležité poznamenať, že pri výpočte GPP je okrem radiačnej účinnosti požadovaná hodnota APAR, zatiaľ čo používané aplikácie poskytujúce dáta z diaľkového prieskumu Zeme odhadujú FPAR. Merania alebo hodnotenia PAR sú preto požadované ako doplnok k satelitne meraným FPAR. Pri štúdiách na malých územiach s in situ meraniami PAR na ploche je odvodenie APAR zo satelitne odvodeného FPARu jednoznačné. Pri začlenení PAR do algoritmu MODIS je ideálne rovnaké priestorové rozlíšenie ako vstup z DPZ.

Ak od GPP odčítame udržiavaciu respiráciu listov a jemných koreňov počas celého dňa dostaneme čistú dennú fotosyntézu ( $PSN_{net}$ ).

$$PSN_{net} = GPP - listová\_UR - jemné\_korene\_UR \quad (9)$$

NPP je ročná suma denných  $PSN_{net}$  mínus náklady na rast a udržiavanie živých buniek v permanentných drevných tkanivách. Denná NPP je neznáma, pretože udržiavacie respirácie niektorých častí rastlín a všetky rastové respirácie nie sú zistiteľné na úrovni dňa. Kým počiatočné štúdie poukazovali predovšetkým na silnú závislosť NPP od APAR, novšie práce hovoria, že APAR môže mať relatívne väčšiu koreláciu s GPP ako s NPP. Tento prístup, používajúci APAR k predpovedi GPP namiesto NPP a neskôr započítavajúci respiráciu inými vzťahmi je použitý aj v tomto algoritme.

Medzi iné faktory, okrem APAR, ktoré majú vplyv na NPP patria: koncentrácia fotosyntetických enzýmov, štruktúra zápoja, priemerná hustota toku PAR, náklady na udržiavaciu a rastovú respiráciu, teplota zápoja, evapotranspirácia, prístupnosť pôdnej vody, dostupnosť minerálnych živín. Náročná úloha hodnotenia GPP a NPP odvodením z APAR je preto spojená s týmito viacnásobnými vplyvmi a objektívna parametrizácia vzťahov medzi GPP, NPP a APAR sa považuje za kľúčový problém.

Na validáciu MODIS údajov o primárnej produkcii sa používajú tri typy dát:

- priame merania biomasy
- tower flux merania
- merania atmosférickej  $CO_2$  koncentrácie

Každý typ týchto dát je limitovaný svojou presnosťou a rozsahom a v krátkosti možno povedať, že žiadne jednoduché meranie sa nemôže zhodovať v detailoch, ktoré MODIS GPP a NPP algoritmus reprezentuje v čase, priestore a ekosystémových atribútoch.

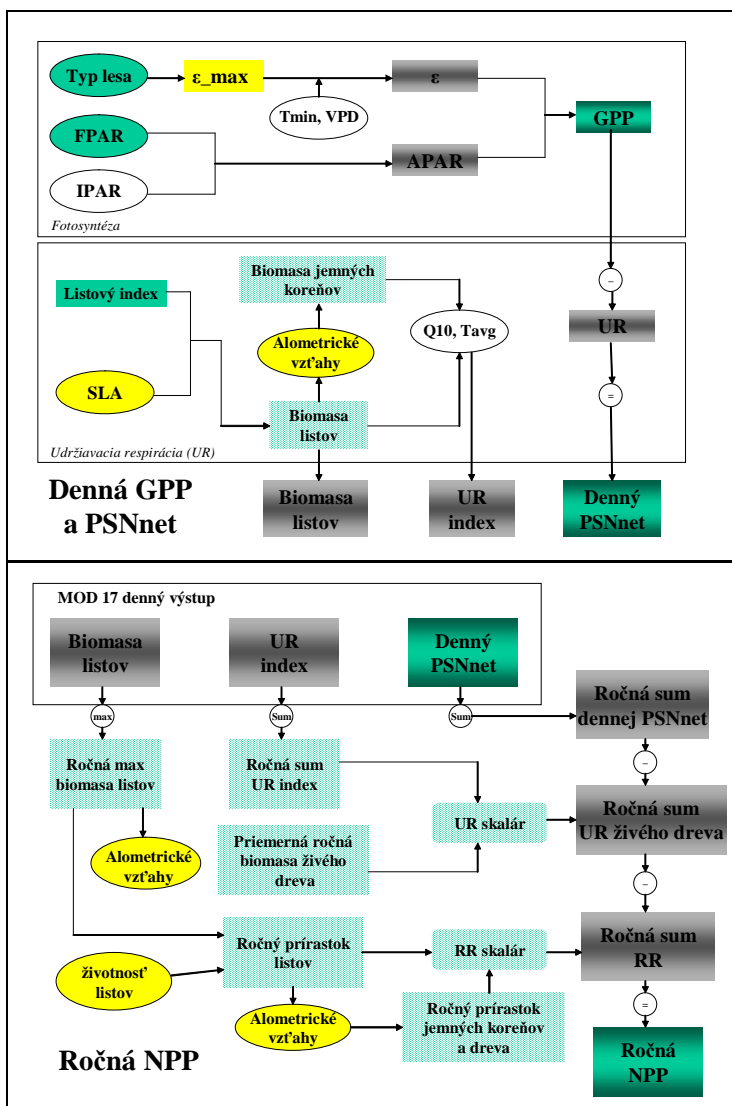
Validáciu uskutočníme metódou priameho merania biomasy. Zdrojom týchto údajov budú objekty dlhodobjšieho výskumu, najmä trvalé monitorovacie plochy (TMP) monitorovacieho systému ČMS Lesy a výskumné plochy NLC Zvolen zamerané na produkciu biomasy jednotlivých komponentov drevín buk, dub, smrek a borovica v mladých porastoch do 15 až 20 rokov. Ďalej máme k dispozícii aktuálne

celoslovenské údaje z opisu porastov po základných jednotkách priestorového rozdelenia lesa (JPRL) v grafickej aj textovej podobe integrovaných v prostredí ArcGIS.

## **PREDBEŽNÉ VÝSLEDKY**

Vychádzajúc z uvedeného konceptu modelovania GPP a NPP, sme skúmali možnosti spresnenia hlavných vstupných údajov a vrstiev, ktoré na regionálnej úrovni môžeme považovať za hlavné zdroje nepresností a to:

- (i) Nahradenie meteorologických údajov z údajovej bázy NASA Data Assimilation Office (DAO) údajmi z SHMÚ. Očakávame spresnenie určenia koeficientu radiačnej účinnosti ( $\epsilon$ ). Pre korekciu  $\epsilon$  je potrebné určiť dennú minimálnu teplotu a priemerný denný deficit tlaku vodných pár.
- (ii) Nahradenie údajov PAR z údajovej bázy NASA DAO (rozlišovacia úroveň  $1^\circ$ ) hodnotami odvodenými z rádiometra AVHRR získavanými v 15 minútových intervaloch a prevzorkovaných na priestorovú rozlišovaciu úroveň 250 m. Produkt bude spracovaný na časovú rozlišovaciu úroveň 8 dní spoločnosťou GeoModel s.r.o. Bratislava.
- (iii) Spresnenie parametrov, ktoré sa na úrovni jednotlivých biómov preberajú z BPLUT tabuľky.
- (iiii) Kvalita LAI a FPAR. Vzhľadom na rozlišovaciu úroveň globálneho produktu (1 km) sa odvodí LAI a FPAR vrstvy na rozlišovacej úrovni 250 m. Využijú sa k tomu prevodné tabuľky (Knyazikhin et al., 1999) odvodené pre globálny produkt a členené podľa biómov. Prevodné tabuľky sú odvodené na základe korelácie medzi NDVI a LAI resp. NDVI a FPAR.



**Obr. 1.** Vývojový diagram výpočtu GPP, PSNnet a ročnej NPP s využitím údajov a produktov odvodených z MODISu (v zelenom), meteorologických údajov (bez výplne), alometrických vzťahov (v žltom) a výpočtov (bodkovaná výplň). Výstupy z algoritmu sú zobrazené tieňovanou výplňou.

Riešenie uvedenej problematiky sme začali s tzv. nulovým variantom, ktorý je založený na príprave poznatkových báz v prostredí Netweaver vychádzajúcich z existujúcich poznatkov a prístupov uplatnených pri odvodení NPP a GPP z MODIS snímok.

Ako prvý výstup riešenia uvádzame vývojový diagram „nulového variantu“ výpočtu dennej GPP, PSNnet (zodpovedá dennej NPP\*) a ročnej NPP, ktorý je východiskom pre tvorbu poznatkovej bázy v prostredí NetWeaver Engine v. 16.4.4. Na samotnú aplikáciu poznatkovej bázy na konkrétnych údajoch využijeme získaný systém pre podporu priestorového rozhodovania EMDS ako nadstavby ArcGIS 9.0. Podrobnou analýzou globálneho modelu, zabezpečením softvérovej a informačnej technológie pre spracovanie údajov a zabezpečením národných vstupných dát sme zavřšili prípravnú etapu riešenia a vytvorili predpoklady pre tvorbu regionálne parametrizovaného modelu odvodenia GPP a NPP lesných ekosystémov.

## **ZÁVER**

V práci predkladáme prvé výsledky týkajúce sa návrhu systému kontinuálneho a plošného sledovania stavu a vývoja čistej a hrubej primárnej produkcie lesných ekosystémov pomocou satelitných údajov zo spektorádiometra MODIS. Ide predovšetkým o analýzu hodnôt FPAR a LAI (z produktu MOD15), ktoré sa spoločne s meteorologickými údajmi získanými z pozemných meteorologických staníc, hodnotami PAR získanými z rádiometra AVHRR a hodnotami parametrov pre jednotlivé biómy podieľajú na výpočte primárnej produkcie lesných ekosystémov.

Analyzujeme možnosti odladenia a spresnenia parametrov, ktoré vstupujú do modelu produkcie lesných ekosystémov s cieľom sprecizniť a parametrizovať globálny model na podmienky našich lesných ekosystémov.



### **Pod'akovanie**

*Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0670-07*

### **LITERATÚRA**

- ASRAR, G., FUCHS, M., KANEMASU, E. T., HATFIELD, J. H. 1984: Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 76, 300–306.
- CHEN, J. M., 1996: Canopy architecture and remote sensing of the fraction of photosynthetically active radiation absorbed by boreal conifers forests. *IEEE Transactions and Remote Sensing*, 34, 1353-1368.
- COOPS N.C., BLACK, T.A., JASSAL, R.S., TROFYMOW, J.A., MORGENSTERN, K., 2007: Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. *Remote Sensing of Environment*, 107, 385–401.
- FIELD, C. B., RANDERSON, J. T., MALMSTROM, C. M., 1995: Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51, 74–88.
- GOWARD, S. N., TUCKER, C. J., DYE, D. G. 1985. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *Vegetatio*, 64, 3–14.
- HEINSCH, F. A., et al., 2003: User's Guide GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products NASA MODIS Land Algorithm. 57 p.
- HILL, J.M., SENARATH, U., LEE, A., ZEPPEL, M., NIGHTINGALE, J.M., WILLIAMS, R.J., MCVICAR, T.R., 2006: Assessment of the MODIS LAI product for Australian ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 101, 495–518.

- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E. P., GAO, X., FERREIRA, L. G., 2002: Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of Environment* 83: 195-213.
- HUNT, E. R. Jr., 1994. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 1725–1730.
- KNYAZIKHIN et al., 1999: MODIS Leaf Area Index (LAI) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation Absorbed by Vegetation (FPAR) Product (MOD15). Algorithm Theoretical Basis Document.
- KLIMO, E., 1994: Ekologie lesa. (Ecology of the forest). Brno, VŠZ v Brne. 170 s.
- LANDSBERG, J. J., et al., 1996. Energy conversion and use in forests: The analysis of forest production in terms of radiation utilisation efficiency. In: H. L. Gholz and K. Nakane (Editors), *The Use of Remote Sensing in the Modeling of Forest Productivity at Scales from the Stand to the Globe*. Kluwer Academic Press, London.
- MONTEITH, J. L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747–766.
- MYENI, R. B., HOFFMAN, S., KNYAZIKHIN, Y., PRIVETTE, J. L., GLASSY, J., TIAN, Y., et al., 2002: Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83, 214-231.
- PRINCE, S. D., GOWARD, S. N., 1995: Global primary production: A remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 22: 815-835.
- TURNER D. P. et al., 2003: Scalling gross primary production (GPP) over boreal and deciduous forest landscape in support of MODIS GPP product validation. *Remote Sensing of Environment*, 88, 256–270.

YANG, W., HUANG, D., TAN, B., STROEVE, J., SHABANOV, N. V., KNYAZIKHIN, Y., et al., 2006: Analysis of leaf area index and fraction of PAR absorbed by vegetation products from the terra MODIS sensor: 2000-2005. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1829-1842.

