

Vyhodnocení odumírání horského smrkového lesa na Trojmezné (NP Šumava) metodou automatizované klasifikace leteckých snímků

Assessment of bark beetle damage in the Trojmezná old-growth forest (Šumava NP) using automated classification of aerial photographs

Filip Hájek¹ & Miroslav Svoboda^{2,*}

¹Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, pobočka Olomouc, Holická 31c, CZ-77200 Olomouc, Česká republika

²Katedra pěstování lesa, Fakulta lesnická a environmentální, Česká zemědělská univerzita v Praze, Kamýčká 129, CZ-16521 Praha 6 – Suchbátka, Česká republika

*svobodam@fle.czu.cz

Abstract

The aims of this paper were: (1) to present preliminary results on bark beetle damage in Trojmezná old-growth forest (Šumava NP) and (2) to test possible application of automated classification of aerial photographs to survey this damage. The extent of undamaged forest area decreased about 16% during the analyzed period. Based on our results, we conclude that methods of automated classification of bark beetle damage from remote sensed data are useful and efficient. The problems of using aerial photos in terms of image quality (geometric properties, spectral and spatial resolution) and data accessibility are discussed. Moreover, the technological recommendations for practical processing of bark beetle damage surveys on large areas are presented.

Key words: aerial photos, *Ips typographus*, survey, Norway spruce forest, object-based analysis

Úvod

Monitorování změn stavu lesa pomocí interpretace obrazových dat dálkového průzkumu Země (DPZ) má u nás i ve světě poměrně dlouhou tradici. Jednou z nejvýznamnějších aplikací DPZ v lesnictví je analýza zdravotního stavu (ŽÍHLAVNÍK & SCHEER 2000). Pro tento účel jsou nejčastěji využívány zdroje údajů infračervené letecké snímky (MURTHA & MCLEAN 1981), případně multispektrální satelitní data (STOKLASA 1995, WOODCOCK et al. 2001). Zcela aktuální jsou pak snahy o využití družicových snímků s velmi vysokým prostorovým rozlišením (VHR) jako IKONOS a QuickBird. Vyhodnocení poškození lesa podkorním hmyzem ze snímků VHR bylo hojně testováno například v Kanadě. WHITE et al. (2005) úspěšně analyzoval data Ikonos metodou neřízené klasifikace ISODATA za účelem detekce stromů napadených druhem *Dendroctonus ponderosa*. Využití snímků z různých senzorů k mapování poškození lesa s ohledem na velikost sledovaného území dále rozebírá WULDER et al. (2006).

V České republice byly od konce 70. let minulého století testovány infračervené letecké snímky za účelem hodnocení poškození lesů v Krušných horách. Již HAUTKE (1978) studoval

možnosti využití různých materiálů leteckého snímkování. Snímky z družice Landsat byly použity pro vyhodnocení rozsahu odumírání lesa v důsledku žíru lýkožrouta smrkového v NP Šumava (ZEMEK et al. 2001, ZEMEK et al. 2003). Podle ZEMKA et al. 1999 je možno využít satelitní snímky tohoto typu k hodnocení rozsahu kalamity způsobené žírem lýkožrouta smrkového, ale uvedená metoda má některé nevýhody. Jde především o časovou dostupnost snímků a jejich prostorové rozlišení. Z tohoto důvodu byly pravděpodobně při analýze rozsahu lesa napadeného žírem lýkožrouta smrkového v sousedním NP Bavorský les využity snímky letecké (HEURICH 2001). V NP Bavorský les je v současnosti tato metoda využívána jako standardní nástroj pro vyhodnocení rozsahu a průběhu odumírání lesa.