## **ANALÝZA PRODUKČNEJ SCHOPNOSTI POĽNOHOSPODÁRSKEJ KRAJINY NA ZÁKLADE MERANÝCH ÚDAJOV, DPZ A MODELOVANIA**

**Martina Nováková, Zuzana Klikušovská, Monika Mišková,  
Michal Sviček**

*Výskumný ústav pôdozvedectva a ochrany pôdy, Gagarinova 10,  
827 13 Bratislava*

### **Abstrakt: Analýza produkčnej schopnosti poľnohospodárskej krajiny na základe meraných údajov, DPZ a modelovania.**

Produkčná schopnosť patrí medzi základné vlastnosti a funkcie poľnohospodárskej krajiny. Dôležitosť analýzy produkčnej schopnosti priebežne počas vegetačnej sezóny sa prejavuje ako na lokálnej úrovni (farma), tak aj na regionálnej alebo národnej úrovni, a to či pri výbere konkrétnych technologických postupov v danom časovom horizonte alebo pri odhadovaní priemerných úrod strategických poľnohospodárskych plodín s cieľom získania podkladov pre manažment trhu s poľnohospodárskymi komoditami. V príspevku je prezentovaný návrh metodického postupu pre analýzu produkčnej schopnosti poľnohospodárskej krajiny. Uplatnenie geografického a geosystémového prístupu k riešeniu problematiky umožnilo „postaviť“ systém priestorovo a funkčne na seba naväzujúcich úrovni; analýza dynamiky podmienok prostredia (počasie, zemský povrch, pôda) predchádza analýze stavu a vývoja biomasy (porastov poľnohospodárskych plodín), na ktorú následne naväzuje analýza vývoja produkčnej schopnosti (odhady úrod konkrétnych poľnohospodárskych plodín). Aplikované sú viaceré metódy priestorového modelovania ako priestorová interpolácia, interpretácia údajov diaľkového prieskumu Zeme, agro-meteorologické a biofyzikálne modelovanie. Navrhovaný metodický postup zodpovedá nielen požiadavkám všeobecného systému monitorovania charakteru

vývoja aktuálnej, či historickej poľnohospodárskej sezóny, ale aj požiadavkám funkčného varovného systému.

**Kľúčové slová:** poľnohospodárska krajina, produkčná schopnosť, dynamika podmienok prostredia

**Abstract: Analysis of the production capacity of agricultural landscapes based on measured data, remote sensing and modeling.**

Productivity is one of the most important properties of the agricultural landscape. Local, regional and national agricultural landscape productivity analysis during the vegetation season are important for agricultural commodities market management. In the paper we propose the methodology for analyzing the agricultural land productivity. Based on geographical approach to the study of the agricultural land we have built up a system of the corresponding modelling levels; the weather, topography and soil analysis are done prior to the biomass development analysis which are then followed by crop yield prediction. We have applied several methods of spatial modelling such as spatial interpolation of the weather data, remote sensing data interpretation and process-based models and geographical data fusion for modelling of the water balance in the soil and biomass production. The methodology as proposed in the paper fully covers the general requirements for the monitoring or early-warning systems in agriculture and environmental sectors.

**Keywords:** agricultural landscape, productivity of the agricultural landscape

## ÚVOD

Aktuálnou problematikou v sektore poľnohospodárstva, a to predovšetkým v rastlinnej výrobe, je implementácia princípov racionálneho manažmentu poľnohospodárskej krajiny v bežnej poľnohospodárskej praxi. Proces spočíva v aplikácii systémového

prístupu pri riešení všetkých problémov spojených s organizáciou a riadením činností, a tým aj starostlivosťou o poľnohospodársku krajinu. Podmienkou je zároveň uplatnenie environmentálnych opatrení smerujúcich k zachovaniu prirodzených (a trvalo udržateľných) funkcií a k ochrane poľnohospodárskej krajiny.

Východiskom pre realizáciu takto definovanej snahy je „poznatie“ poľnohospodárskej krajiny, a to ako v zmysle chápania jej priestorovej diferenciacie, fungovania a správania sa, tak aj v zmysle vyjadrenia znalostí o krajine prostredníctvom priestorových údajov a následne, v zmysle aplikácie vhodných metodických postupov pri ich účelovom spracovaní.

Vzhľadom na funkcie poľnohospodárskej krajiny patrí jej produkčná schopnosť medzi zásadné a strategické vlastnosti. Práve pri jej analýze a hodnotení do popredia vystupuje potreba poznania správania sa poľnohospodárskej krajiny v meniacich sa podmienkach počas vegetačnej sezóny; citlivá reakcia systému poľnohospodárskej krajiny je určujúca ako pre „chod“ rastlinnej výroby na lokálnej úrovni (na úrovni farmy) pri výbere konkrétnych technológií alebo pri výške finálnej produkcie, tak aj na regionálnej a národnej úrovni, napríklad pri odhadovaní úrod alebo pri hodnotení a regionalizácii krajiny pre potreby prípravy strategických dokumentov v sektore pôdohospodárstva a poľnohospodárstva.

V príspevku, na konkrétnom príklade poľnohospodárskej sezóny 2009, je prezentovaný návrh metodického postupu pre analýzu produkčnej schopnosti poľnohospodárskej krajiny. Príspevok však nie je zameraný na úplnú a vyčerpávajúcu analýzu sezóny 2009; naopak, podáva obraz o možnostiach takto definovaného metodického postupu a pri detailnejšom popise jednotlivých analytických úrovní sa venuje skôr naznačeniu ich potenciálu.

## **MATERIÁL A METÓDY**

### ***Teoretické východiská analýzy produkčnej schopnosti poľnohospodárskej krajiny***

Pri štúdiu a analýze produkčnej schopnosti poľnohospodárskej krajiny bola aplikovaná teória systémov (Krcho 1990) a geografický prístup (Minár a iní 2001); ich vzájomná kombinácia a komplementarita umožnila:

- poľnohospodársku krajinu chápať zjednodušene, a to v podobe systému pôda-rastlina-atmosféra (systém PRAT, def. Novák 1995);
- pristupovať k jednotlivým zložkám systému PRAT ako k priestorovým prvkom krajiny, ktoré sú charakterizované svojim priestorovým usporiadaním (priestorová diferenciacia ich vlastností, stavov) a vzájomným funkčným prepojením – procesmi (tok látok, energie a informácií);
- pri analýze poľnohospodárskej krajiny, a teda aj jej produkčnej schopnosti, nezanedbávať, ale práve naopak, brať do úvahy jej priestorovú a časovú variabilitu..

V zmysle uvažovanej aproximácie, za primárny zdroj sezónnych zmien v poľnohospodárskej krajine je považovaný charakter počasia, resp. klimatické podmienky konkrétnej poľnohospodárskej sezóny. Prostredníctvom pôdných vlastností, ktoré definujú spôsob distribúcie vody v pôde, klimatické podmienky podmieňujú aktuálny stav a dlhodobý charakter vlhkostných pomerov pôdy, ako aj množstvo rastlinám dostupnej vody v pôde; a následne, v závislosti od nárokov jednotlivých plodín na prostredie a ich fyziologických vlastností, ovplyvňujú stav rastúcej plodiny, a teda aj produkčnú schopnosť poľnohospodárskej krajiny.

Kým pri analýze sezónnych zmien týkajúcich sa podmienok prostredia v konkrétnej poľnohospodárskej sezóne (napr. úhrn zrážok, vlhkosť pôdy, atď.) ide v zmysle *časovej variability* a v zmysle charakteru zmien (zvratnosť, nezvratnosť)

o *dynamické zmeny*, tak pri biomase a pri produkčnej schopnosti krajiny môžeme hovoriť o *vývoji* (podľa Mičian a Zatkálík 1986).

Okrem časovej variability je pri uvažovanej problematike a jej hodnotení na národnej úrovni (SR) potrebné uvažovať aj *priestorovú variabilitu*. Týka sa ako diferenciácie vlastností krajiny, tak aj diferenciácie procesov prebiehajúcich v krajine, pričom ich výsledkom je aj priestorová diferenciácia produkčnej schopnosti poľnohospodárskej krajiny.

### ***Použité údaje***

V príkladovej štúdii boli aplikované nasledovné údaje:

- *meteorologické údaje* zo 70 klimatických staníc v sieti SHMÚ; konkrétne denné údaje: minimálna, maximálna a priemerná denná teplota vzduchu (°C), trvanie slnečného svitu (hod), tlak vodných pár (hPa), priemerná rýchlosť vetra ( $m \cdot s^{-1}$ ) a úhrn atmosférických zrážok (mm) za rok obdobie 1971 - 2009;
- *fenologické údaje* z fenologických staníc v sieti SHMÚ; konkrétne termíny nástupu vybraných fenologických fáz kukurice na zrno v roku 2009;
- *pôdne údaje* - hydrofyzikálne vlastnosti a vybrané vlastnosti pôd relevantné z hľadiska charakteru a intenzity rastlinnej výroby (viac v práci Nováková a Skalský 2008);
- *údaje DPZ*, resp. a) hodnoty vegetačného indexu NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), ktoré indikujú fotosyntetickú aktivitu, stav a vitalitu vegetácie; b) teplota povrchu Zeme (Land Surface Temperature; LST) a c) vlhkosť povrchu Zeme (Water Satisfaction Index; WSI); interpretované sú na základe scén nasnímaných satelitným systémom NOAA AVHRR s priestorovým rozlíšením 1x1 km; údaje za dekády za obdobie 1995 – 2009, b) hodnoty denných a nočných teplôt povrchu Zeme interpretované na základe scén nasnímaných satelitným systémom NOAA AVHRR s priestorovým rozlíšením 1x1 km; údaje za dekády za obdobie 1995 – 2009;



- *štatistické údaje* o osevných plochách a dosiahnutých úrodách poľnohospodárskych plodín za obdobie rokov 1997 – 2008.

### **Metodický postup**

Pri spracovaní údajov bol využitý v súčasnosti budovaný národný systém pre odhad úrod a produkcie poľnohospodárskych plodín (SK\_CGMS), resp. jeho samostatné subsystémy: *monitoring počasia* (Nováková 2007) a *monitoring poľnohospodárskych plodín* (Nováková a Skalský 2008) s nadstavbou pre *závlahový dispečing* a pre *odhad úrod*:

- *priestorová interpolácia meteorologických a agroklimatických údajov* bola realizovaná v referenčnej gridovej sieti s priestorovým rozlíšením 10x10 km; vo viacerých časových intervaloch boli odvodené: a) úhrny atmosférických zrážok v roku 2009 vyjadrené ako percento dlhodobého priemerného úhrnu zrážok za identické obdobie, aplikovaná bola klasifikácia podľa Lapina a iných 1988; b) rozdiely medzi priemernými teplotami vzduchu v roku 2009 a dlhodobými priemernými teplotami vzduchu (°C) za identické obdobie, aplikovaná bola klasifikácia podľa Lapina a iných 1988; c) úhrn potenciálnej evapotranspirácie v roku 2009 vyjadrené ako percento dlhodobého priemerného úhrnu potenciálnej evapotranspirácie za identické obdobie, d) klimatický ukazovateľ zavlaženia (mm) v roku 2009, aplikovaná bola klasifikácia podľa Špánika a iných 2000; dlhodobé priemery (DP) konkrétnych ukazovateľov boli stanovené za obdobie 1971 – 2000;
- *agro-hydrologické modelovanie* bolo realizované v referenčnej gridovej sieti s priestorovým rozlíšením 1x1 km; využitý bol agro-meteorologický model WOFOST (pôvodne Supit a iní 1994, Supit a, van der Groot 2003) implementovaný v systéme SK\_CGMS; odvodené boli: a) relatívna vlhkosť pôdy (%); b) objemová vlhkosť koreňovej zóny (%); c) celková (kumulatívna) potreba a celková (kumulatívna) spotreba vody sledovanou poľnohospodárskou plodinou (cm); d) zásoba vody v pôde (mm); e) deficit vody

(mm) a f) potrebná závlahová dávka v koreňovej zóne konkrétnych poľnohospodárskych plodín (mm); pre priestorovú reprezentáciu výstupov modelovania bol využitý priestorový prienik referenčnej gridovej site s priestorovým rozlíšením 1x1 km a georeferencovanej vrstvy rozšírenia ornej pôdy z Registra poľnohospodárskych pôd (LPIS);

- *bio-fyzikálne modelovanie* bolo realizované v referenčnej gridovej sieti s priestorovým rozlíšením 1x1 km; využitý bol bio-fyzikálny model WOFOST implementovaný v systéme SK\_CGMS; vo viacerých časových intervaloch boli odvodené vegetačné indexy: a) vodou limitovaná nadzemná biomasa pri kukurici na zrno v roku 2009 a b) vodou limitovaná produkcia sušiny v zásobných orgánoch pri kukurici na zrno v roku 2009; simulované indexy boli vyjadrené ako percento dlhodobej priemernej hodnoty konkrétneho vegetačného indexu za identické obdobie, pričom priemer bol stanovený za obdobie 1990 – 2005; pre priestorovú reprezentáciu výsledkov modelovania bol využitý priestorový prienik referenčnej gridovej site s priestorovým rozlíšením v 1x1 km a georeferencovanej vrstvy rozšírenia ornej pôdy z Registra poľnohospodárskych pôd (LPIS);
- pri *interpretácii satelitných obrazových záznamov* boli pri teplote povrchu Zeme použité absolútne údaje, pri vlhkosti povrchu Zeme a pri vegetačnom indexe NDVI relatívne údaje, t.j. percento dlhodobej priemernej hodnoty za identické obdobie; priemer bol stanovený za roky 1995 – 2007;
- *štatistické analýzy*, konkrétne metódy regresnej analýzy, boli aplikované na historické rady dosiahnutých a modelovaných údajov (dosiahnutých úrod a modelovaných indikátorov stavu a vývoja poľnohospodárskej plodiny) .

Výpočty boli realizované v databázovej aplikácii MS Office Access 2003. Pre priestorovú reprezentáciu (vizualizáciu) výstupov bolo využité prostredie ArcGIS 9.2. V príspevku je

vizuálne prezentované len obmedzené množstvo vybraných výstupov.

## **VÝSLEDKY A DISKUSIA**

### ***Analýza dynamiky prostredia***

#### *Počasié a meteorologické údaje:*

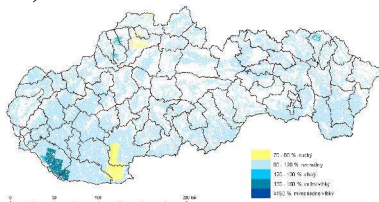
Analýza počasia, realizovaná prostredníctvom meteorologických a klimatologických údajov, umožňuje interpretovať podmienky pre rast a vývoj konkrétnych poľnohospodárskych plodín a posúdiť tak stupeň uspokojenia nárokov konkrétnych plodín na počasié (predovšetkým na zrážky, teplotu vzduchu a úroveň evapotranspirácie; obr. 1 až 5). Zároveň, výstupy tejto analýzy umožňujú v priestore identifikovať regióny s predpokladaným nepriaznivým dopadom počasia na rast a vývoj poľnohospodárskych plodín.

Pri hodnotení počasia v konkrétnej poľnohospodárskej sezóne sú zvolené: a) absolútne a b) relatívne hodnoty vybraných klimatických a agroklimatických indikátorov a indexov, pričom v zmysle ich časovej variability sú odvodené za časové intervaly: a) vegetačné obdobie, t.j. obdobie apríl až september; b) za jednotlivé mesiace v období apríl až september; c) za konkrétne dekády v období apríl až september; d) za konkrétne dni.

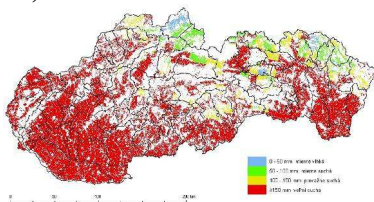
Časové horizonty, ku ktorým sú vzťahované odvodené indexy a indikátory, majú svoje „opodstatnenie“. Kým indikátory a indexy odvodené za vegetačné obdobie (obr. 1) podávajú obraz o celkovom charaktere poľnohospodárskej sezóny, mesačné indikátory a indexy (obr. 2, 3 a 5) umožňujú hodnotiť dynamiku zmien počasia v poľnohospodárskej sezóne a spolu s indikátormi a indexmi stanovenými za dekády (obr. 4) umožňujú identifikovať „rizikové“ časové obdobia pre konkrétnu plodinu a stanoviť možnosť a mieru jej potenciálneho poškodenia.

**Obr. 1** Úhrn atmosférických zrážok (% DP, 1a) a klimatický ukazovateľ zavlaženia (mm, 1b) za vegetačné obdobie v roku 2009

1a)

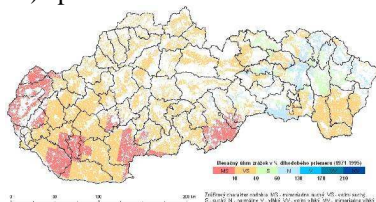


1b)

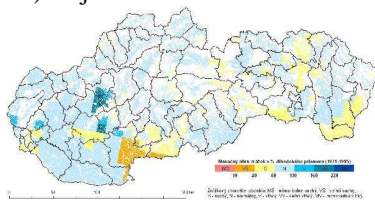


**Obr. 2** Mesačný úhrn atmosférických zrážok (% DP) za apríl až september (2a – 2f) v roku 2009

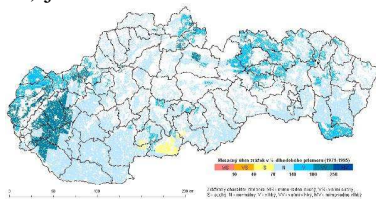
2a) apríl



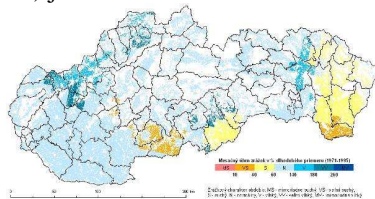
2b) máj



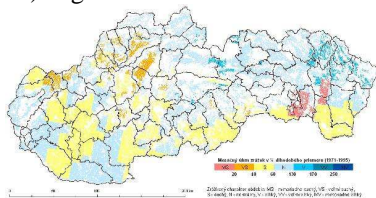
2c) jún



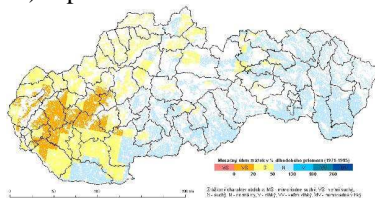
2d) júl



2e) august



2f) september



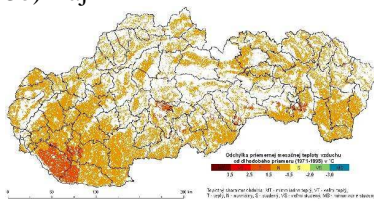
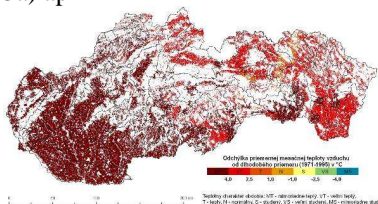
Podrobná analýza denných údajov má v tomto zmysle obmedzený význam; realizuje sa predovšetkým na úrovni konkrétnych meteorologických staníc, a to v prípade výskytu

extrémnych poveternostných udalostí počas vegetačného obdobia (napríklad pri výskyte extrémnych búrkových lejakov spojených s krupobitím a silným nárazovým vetrom) je limitujúcim faktorom tejto analýzy.

**Obr. 3** Odchýlka priemernej mesačnej teploty vzduchu od DP (°C) za apríl až september (3a – 3f) v roku 2009

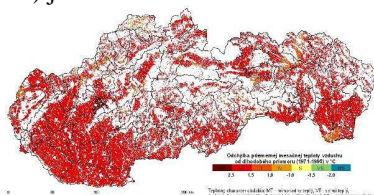
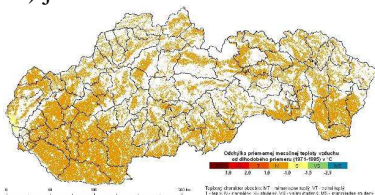
3a) apríl

3b) máj



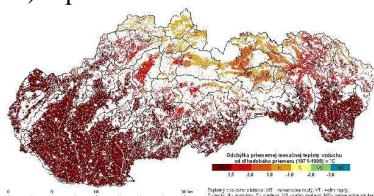
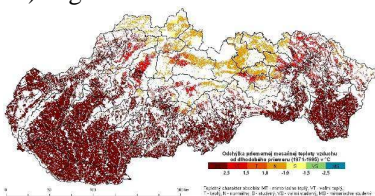
3c) jún

3d) júl



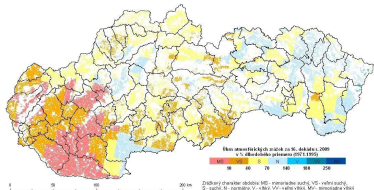
3e) august

3f) september

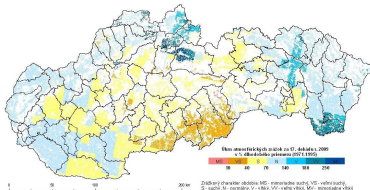


**Obr. 4** Úhrn atmosférických zrážok (% DP, 4a – 4c) a odchýlka priemernej mesačnej teploty vzduchu od DP (°C, 4d – 4f) pre dekády v júni v roku 2009

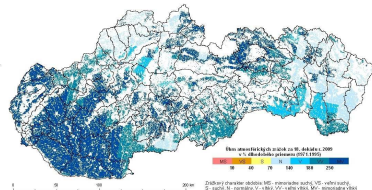
4a) 16.dekáda (1.-10.6.)



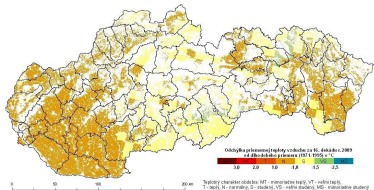
4b) 17.dekáda (11.-20.6.)



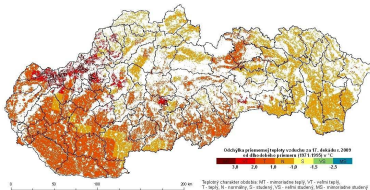
4c) 18.dekáda (21.-30.6.)



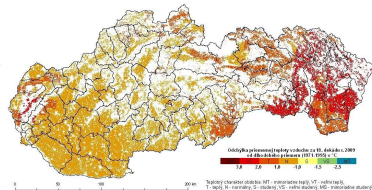
4d) 16.dekáda (1.-10.6.)



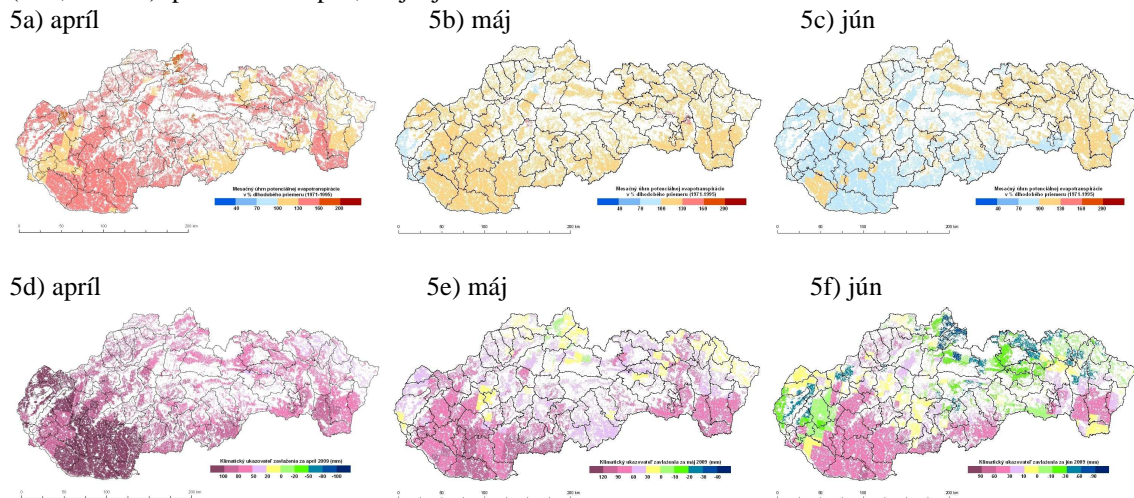
4e) 17.dekáda (11.-20.6.)



4f) 18.dekáda (21.-30.6.)



**Obr. 5** Mesačný úhrn potenciálnej evapotranspirácie (% DP, 5a – 5c) a klimatický ukazovateľ zavlženia (mm, 5d – 5f) pre mesiace apríl, máj a jún v roku 2009



### Teplota a vlhkosť povrchu Zeme:

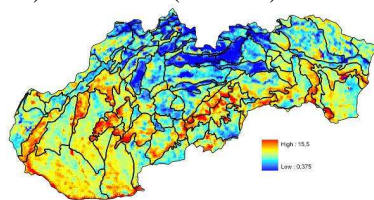
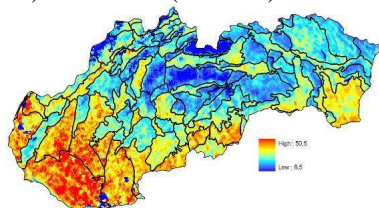
Analýza teplôt povrchu Zeme a vlhkosti povrchu Zeme, realizovaná v desaťdennom časovom intervale, umožňuje sledovať a interpretovať dynamiku a intenzitu zmien podmienok pre procesy prebiehajúce na zemskom povrchu, a pri splnení určitých podmienok aj pre rast a vývoj vegetácie. Charakterizovaná je výrazným stupňom „neurčitosti“ zapríčinennej tým, že: a) oba indikátory sú interpretované na základe satelitných obrazových záznamov s malým priestorovým rozlíšením (1x1 km); b) charakter bezprostredného povrchu Zeme sa počas poľnohospodárskej sezóny mení. Preto pri ich interpretácii je nevyhnutné brať do úvahy aj interpretáciu pokrývky Zeme v časovom horizonte realizovanej analýzy.

Aj napriek tomu, že teplota jednotlivých povrchov Zeme je rozdielna v porovnaní s teplotou nadzemnej vrstvy vzduchu (v prípade LST, obr. 6) a vlhkosť povrchu Zeme neindikuje zásobu rastlinám dostupnej vody v pôde (v prípade WSI, obr. 7), ich interpretácia poukazuje na „prvotný“ celkový obraz rozdelenia teplotných a vlhkosťných pomerov zemského povrchu.

**Obr. 6** Teplota povrchu Zeme v roku 2009: v prvej májovej dekáde – denná (6a), nočná (6b); v prvej júnovej dekáde – denná (6c), nočná (6d).

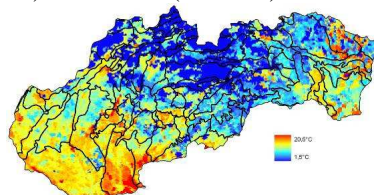
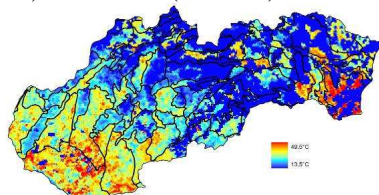
6a) 13. dekáda (1.-10. 5.)

6b) 13. dekáda (1.-10. 5.)



6c) 16. dekáda (1.-10. 6.)

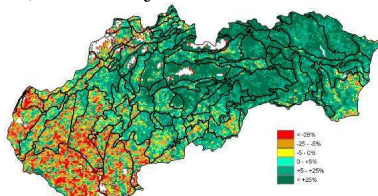
6d) 16. dekáda (1.-10. 6.)



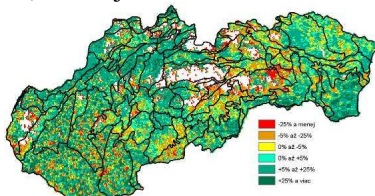


**Obr. 7** Porovnanie vlhkosti povrchu Zeme v roku 2009 s dlhodobým priemerom vlhkosti za identickú dekádu: prvá májová dekáda (7a), prvá júlová dekáda (7b).

7a) 1.-10. máj 2009/ DP



7b) 1.-10. júl 2009/ DP



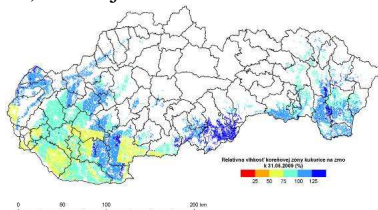
*Vlhkosť pôdy a potreba zavlažovania:*

Analýza vlhkosti pôdy, realizovaná prostredníctvom modelovaných indikátorov, umožňuje hodnotiť a interpretovať vlhkosť pôdy rozhodujúcu z hľadiska vývoja poľnohospodárskych plodín; t.j. obsah vody v pôde, ktorá je prístupná pre rastliny, a tým aj stupeň zabezpečenia nárokov plodín na vodu. Nezanedbateľným pozitívom modelovaných indikátorov vlhkosti pôdy je tiež fakt, že umožňujú pristupovať ku konkrétnej poľnohospodárskej plodine individuálne, t.j. modelované sú pre každú plodinu zvlášť.

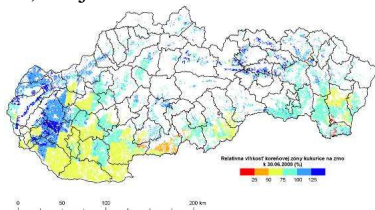
Priamo modelovaným indikátorom vlhkosťných pomerov pôdy je relatívna vlhkosť pôdy, definovaná ako percento dlhodobého priemernej prístupnej vody v pôde (%), prípadne objemová vlhkosť pôdy (%). Na základe simulovaných vlhkosťných indikátorov pôdy a vybraných hydrofyzikálnych vlastností pôd je následne stanovená zásoba vody (mm), deficit vody v koreňovej zóne (mm; obr. 9) a potrebná závlahová dávka pre koreňovú zónu konkrétnej poľnohospodárskej plodiny (mm; obr. 10).

**Obr. 8** Relatívna vlhkosť koreňovej zóny kukurice na zrno (%) v roku 2009

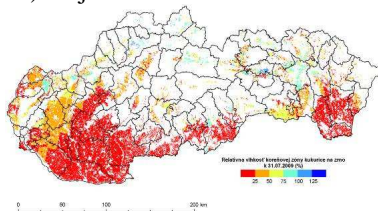
8a) 31.máj



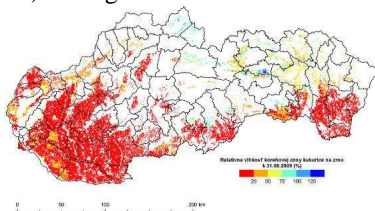
8b) 30.jún



8c) 31.júl

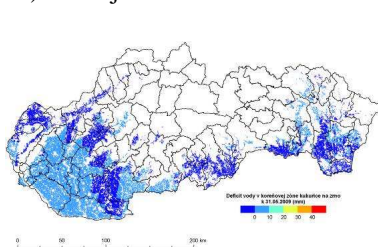


8d) 31.august

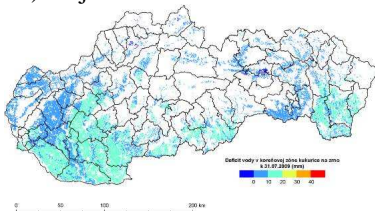


**Obr. 9** Deficit vody v koreňovej zóne (mm) kukurice na zrno v roku 2009

9a) 31.máj



9b) 31.júl



## **Analýza vývoja vegetácie**

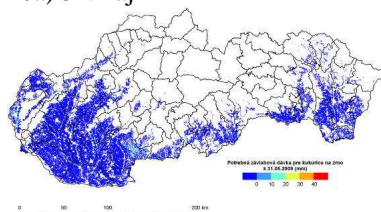
### **Vegetačný index NDVI:**

Prostredníctvom analýzy vegetačného indexu NDVI, realizovanej v desaťdennom časovom intervale, je možné interpretovať vývoj vegetácie vcelku, t.j. bez rozlíšenia jednotlivých plodín a ako odozvu na vývoj počasia a vlhkostného

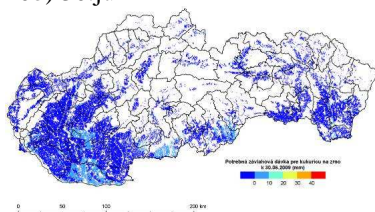
stavu pôdy. Zároveň je možné identifikovať a interpretovať všeobecné trendy vývoja vegetácie v danej vegetačnej sezóne.

**Obr. 10** Potrebná závlahová dávka pre koreňovú zónu kukurice na zrno (%) v roku 2009

10a) 31.máj



10b) 30.jún

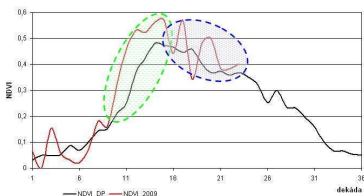


Vývoj vegetačného indexu NDVI, a teda aj vývoj vegetácie, je možné hodnotiť prostredníctvom analýzy a interpretácie priestorových modelov (máp), ktoré umožňujú špecifikovať aj regionálne rozdiely vo vývoji biomasy (obr. 11 a 12). Okrem toho, vegetačný index NDVI a jeho zmeny v čase umožňujú analogicky hodnotiť vývoj vegetácie v konkrétnej sezóne (graf 1), pričom do určitej miery je možné identifikovať aj dôvod daného stavu; oneskorenie alebo predstihnutie nástupu vybraných fenologických fáz a s tým súvisiace rozdiely v produkcii biomasy, trvanie identifikovaného stavu (dočasné, celosezónne), prípadne aj ich spoločný dôsledok na skrátenie alebo predĺženie vegetačného obdobia.

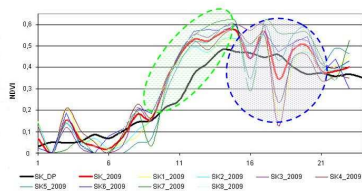
Podobne, ako pri teplote a vlhkosti povrchu Zeme, aj pri interpretácii NDVI je nevyhnutné brať do úvahy aj interpretáciu pokrývky Zeme v časovom horizonte realizovanej analýzy. Práve tento fakt indikuje potenciál interpretácie vegetačného indexu NDVI, a to pri splnení podmienky prechodu na vyššiu rozlišovaciu úroveň satelitných obrazových záznamov a pri spoľahlivej identifikácii pokrývky Zeme (až na úroveň konkrétnej poľnohospodárskej plodiny; regionálna inventarizácia).

**Graf 1** Grafické hodnotenie vývoja hodnôt vegetačného indexu NDVI v roku 2009: úroveň SR (1a) úroveň krajov SR (1b)

**1a)**



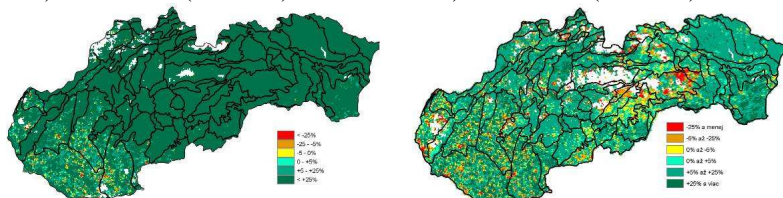
**1b)**



**Obr. 11** Porovnanie vegetačného indexu NDVI v roku 2009 s dlhodobým priemerom NDVI za identickú dekádu (%): prvá májová dekáda (11a), prvá júlová dekáda (11b)

11a) 13. dekáda (1.-10. 5.) / DP

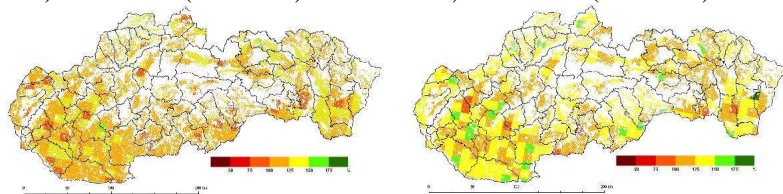
11b) 19. dekáda (1.-10. 7.) / DP



**Obr. 12** Porovnanie vegetačného indexu NDVI v roku 2009 s dlhodobým priemerom NDVI za identickú dekádu (%): druhá májová dekáda (12a), druhá júlová dekáda (12b)

12a) 14. dekáda (11.- 20.5.) / DP

12b) 20. dekáda (11.- 20.7.)



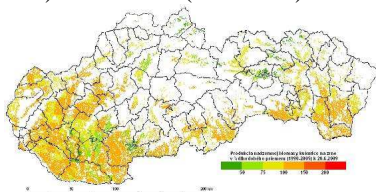
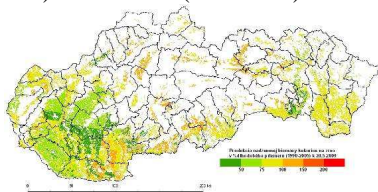
### Modelované vegetačné indikátory:

Analýza vývoja vegetácie, realizovaná prostredníctvom modelovaných vegetačných indikátorov (v desaťdennom časovom intervale) je na rozdiel od analýzy vegetačného indexu NDVI

adresná, t.j. umožňuje sledovať a hodnotiť vývoj každej poľnohospodárskej plodiny samostatne.

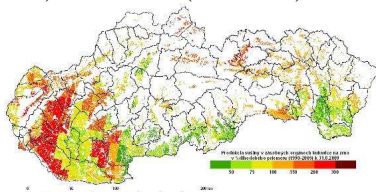
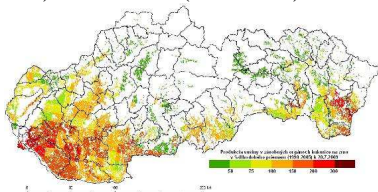
K vegetačným indikátorom, prostredníctvom ktorých je možné analyzovať vývoj porastov poľnohospodárskych plodín, patrí produkcia nadzemnej biomasy (Total Above Ground Production, TAGP; obr. 13a, 13b), produkcia sušiny v zásobných orgánoch (Total Dry Matter in Storage Organs, TWSO; obr.13c a 13d) a listová pokrývnosť (Leaf Area Index, LAI). Do úvahy pripadajú dve možnosti simulácií – potenciálna produkcia, ktorá indikuje tvorbu produkcie plodiny za splnenia podmienky priaznivého vlhkovstného stavu pôd počas celej vegetačnej sezóny (na úrovni poľnej kapacity) a vodou limitovaná produkcia, pri ktorej je braný do úvahy aktuálny vlhkovstný stav pôdy (v každom časovom horizonte je stanovená vodná bilancia pôdy).

**Obr. 13** Modelované vegetačné indexy (%) pre kukuricu na zrno v roku 2009: vodou limitovaná produkcia nadzemnej biomasy (13a, 13b) a vodou limitovaná produkcia sušiny v zásobných orgánoch (13c až 13d).  
13a) 14. dekáda (11.- 20.5.)      13b) 17. dekáda (11.- 20.6.)



13c) 20. dekáda (11.- 20.7.)

13d) 24. dekáda (20.- 31.8.)



Zároveň, pre dôsledné využitie potenciálu modelovania stavu a vývoja porastov poľnohospodárskych plodín v konkrétnej vegetačnej sezóne, je nevyhnutné aplikovať aj výsledky regionálnej inventarizácie. Tá umožní modelovať stav a vývoj

konkrétnej plodiny na konkrétnom (reálnom) stanovišti s reálnymi podmienkami prostredia, čo môže prispieť k presnosti výsledkov modelovania a tým aj k jeho spoľahlivosti.

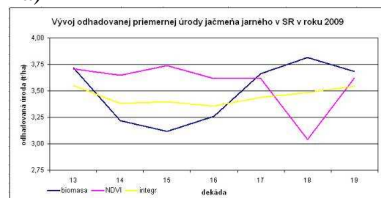
### **Analýza vývoja produkčnej schopnosti**

Analýza vývoja produkčnej schopnosti poľnohospodárskej krajiny, realizovaná v desaťdennom a v mesačnom kroku priebežne počas poľnohospodárskej sezóny, umožňuje sledovať predpokladanú úroveň produkcie konkrétnej plodiny, resp. jej vývoj v závislosti od zmien podmienok prostredia relevantných pre stav a vývoj porastu danej poľnohospodárskej plodiny.

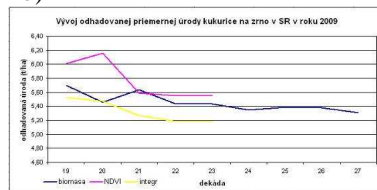
Produkčná schopnosť poľnohospodárskej krajiny je analyzovaná prostredníctvom viacerých, metodicky rozdielnych odhadov úrod (graf 2), pričom využíva výsledky predchádzajúcich hodnotení; stanovujú sa odhady a) prostredníctvom modelovaných vegetačných indikátorov, b) prostredníctvom vegetačného indexu NDVI a c) integrovane, prostredníctvom spomenutých dvoch a odhadov stanovených na základe meteorologických ukazovateľov (vodná bilancia, ktorá zodpovedá rozdielu medzi zaznamenanými atmosférickými zrážkami a úhrnom potenciálnej evapotranspirácie a úhrn atmosférických zrážok, pričom hodnoty oboch sú stanovené za vopred definované obdobie).

**Graf 2** Grafické hodnotenie vývoja očakávaných úrod v roku 2009: jačmeň jarný (2a), kukurica na zrno (2b)

2a)



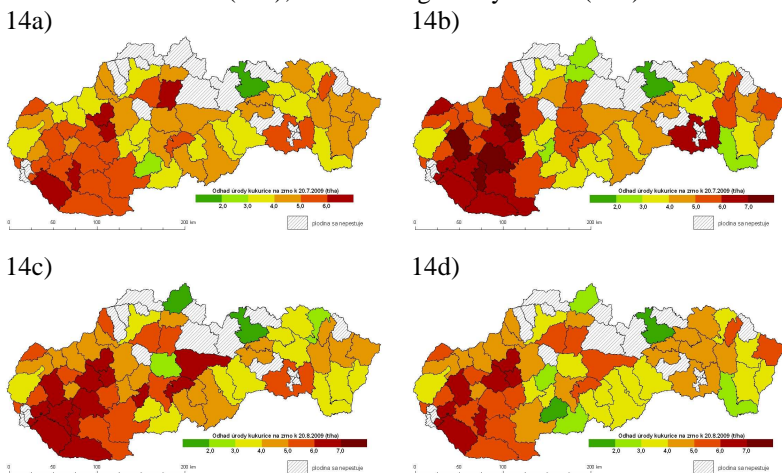
2b)



**Pozn.** Od 23. dekády 2009 neboli k dispozícii údaje NDVI, t.j. nebolo možné stanoviť odhady úrod metódou DPZ a ani integrované odhady.

Priestorovú variabilitu produkčnej schopnosti poľnohospodárskej krajiny, resp. priestorovú variabilitu predpokladaných úrod konkrétnych plodín, je možné analyzovať a vizualizovať na úrovni okresov (obr. 14), prípadne krajov. Limitujúcim faktorom prechodu na podrobnejšiu úroveň (obce) je v súčasnosti nedostupnosť štatistických údajov o osevných plochách a dosiahnutých úrodách za tieto administratívne jednotky.

**Obr. 14** Odhadované úrody kukurice na zrno v roku 2009: k 20.7. metóda biofyzikálneho modelovania (14a); k 20.7. metóda DPZ (14b); k 20.8. metóda DPZ (14c); k 20.8. integrovaný odhad (14d).



## ZÁVER

V príspevku je prezentovaný *návrh metodického postupu pre analýzu produkčnej schopnosti poľnohospodárskej krajiny*, ktorý tvoria úrovně: a) *analýza dynamiky podmienok prostredia* (počasie, teplota a vlhkosť zemského povrchu a vlhkosť pôdy); b) *analýza stavu a vývoja vegetácie, resp. porastov poľnohospodárskych plodín* (interpretovaný vegetačný index NDVI a modelované vegetačné indikátory) a c) *samotná analýza vývoja produkčnej schopnosti* (odhady priemerných úrod).

Prezentovaný metodický postup je navrhnutý *v súlade s geosystémovým a geografickým prístupom* k riešeniu problematiky. Poľnohospodárska krajina v priestore je uvažovaná zjednodušene vo forme systému PRAT, prvky systému PRAT sú analyzované samostatne, avšak zachovaná je úroveň väzieb medzi nimi (v podobe ich priestorovej, procesnej a časovej nadväznosti), ktorá zabezpečuje istú komplexnosť pri riešení tohoto problému.

*Funkčná a priestorová nadväznosť* identifikovaných úrovní, ako aj ich *časová harmonizácia*, umožňujú realizovať podobné analýzy s celoslovenským pokrytím v stanovených, pravidelných časových intervaloch počas celej vegetačnej sezóny. Preto navrhovaný metodický postup zodpovedá nielen požiadavkám všeobecného systému *monitorovania* charakteru vývoja aktuálnej, či historickej poľnohospodárskej sezóny, ale aj požiadavkám funkčného *varovného systému*.

Je zrejmé, že reálne využitie výsledkov realizovaných analýz v praxi vyžaduje ich *validáciu* z hľadiska ich presnosti a vierohodnosti, ako aj „vysporiadanie sa“ so zodpovedajúcim *stupňom generalizácie*. Navrhovaný postup však predstavuje otvorený systém, a to ako z hľadiska prechodu na detailnejšiu rozlišovaciu úroveň v zmysle priestorovej mierky, časovej mierky či procesnej mierky, tak aj v zmysle integrácie ďalších analytických metód monitorovania porastov poľnohospodárskych plodín (napríklad terénneho prieskumu).

### **Pod'akovanie**

*Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0242-06*

## **LITERATÚRA**

KRCHO, J., 1990. Morfometrická analýza a digitálne modely reliéfu. Bratislava: Veda, 427 s., ISBN 80-224-0018-1



- LAPIN, M., FAŠKO, P., KVETÁK, Š., 1988. Klimatické normály. Metodický predpis 3-09-1/1. Bratislava : Slovenský hydrometeorologický ústav, 6. s.
- MIČIAN, L., ZATKALÍK, F., 1986: Náuka o krajine a starostlivosť o životné prostredie. 1.vyd., Skriptum PRIF UK Bratislava, 137 s.
- MINÁR, J., BARKA, I., BONK, R., BIZUBOVÁ, M., ČERŇANSKÝ, J., FALĽAN, V., GAŠPÁREK, J., KOLÉNY, M., KOŽUCH, M., KUSEDOVÁ, D., MACHOVÁ, Z., MIČIAN, L., MIČIETOVÁ, E., MICHALKA, R., NOVOTNÝ, J., RUŽEK, I., ŠVEC, P., TREMBOŠ, P., TRIZNA, M., ZAŤKO, M., 2001. Geoeologický (komplexný fyzickogeografický) výskum a mapovanie vo veľkých mierkach. Geografické spektrum, 3, Geografika, Bratislava, 210 s., ISBN 80-968146-3-X
- NOVÁK, V., 1995. Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania. Bratislava: VEDA, 253 s.
- NOVÁKOVÁ, M., 2007. Interpolácia meteorologických údajov pre potreby monitoringu stavu, vývoja a odhadu úrod poľnohospodárskych plodín. Vedecké práce, č. 29, Bratislava: VÚPOP, s. 93 – 103
- NOVÁKOVÁ, M., 2009. Identifikácia regiónov s výskytom sucha v podmienkach poľnohospodársky využívaného územia SR. In: BLÁHA, L. (ed.) *Vliv abiotických a biotických stresov na vlastnosti rastlín 2009*. Praha: VÚRV, s. 254-260, ISBN 978-80-97011-91-1
- NOVÁKOVÁ, M., SKALSKÝ, R., 2008. Agrometeorologické modelovanie – alternatívny spôsob monitorovania stavu a vývoja biomasy. In Rožnovský, J., Litschmann, T.(ed.), Bioklimatologické aspekty hodnocení procesův krajine. Mikulov 9. – 11.9.2008, Praha: Český hydrometeorologický ústav pre Českú bioklimatologickú spoločnosť, ISBN 978-80-86690-55\_1, Dostupné na internete: <http://www.cbks.cz/Mikulov08b/index.htm>, stránka navštívená 19. decembra 2008
- ŠPÁNIK, F., ANTAL, J., TOMLAIN, J., ŠKVARENINA, J., REPA, Š, ŠIŠKA, B., MALIŠ, J., 2000. Aplikovaná agrometeorológia.

Nitra: Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, 194 s.,  
ISBN: 80-7137-795-3

SUPIT, I., HOOIJER, A.A., VAN DIEPEN, C.A. (EDS.), 1994.  
System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation  
Model Implemented in CGMS. Volume1: Theory and  
Algorithms (EUR 15956 EN). Luxembourg: Office for  
Official Publications of the European Community, 146 pp.

SUPIT, I., VAN DER GROOT, E., 2003. Updated system description  
of the WOFOST crop growth simulation model as  
implemented in the crop growth monitoring system applied  
by European Commission. In Treebook 7, Heelsum: Treemail  
Publishers, 122 pp., ISBN 90-804443-8-3



## NÁVRH REGIONÁLNEHO INFORMAČNÉHO SYSTÉMU EKOLOGICKÉHO A PRODUKČNÉHO STAVU LESA NA BÁZE ÚDAJOV DPZ

**Ivan Barka**

*Národné lesnícke centrum, Lesnícky výskumný ústav,  
T. G. Masaryka 22, Zvolen  
email: [barka@nlcsk.org](mailto:barka@nlcsk.org)*

**Abstract:** The proposal of concept and development of Regional information system (RIS) of ecological and productive state of forest is presented. The RIS is proposed to inform about the actual state of forest stands, its changes and productive characteristics derived from the remote sensing data. The RIS is proposed to be equipped with tools for collection and preprocessing of input data, their storage, analyses and presentation of output data via internet map application. Geographically it covers Western Carpathians and adjacent parts of surrounding units, especially the Panonian basin. The remote sensing data from satellites MODIS, Landsat, SPOT and Aster are the main input data for RIS. The evaluation of ecological state of forest within the RIS is based on the identification of areas with the signs of spruce (*Picea abies* L.) stands decline and forest windbreaks. The evaluation of productive state is based on the object oriented approach to processing of Modis data. MODIS enable to monitor biophysical and structural properties of forest ecosystems as: *Normalised vegetation index* (NDVI), *Enhanced vegetation index* (EVI), *Leaf area index* (LAI), *Photosynthetic active radiation absorbed by vegetation* (FPAR). Mentioned characteristics are important identifiers of health and ecological status of forest. They are used as input into production models of Gross and Net Primary Production (GPP and NPP). The final results are presented to users through two web map applications.

---

The paper presents proposal of the structure of RIS, comparison of available software solutions and present results of RIS development. Several methods of processing and utilization of satellite imagery data were tested.

**Key words:** ecological and productive state of forest, changes of the state of forest, remote sensing, satellite data

**Abstrakt:** Príspevok spracováva problematiku návrhu koncepcie a postupnej prípravy regionálneho informačného systému (RIS) o ekologickom a produkčnom stave lesných porastov. Informačný systém má za úlohu sprístupňovať na internetovej sieti informácie o aktuálnom stave lesných porastov, jeho zmenách a produkčných charakteristikách, ktoré sú založené na báze údajov diaľkového prieskumu Zeme (DPZ). Úlohami pripravovaného systému sú: zber a predspracovanie vstupných informácií, ukladanie a triedenie dát, ich analýza a spracovanie výstupov, ktoré budú následne publikované na internete. Z geografického hľadiska RIS pokrýva územie Západných Karpát, severných partií Panónskej nížiny a priľahlých častí okolitých jednotiek. Hlavnými vstupmi do systému sú údaje DPZ v podobe satelitných snímok Modis, Landsat, Spot a Aster. Pri sledovaní ekologického stavu porastov sa RIS zameriava na prejavy hynutia smrečín a vetrových polomov. Pri hodnotení produkčného stavu lesných porastov systém vychádza z objektovo orientovaného prístupu spracovania údajov satelitných dát MODIS, pomocou ktorých je modelovaná primárna produkcia porastov. Monitorované sú biofyzikálne a štrukturálne charakteristiky lesných ekosystémov, ako napr.: *Normalizovaný vegetačný index (NDVI), zdokonalený vegetačný index (EVI), listový index (LAI), podiel fotosynteticky aktívnej radiácie pohltenej vegetáciou (FPAR)*. Uvedené charakteristiky sú dôležité identifikátory zdravotného, produkčného a ekologického stavu lesa. V informačnom systéme sú využívané ako vstupy do fenologického modelu a modelov hrubej a čistej primárnej produkcie (GPP, NPP). Finálne výstupy sú užívateľom poskytované pomocou dvoch webových aplikácií s údajmi o ekologickom a produkčnom stave lesa a jeho zmenách.

Príspevok prezentuje analýzu štruktúry systému, porovnanie vhodnosti vybraných softvérových nástrojov využiteľných pre jeho prípravu a doterajšie výsledky budovania RIS. Boli preverené viaceré dostupné metódy spracovania satelitných snímok a ich vizualizácie s ohľadom na uľahčenie identifikácie stavu lesných porastov a jeho zmien tak, aby boli vhodné aj pre menej skúsených užívateľov RIS.

**Kľúčové slová:** ekologický a produkčný stav lesných porastov, zmeny stavu lesných porastov, diaľkový prieskum Zeme, satelitné dáta

## ÚVOD

V súčasnosti dostupné údaje z kozmického prieskumu Zeme umožňujú kontinuálne a plošne sledovanie biofyzikálnych a produkčných charakteristík lesných porastov. Z nich je možné zostaviť regionálny informačný systém (RIS), ktorý bude pre vybrané územie poskytovať informácie o ekologickom a produkčnom stave lesa.

Cieľom navrhovaného RIS je na základe údajov z DPZ poskytovať informácie o ekologickom a produkčnom stave lesa. Kvalita použitých satelitných dát umožňuje pracovať v systéme s priestorovými jednotkami na úrovni dielca. Systém pokrýva územie celého Slovenska a prilahlých oblastí, t.j. väčšinu Západných Karpát, severných partií Panónskej nížiny a častí okolitých jednotiek, čo umožňuje lepšie pochopenie dopadov zmien chemizmu atmosféry (znečistenie ovzdušia, klimatická zmena) na les a uľahčuje technické spracovanie celej satelitnej scény pokrývajúcej daný región. Pri sledovaní ekologického stavu sa systém zameriava najmä na odumieranie a rozpad smrekových porastov a vetrové polomy vo všetkých typoch porastov. Produkčný stav hodnotí predovšetkým pomocou hrubej a čistej primárnej produkcie (GPP a NPP), ktorá je odvodená pomocou normalizovaného vegetačného indexu (NDVI), normalizovaného vodného indexu (NDWI), listového indexu (LAI) a podielu fotosynteticky aktívnej radiácie pohltenej vegetáciou (FPAR).

---

Vstupná báza údajov do RIS je tvorená najmä voľne dostupnými satelitnými údajmi zo spektrorádiometrov MODIS a Landsat, čiastočne tiež zakúpenými snímkami SPOT a ASTER.

Cieľom predkladaného príspevku je prezentovať jednak návrh informačno-technologickej koncepcie takéhoto regionálneho systému a tiež porovnanie rôznych prístupov k tvorbe nástrojov RIS pre manažovanie, prístup a prezentáciu informácií o ekologickom a produkčnom stave lesa.

## **MATERIÁL A METÓDY**

Použitý materiál a metódy sú ovplyvnené dostupnosťou dát a softvérového vybavenia. Uprednostnené boli voľne dostupné dáta z dôvodu ich vhodnosti, priestorového pokrytia a minimalizácie finančnej náročnosti projektu. Zvolené softvérové nástroje musia byť dostupné z hľadiska znalosti a licencií pre všetkých tvorcov systému a umožniť efektívne spracovanie a publikovanie výstupných údajov.

### *Tvorba štruktúry RIS*

Štruktúra RIS je optimalizovaná tak aby čo najlepšie zodpovedala logickému postupu spracovania vstupných údajov a získavania výsledných informácií. Užívateľ by mal mať prístup jednak k informáciám o ekologickom a produkčnom stave lesa, jednak k čiastkovým biofyzikálnym charakteristikám a pokiaľ je to relevantné, aj k náhľadu vstupných údajov.

Z praktických dôvodov je systém rozdelený do dvoch subsystémov, z ktorých každý ústi do jednej mapovej aplikácie poskytujúcej výsledné informácie cez internetový prehliadač. Prvý subsystém je zameraný na sledovanie stavu lesa a jeho zmien najmä pomocou snímok Landsat, druhý na sledovanie produkčného stavu lesa založenom na snímkach MODIS. Každý subsystém pozostáva z nástrojov na predspracovanie a analýzu dát zahrnutých buď v klasických desktopových mapových aplikáciách (napr. ArcMap) alebo vytvorených pre špecifické účely pomocou skriptovacích a programovacích jazykov, uloženie spracovaných dát je riešené pomocou geodatabázy, z ktorej sú

následne dáta priamo použité pre publikovanie výstupov pomocou webových aplikácií.

### *Použité programové vybavenie*

Regionálny informačný systém je postavený na báze geografických informačných systémov (GIS). Tieto poskytujú dostatok nástrojov pre ukladanie a prácu s priestorovými informáciami (Tuček 1998, Burrough a McDonnell 1998, Fotheringham a Wegener 2000, Longley et al. 2001). Nosným softvérovým prostredím sú ArcGIS Desktop a ArcGIS Server od spoločnosti ESRI, ktoré umožňujú operatívne priestorové analýzy, viacuzivateľský prístup a ukladanie dát ako i následnú publikáciu mapových kompozícií prostredníctvom internetu. Ich veľkou výhodou je jednoduchý vývoj a implementácia nových nástrojov na úpravu a analýzu údajov do podoby uceleného systému (Minár et al. 2005, Mentlík et al. 2006). Pre špecifické analytické operácie sú využívané aj ďalšie programové nástroje (Erdas, Idrisi, etc.).

RIS používa pre ukladanie finálnych dát geodatabázové riešenie (Arctur a Zeiler 2004). Geodatabáza je špecifický prípad databázy, pričom jej tvorba sa opiera predovšetkým o klasický databázový dizajn. Hlavný rozdiel medzi klasickou databázou a geodatabázou spočíva v uložení „priestorových“ údajov (t.j. vzťahnutých ku konkrétnemu miestu na zemskom povrchu). Výhodami databázového riešenia sú bezpečné ukladanie dát a efektívna práca viacerých užívateľov súčasne s veľkým množstvom údajov. Geodatabáza umožňuje rýchle nakladanie s priestorovými dátami pomocou priestorových indexov. Geodatabáza RIS bola implementovaná ako ESRI geodatabáza (ArcSDE, ktorá je súčasťou produktu ArcGIS Server) postavená na Microsoft SQL Serveri 2008, z dôvodu robustnosti a kompatibility s ostatným programovým vybavením od firmy ESRI.

Špecifické nástroje potrebné na predspracovanie a prípravu vstupných dát pre analýzu a následnú publikáciu sú vytvárané v programovacom jazyku Python a začleňované ako rozšírenia do

---



štandardnej sady nástrojov mapových aplikácií RIS. Tieto nástroje sú využívané najmä na automatizovanie spracovania veľkého množstva vstupných údajov.

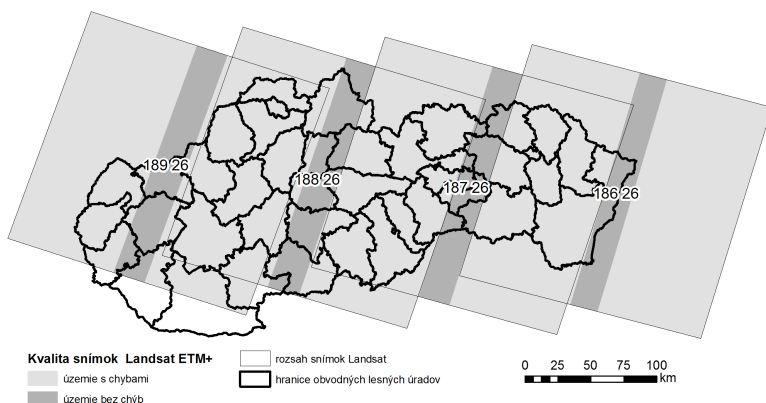
Spracované dáta uložené v priestorovej databáze je možné vďaka použitému riešeniu veľmi rýchlo a jednoducho publikovať pre odbornú verejnosť pomocou internetu. Využitá je pri tom integrácia jednotlivých ESRI produktov, ktoré pri tvorbe webovej aplikácie využívajú priamo projekt desktopového balíka ArcMap. Toto riešenie umožňuje sprístupniť pomocou internetu užívateľom RIS výsledné údaje takmer v rovnakej podobe ako k nim pristupuje tvorca RIS.

### *Vstupné údaje*

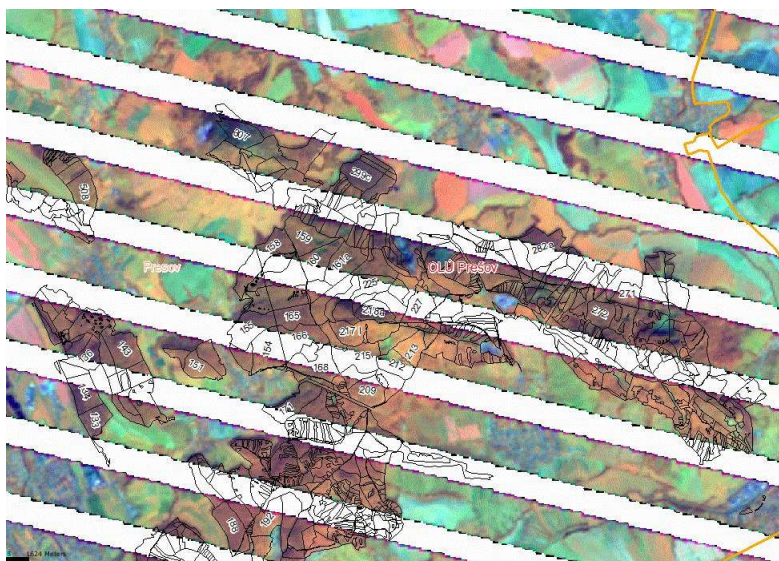
Sledovanie stavu lesa je založené na dátach zo satelitov Aster (s rozlíšením 15 m) , SPOT (s rozlíšením 10 m) a Landsat 4-5 TM a Landsat 7 ETM+ (rozlíšenie 30, resp. 15 m). Snímky zo satelitov SPOT a Aster sú poskytované za úhradu, snímky LANDSAT sú voľne dostupné a získavané pomocou aplikácie GLOVIS (USGS Global Visualisation Viewer, <http://glovis.usgs.gov>).

Snímky SPOT a ASTER pokrývajú územie cca 60x60 km, cena jednej snímky sa pohybuje na úrovni cca 3000 eur. Ich výhodou je vysoké priestorové rozlíšenie, nevýhodou nároky na spracovanie a menší počet spektrálnych kanálov (4, resp. 3).

Snímky Landsat pokrývajú celé Slovensko pri nulových obstarávacích nákladoch, pričom na pokrytie cca 92% územia stačia 3 snímky (obr. 1). Jedna snímka zachytáva územie cca 190x180 km. Pokrytie snímok TM i ETM+ je rovnaké, rôzna je však ich kvalita. Kým snímky TM majú konečné rozlíšenie 30 m, snímky ETM+ je možné vďaka prítomnosti panchromatického kanála upraviť do kvalitnejšieho rozlíšenia 15 m, spravidla však obsahujú pásy bez údajov kvôli chybe senzora (obr. 2). Centrálny pás v dráhe satelitu so šírkou 21 km je bez chýb, smerom od neho po okraje snímky sa šírka chýbajúcich údajov zväčšuje. Celkovo chyba zo snímky cca 22% údajov.



Obrázok 1: Pokrytie Slovenska snímkami Landsat a kvalita snímok Landsat ETM+

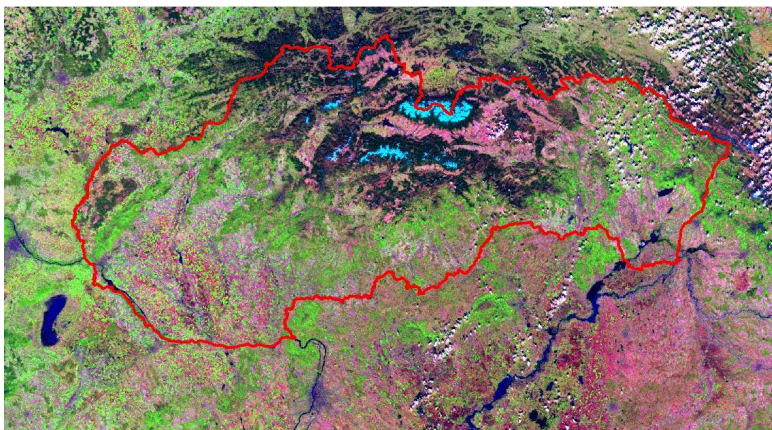


Obrázok 2: Chyby v dátach Landsat ETM+

Kvantitatívne údaje o biofyzikálnych a produkčných charakteristikách sú odvodzované z údajov MODIS (obr. 3). Vstupné dáta zo satelitu Modis Terra sú poskytované bez úhrady prostredníctvom serverov NASA. Hlavnými výhodami týchto dát

sú denná opakovateľnosť snímania územia Slovenska, široký spektrálny rozsah (od 0.4 do 14.5  $\mu\text{m}$ ), snímanie v 36 spektrálnych kanáloch a priestorová rozlišovacia schopnosť (od 250 m do 1 km). Z pomerne širokej škály predspracovaných údajov boli zvolené pre využitie v systéme RIS produkty MOD09 (GA a GQ) v dennom kroku, MCD15A2 v 8 dennom kroku a MOD13 v 16 dennom kroku. Predmetom analýz je časový rad záznamov z rokov 2000-2009, a to pre všetky biofyzikálne a produkčné charakteristiky.

Z produktu MOD09GA sú využívané najmä kanále 3, 4, 5, 6, a 7 (centrované na 470 nm, 555 nm, 1240 nm, 1640 nm a 2130 nm), predstavujúce odraz žiarenia od zemského povrchu, resp. jeho odhad po odstránení rušivých vplyvov atmosféry. Všetky tieto kanále majú pôvodné priestorové rozlíšenie 500 m. Kanále 1 a 2 boli nahradené z produktu MOD09GQ (v rozsahu 620-670 nm, resp. 841-876 nm), kde sú dostupné v rozlíšení 250 m.



Obrázok 3: Ukážka satelitnej snímky MODIS

Poslednými vrstvami z jednodňových produktov sú vrstvy s údajmi o kvalite ostatných kanálov a o pozícii Slnka počas snímania (Solar Zenith a Azimuth), ktoré majú rozlíšenie 1 km. Z produktu MCD15A2 sú extrahované vrstvy s informáciami o FPAR a LAI. Tieto majú rozlíšenie 1 km. Produkt MOD13A1

obsahuje vrstvy NDVI a EVI ako údaje so 16-denným krokom v rozlíšení 500 m.

### *Spracovanie údajov*

Prvotné spracovanie získaných vstupných údajov prebieha v rámci ArcGISu. Boli vytvorené skripty v programovacom jazyku Python (Corey 2004) pre geografický informačný systém ArcGis 9.3, ktoré odbúravadajú rutinu pri opakovanej úprave vstupných súborov. Nástroje boli začlenené do kolekcie nástrojov ArcToolbox a sú dostupné priamo zo štandardného užívateľského rozhrania desktopovej aplikácie ArcMap. Vďaka širokej škále doplnkových modulov jazyka Python bolo takto automatizované tiež preberanie dát MODIS pomocou FTP protokolu zo serverov NASA.

Snímky SPOT a ASTER sú využívané pri tvorbe kompozícií pre priamu identifikáciu zmien stavu lesa a je potrebné ich najskôr ortorektifikovať. Následne je zo snímok z dvoch po sebe idúcich rokov vytvorená kompozícia kanálov infračervený(rok X) – infračervený(rok X-1) – zelený(rok X-1) zo snímok SPOT a Aster. Takéto poradie kanálov umožňuje zvýraznenie plôch so zmenami stavu lesa v odtieňoch červenej farby (obr. 4). Z licenčných dôvodov bol vo webovej aplikácii systému sprístupnený výsledok neriadenej klasifikácie kompozície do 80 (2008-2009), resp. 255 (2007-2008) tried, ktorý na jednej strane dodržiava licenčné podmienky a na druhej farebne verne napodobuje originálnu kompozíciu. Priestorové rozlíšenie publikovaného rastra ostalo nezmenené, t. j. 10 m.

---



Obrázok 4: Zvýraznenie plôch so zmenami v stave lesa

Spracovanie snímok Landsat TM je relatívne jednoduché, snímky je potrebné transformovať do súradnicového systému S-JTSK, a upraviť ich kontrast pre ľahšiu vizuálnu identifikáciu zmien stavu lesa. Snímky Landsat ETM+ sú prevádzané z rozlíšenia 30 m na 15 m (tzv. Pan-sharpening) pomocou štandardného nástroja ESRI. Pokiaľ sú k dispozícii dve prekrývajúce sa snímky s nevelkým časovým odstupom, je možné aspoň čiastočne odstrániť chybovosť snímok ETM+ v miestach prekryvu doplnením chýbajúcich údajov z druhej snímky.

Širšia paleta nástrojov je využívaná pri spracovaní dát pre subsystem RIS venovaný produkčnému stavu lesa. Vzhľadom na značný objem vstupných dát prebieha ich získavanie, spracovanie a príprava podkladov pre výpočty pomocou automatizovaných nástrojov. Boli vytvorené skripty v programovacom jazyku Python pre geografický informačný systém ArcGis 9.3, ktoré z originálnych súborov vo formáte hdf extrahujú požadované vrstvy (kanále) a transformujú ich do súradnicového systému S-JTSK.

Rozlíšenie všetkých výstupných súborov (veľkosť bunky rastra) je už v tomto kroku stanovená na konečných 250 m. Využitím programovacieho jazyka Python bolo možné automatizovať získavanie súborov zo serverov NASA a ich prípravu pre ďalšie výpočty ako i zobrazenie priamo v systéme ArcGIS. Po počiatočnom spracovaní je však nutné manuálnym posúdením kvality satelitných snímok vylúčiť snímky s veľkou oblačnosťou, resp. podľa podielu oblačnosti zaradiť snímku do triedy kvality. Ďalšie výpočty a tvorba fenologického modelu prebiehajú v prostredí IDRISI Taiga s využitím štatistických analýz. Za týmto účelom prebieha konverzia dát do formátu Idrisi RST. Výsledky sú opätovne ukladané do geodatabázy ArcSDE.

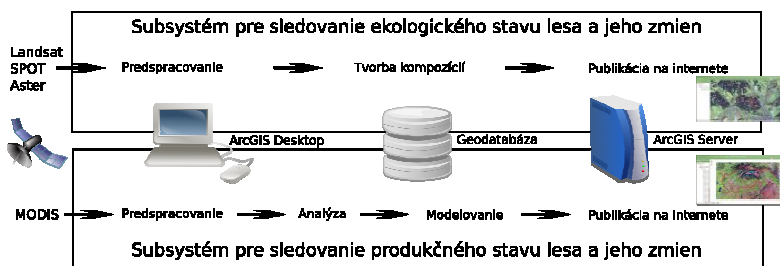
#### *Publikovanie dát v internetovej sieti*

Publikácia výsledných dát predstavuje vďaka kompatibilite využívaných softvérových balíkov relatívne jednoduchý proces, ktorý je však z hľadiska užívateľov systému kľúčový. Dáta, resp. jednotlivé mapové vrstvy, uložené v geodatabáze sú v projekte desktopovej mapovej aplikácie vo formáte mxd usporiadané do štruktúry v ktorej majú byť prezentované na internete, pričom je optimalizovaný spôsob ich zobrazenia (farebné vyváženie, popis objektov), nadefinovaná legenda a ďalšie doplňujúce informácie. V tejto fáze je možné pridať do projektu aj doprogramované nástroje, ktoré majú byť prístupné užívateľom webových aplikácií. Hotový projekt sa sprístupní na internetovej sieti pomocou produktu ArcGIS Server, v ktorom sa nastaví mapová služba využívajúca pripravený mxd súbor. Informácie, ktoré nie je možné vložiť priamo do mapovej aplikácie, sú publikované pomocou klasickej webovej stránky informačného systému.

## **VÝSLEDKY**

Hľadaním optimálneho variantu a postupným budovaním systému vzniká nasledovná štruktúra: RIS pozostáva z dvoch subsystémov pre sledovanie ekologického a produkčného stavu lesa, pričom každý subsystém má svoje nástroje pre získavanie, predspracovanie, analýzu a publikáciu dát (obr. 5).

---



Obrázok 5: Štruktúra informačného systému

### *Subsystém pre sledovanie ekologického stavu lesa*

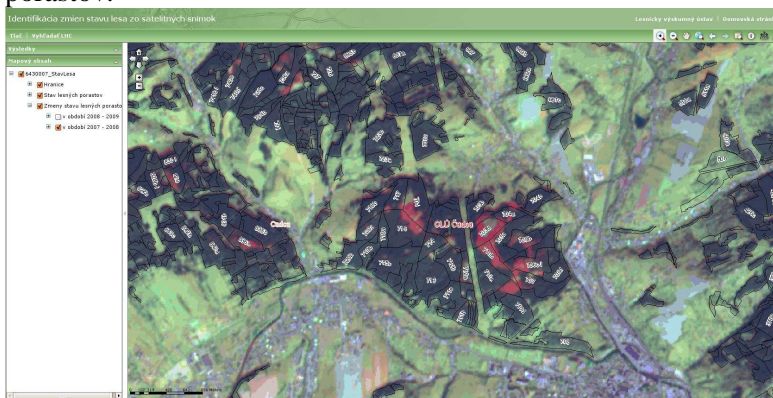
Porovnávanie zmien stavu lesa prebieha dvomi rôznymi prístupmi. Prvý prístup je priame porovnanie vybraných kanálov snímok z dvoch po sebe idúcich období v podobe jednej kompozície, ktorá vizuálne zvýrazní lokality, kde došlo v uvedenom období k silnému poškodeniu, rozpadu alebo odlesneniu spôsobeného ťažbou. Tento spôsob je náročnejší na spracovanie, avšak umožňuje rýchlejšiu a prehľadnejšiu identifikáciu zmien. Druhým prístupom je vizuálne porovnávanie samostatných kompozícií pre každé porovnávané obdobie. Príprava satelitných kompozícií je v tomto prípade jednoduchšia, avšak vizuálne porovnávanie dvoch snímok kladie väčšie nároky na schopnosť používateľa spozorovať zmeny.

Pri hynutí smrečín bola zvolená metóda porovnávania vybraných kanálov satelitných snímok Spot a Aster s rozlíšením 10 m z dvoch po sebe idúcich rokov. Výsledná kompozícia kanálov satelitných snímok zobrazuje zmeny v stave lesa v odtieňoch červenej farby. Výhodou tohto prístupu sú ľahko identifikovateľné zmeny, nevýhodou naopak časová a finančná náročnosť pri získavaní a spracovaní satelitných snímok. Spracované snímky je však možné využiť taktiež pre klasifikáciu zdravotného stavu smrekových porastov s využitím hodnôt defoliácie meranou terestricky na vzorových plochách.

Pri vetrových polomoch bolo uprednostnené vizuálne porovnávanie dvojice snímok Landsat snímaných s odstupom 2 roky. Dôvodom je veľká rozloha územia, na ktorom sa polomy vyskytujú a ktoré bolo potrebné pokryť satelitnými snímkami.

Výhodou sú nízke finančné náklady, nevýhodou zas nízke rozlíšenie snímok 30, resp. 15 m a chybovosť snímok Landsat 7 ETM (obr. 2) spôsobená neodstrániteľnou poruchou senzora na satelite. Chybovosť je možné aspoň sčasti odstrániť pokiaľ sú k dispozícii dve prekrývajúce sa snímky s malým časovým odstupom (nie viac ako mesiac). Túto nevýhodu vyvažuje aj operatívnosť vkladania nových snímok do systému, ktorá sa môže pohybovať v desiatkach minút od uvoľnenia snímok na serveroch NASA.

Využitelnosť vytvoreného subsystému RIS je už testovaná v praxi v podobe pilotného projektu pre potreby štátnej správy a lesohospodárov. Subsystém je prístupný na adrese <http://www.nlcsk.sk/stales>. V jeho webovej mapovej aplikácii (obr. 6) sú doposiaľ spracované zmeny v stave lesa za obdobie 2007-2008 pre územie severného Slovenska a za roky 2008-2009 pre centrálnu časť Slovenska. Zo snímok Landsat boli pripravené dvojice scén zachytávajúce stav lesa s dvojročným časovým odstupom, ktorých vzájomným porovnaním je možné identifikovať zmeny stavu. Celkovo sa jedná o 4 dvojice snímok – po jednej pre západné a stredné, a dve pre východné Slovensko. Orientácia v mape je zabezpečená pomocou vrstiev obvodných lesných úradov, lesných hospodárskych celkov a lesných porastov.

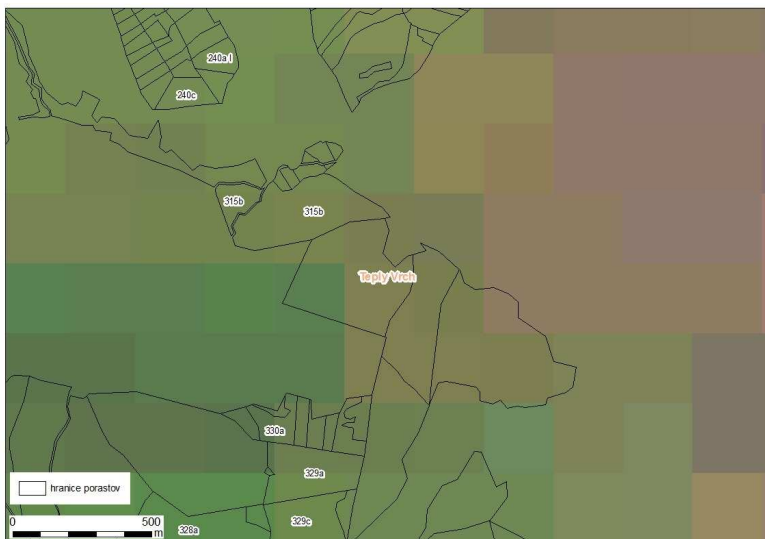


Obrázok 6: Mapová aplikácia pre sledovanie stavu lesa a jeho zmien



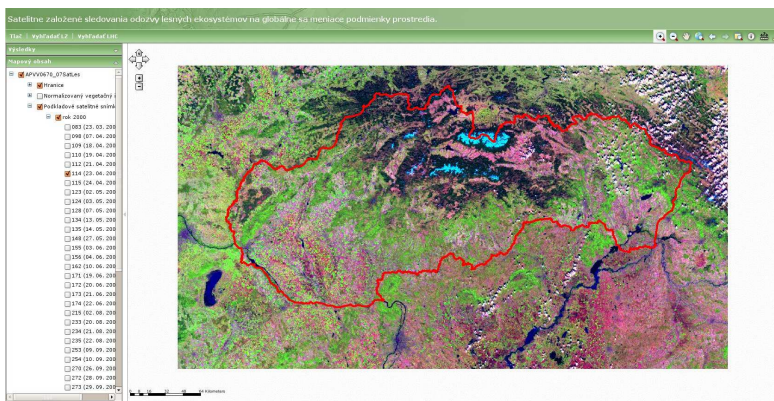
### *Subsytém pre sledovanie produkčného stavu lesa*

Subsytém pre sledovanie produkčného stavu lesa vychádza z produktov satelitu MODIS a na nich založenom modelovaní hrubej a čistej primárnej produkcie (Pavlendová 2009, Pajtk a Cebecauer 2009). Územne pokrýva aj oblasti za hranicami Slovenskej republiky. Rozšírenie pokrytia na územie mimo Slovenska, najmä smerom do Panónskej nížiny, umožňuje lepšie pochopenie dopadov zmien chemizmu atmosféry (znečistenie ovzdušia, klimatická zmena) na les a technicky uľahčuje spracovanie vstupných dát. Základnou jednotkou priestorového rozdelenia lesa, ku ktorej systém vzťahuje údaje odvodené z MODISu, je dielec (obr. 7.). Jeho výmera ( $\square$  od 5 do 20 ha) približne korešponduje s veľkosťou obrazového elementu MODIS (6.25 ha pre najdôležitejší červený a infračervený kanál). Výstupy je však možné vzťahovať aj k vyšším jednotkám rozdelenia lesa t.j. k hospodárskym súborom, lesným častiam, podoblastiam a oblastiam.



Obrázok 7: Porovnanie priestorového rozlíšenia MODIS a veľkosti dielca

Prípravovaná webová aplikácia, dostupná na adrese <http://www.nlcsk.sk/satlesys> (obr. 8) nateraz sprístupňuje užívateľom podkladové satelitné snímky a vegetačné indexy s rozlíšením 250 m pre obdobie 2000-2009. Jedná sa o snímky s minimálnym pokrytím oblačnosťou, pričom priemerný počet snímok pre jeden rok je 27 a pohybuje sa v rozmedzí 19 (rok 2005) až 39 (rok 2000).



Obrázok 8: Prípravovaná mapová aplikácia pre sledovanie produkčného stavu lesa

Ďalšie pripravované tematické bloky rastrov budú sprístupňovať údaje o LAI, FPAR, hrubej a čistej primárnej produkcii. Ich štruktúra bude obdobná ako usporiadanie už existujúcich blokov.

Koncový užívateľ bude mať okrem rastrových podkladov k dispozícii aj vektorovú vrstvu dielcov, s informáciami spracovanými do atribútovej tabuľky. Takto bude mať lepší prístup k hľadaným informáciám, ktoré bude možné vizualizovať aj v podobe grafov.

Podobne ako v subsystéme o ekologickom stave lesa je orientácia užívateľa v mape riešená pomocou vektorových vrstiev lesných hospodárskych celkov (LHC) a porastov (JPRL). Prítomnosť vektorových vrstiev taktiež umožňuje vyhľadať konkrétny objekt v mape (napr. LHC).

### *Vývoj špecializovaných nástrojov RIS*

Tvorba nástrojov pre manažovanie, prístup a prezentáciu informácií je závislá na použitom softvéri. Ako najvhodnejšie riešenie sa ukázalo využitie jazyka Python, v ktorom je možné vyvíjať nástroje pre ArcGIS. Nové nástroje je možné implementovať tak do prostredia desktopovej ako aj webovej mapovej aplikácie a využívať spolu so štandardnou sadou nástrojov. Overovaná bola taktiež využiteľnosť iných riešení z oblasti softvéru s otvoreným zdrojovým kódom, konkrétne kombinácia nástrojov GDAL, PROJ.4 a GRASS. Výhody a nevýhody jednotlivých prístupov k spracovaniu dát porovnáva tabuľka 1.

Kombinácia produktov ArcGis/Python s publikáciou dát pomocou ArcGIS Servera sa ukázala ako najvhodnejšie a najkomplexnejšie riešenie. Publikácia výsledných dát je rýchla a operatívna. Naopak nevýhodou je potreba licencií aj pre mapovú algebru, čo zvyšuje finančnú náročnosť systému. Kombinácia programových balíkov GDAL/Python (s možnosťou publikovania dát cez Mapserver) je vhodná skôr len pre jednoduché úpravy ako je transformácia a orezávanie rastrov. Najmä rastrová algebra je v tomto prípade náročná na tvorbu skriptov a dobu výpočtov. Posledná overovaná kombinácia Grass/bash (s publikáciou opäť cez Mapserver) predstavuje síce ľahký, rýchly a vždy prístupný postup výpočtov, nevýhodou je však plná funkčnosť v operačnom systéme Linux a ťažšie publikovanie dát na internete, pre ktoré by bolo nutné využiť Mapserver s pomerne zložitou konfiguráciou.

Softvérové prostredie	Operačný systém	Programovací jazyk	Komplexnosť riešenia	Výhody	Nevýhody
ArcGis / Python	Windows	Python	úplná	Komplexnosť, nenáročnosť publikácie výsledných máp	Náročnosť na licencie
GDAL / Python	Windows, Linux	Python	slabá	Nenáročnosť na softvérové vybavenie	Zložitosť skriptov, pomalosť výpočtov len pomocou jazyka Python
GRASS / bash	Linux, Windows	bash	Stredná (s väzbou na Mapserver)	Cenová nenáročnosť, komplexnosť	Zložitosť programovacieho jazyka, ťažšia publikácia máp na internete

Tab. 1 Výhody a nevýhody jednotlivých prístupov k spracovaniu dát

## **DISKUSIA**

Napriek tomu, že ako najkomplexnejšie softvérové prostredie sa osvedčil ArcGIS, nie je možné v ňom spracovať úplne kompletne riešenie RIS, a to najmä z hľadiska analýz vstupných údajov a tvorby napr. regionálneho fenologického modelu, pre ktoré je potrebné použiť špecifické, najmä štatistické a modelovacie programy ako sú napr. Earth Trend Modeler obsiahnutý v produkte Idrisi. Až po vytvorení fenologického modelu a modelu čistej a primárnej produkcie bude možné doplniť ďalšie komponenty do ArcGISu tak, aby bola dosiahnutá čo najucelenejšia podoba RIS. Veľkým kladom ArcGISu je úplná integrácia vyvinutých komponentov do prostredia aplikácie a ľahká publikácia dát cez internet pre široký okruh užívateľov.

Naopak nevýhodou ArcGISu je obmedzenie počtom licencií, čo pri zvyšujúcom sa počte riešiteľov projektu zvyšuje finančnú náročnosť riešenia, prípadne obmedzuje možnosť súbežnej práce viacerých riešiteľov.

Snaha eliminovať nevýhodu počtu licencií pomocou voľne šíriteľného softvéru nevedla k ideálnemu riešeniu. Tieto programy sú prevažne vyvíjané pod tzv. open source operačnými systémami unixového typu a len následne portované na systém Windows. Viazanosť ArcGISu na operačný systém Windows a často obmedzená funkčnosť voľne šíriteľných aplikácií v tomto operačnom systéme neposkytuje dostatočné možnosti ich vzájomnej kombinácie. Navyše s narastajúcim počtom rôznych aplikácií sa zvyšujú problémy s konverziou dát medzi rôznymi formátmi.

## **ZÁVER**

Navrhovaná štruktúra regionálneho informačného systému je výsledkom postupných krokov. Z praktických dôvodov je systém rozdelený na dva subsystémy, jednak kvôli využitiu odlišnými skupinami užívateľov, jednak z dôvodu rozdielnych vstupných dát. Obidva subsystémy sú riešené v rovnakom softvérovom prostredí, čo uľahčuje ich ďalší vývoj a správu. Ako najvhodnejšie softvérové riešenie sa ukázalo byť spojenie

produktov od firmy ESRI, pričom na špecifické úlohy v rámci subsystému pre vyhodnocovanie produkčného stavu lesa sa ukázalo ako nevyhnutné tiež využitie iných programových balíkov, ako napr. Idrisi. Pre niektoré čiastkové operácie je možné rovnocenne použiť aj voľne šíriteľné programy. Subsystém pre sledovanie stavu lesa a jeho zmien je riešený takmer výlučne v prostredí ArcGISu, s výnimkou spracovania snímok SPOT a Aster. Výpočtovo náročnejší subsystém pre sledovanie produkčného stavu lesa nateraz nie je možné kompletne spracovať v ArcGISe, výsledná štruktúra informačného systému je však založená na postupnej implementácii do tohto prostredia doprogramovaním chýbajúcich modulov pomocou jazyka Python.

### **Pod'akovanie**

*Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0670-07.*

### **LITERATÚRA**

- Arctur, D., Zeiler, M., 2004. *Designing geodatabases - Case studies in GIS Data Modeling*. Esri, Redlands : California, 2004, p. 393
- Burrough, P. A., McDonnell, R. A., 1998. *Principles of geographical information systems*. Oxford : Oxford University Press.
- Corey, T., 2004. *ArcGIS 9 - Writing Geoprocessing Scripts With ArcGis*. Esri, Redlands : California, 2004, p. 83
- Fotheringham, A. S., Wegener, M., 2000. *Spatial Models and GIS: New Potential and New Models*. London : Taylor and Francis.
- Longley P.A., Goodchild M. F., Maguire, D. J., Rhind, D. W., 2001. *Geographic Information Systems and Science*. New York : Willey & Sons.
- Minár, J., Mentlík, P., Jedlička, K., Barka, I., 2005. Geomorphological information system: idea and options for practical implementation. *Geografický časopis*, roč. 57, 2005, č. 3. s. 247-266. ISSN 0016-7193
-

- Mentlík, P., Jedlička, K., Minár, J., Barka, I., 2006. Geomorphological information system: physical model and options of geomorphological analysis. In *Geografie – Sborník České geografické společnosti*, 2006, 1, s. 15-32. ISSN1212-0014.
- Pavlendová, H., 2009: Odvodenie LAI z MODISu. In: Bucha, T., Pavlendová, H. (eds.): *Diaľkový prieskum Zeme – lesy v meniacich sa prírodných podmienkach*, zborník z vedeckého seminára. Zvolen : NLC LVÚ, Lesnícka fakulta TU. s. 65 – 81
- Pajtík, J., 2009. Odvodene PAR a primárnej produkcie lesných ekosystémov zo satelitných snímok. In: Bucha, T., Pavlendová, H. (eds.): *Diaľkový prieskum Zeme – lesy v meniacich sa prírodných podmienkach*, zborník z vedeckého seminára. Zvolen : NLC LVÚ, Lesnícka fakulta TU. s 83 – 98
- Tuček, J., 1998: *Geographic information systems, The principles and praxis*. Praha : Computer Press.







ISBN 978 - 80 - 8093 - 098 - 1



9 788080 930981

© NLC - LVÚ