S potřebou vyhodnocení dat v časových řadách ustupují techniky založené čistě na vizuální interpretaci stále častěji automatizovaným metodám. Bohužel automatizovaná klasifikace vysoce texturovaných dat, jakými jsou letecké a satelitní snímky VHR, zůstává stále poměrně problematická. Plochy představující jednu tématickou třídu (např. koruna stromu) jsou ve skutečnosti tvořeny skupinou většího počtu pixelů se značným rozsahem hodnot stupňů šedi. Tradiční techniky klasifikace obrazu pracují pouze s digitálními hodnotami těchto jednotlivých pixelů a ignorují jejich prostorové rozmístění neboli texturu snímku (HALOUNOVÁ 2003). Zmíněná úskalí lze do značné míry řešit klasifikací založenou na objektovém přístupu. Objektová klasifikace se během poslední doby stala předmětem celé řady studií a mnohé z nich potvrzují, že lze tímto způsobem dosáhnout značného zpřesnění klasifikace. BENZ et al. (2004) poukazuje, že správnost klasifikace je podmíněna porozuměním typickému kontextu a hierarchickým vztahů na různých úrovních měřítka. Využití těchto vztahů umožňuje analýzu a hlubší pochopení různých typů krajinných struktur (BURNETT & BLASCHKE 2003). Přínosy objektové klasifikace byly s úspěchem testovány v rozličných úlohách jako mapování porostních struktur a druhového zastoupení lesa (HALOUNOVÁ 2003, HÁJEK 2006), identifikace a vymezení korun jednotlivých stromů (BRANDTBERG 1999, HAY et al. 2005, TIEDE & HOFFMANN 2006). Díky definované prostorové návaznosti umožňuje objektová klasifikace také snadné napojení na geografické informační systémy (GIS), například využitím stávajících tématických vrstev pro klasifikaci lesních porostů (FÖRSTER & KLEINSCHMIT 2006), či aktualizací údajů o porostních skupinách v databázi LHP (HÁJEK 2007). TIEDE et al. (2006) uplatnili přístup sekvenční objektové analýzy leteckých snímků k identifikaci stromů napadených lýkožroutem smrkovým v NP Bavorský les.

Cílem tohoto příspěvku je vyhodnocení rozsahu odumírání lesa v důsledku žíru lýkožrouta smrkového pomocí metody automatizované klasifikace časové řady leteckých snímků. Časová řada leteckých snímků z oblasti I. zóny Trojmezna Národního parku Šumava (Trojmezna, NP Šumava) byla vybrána jako testovací území z několika důvodů. Přestože v dané oblasti dochází k odumírání lesa již od roku 1996, neexistuje do současnosti žádná objektivní studie řešící tuto problematiku. Existují pouze odhady rozsahu odumírání provedené v minulosti pracovníky parku, které ale byly pravděpodobně velmi nepřesné (SVOBODA 2005a). Tato studie si tedy klade za cíl otestovat současné moderní přístupy automatizované klasifikace obrazu k problému vyhodnocení odumírání lesa a zároveň prezentovat předběžné výsledky tohoto odumírání.

METODIKA

Popis lokality

Historické poměry a současná situace

Do současné I. zóny Trojmezna (Trojmezenský prales) patří cca 600 ha lesa v rozdílných přírodních podmínkách a s různou minulostí využívání člověkem. Zatímco některé části

pralesa nebyly v minulosti nikdy intenzivně využívány, zbytek území byl v 19. století ovlivněn těžbou dřeva. Historické prameny z roku 1720 uvádějí lesy této oblasti jako jedny z nejzachovalejších z celé Šumavy (PRŮŠA 1990). V druhé polovině minulého století došlo k uzavření hranice a následujících čtyřicet let se vyvíjelo prakticky bez vlivu lidské činnosti (MAŠKOVÁ et al. 2003).

Po propuknutí kalamity způsobené lýkožroutem smrkovým v NP Šumava se odumírání a rozpad lesa nevyhnuly ani oblasti Trojmezí. Vizuální hodnocení leteckých snímků z roku 2005 z dané oblasti ukazuje Trojmezí jako mozaiku odumřelých a přežívajících skupin stromů. V současné době se aktivně zasahuje proti lýkožroutu smrkovému v cca 200 m širokém pásu lesa podél státní hranice s Rakouskem a Německem, které má ochránit tamní lesy před šířícím se lýkožroutem smrkovým z NP Šumava (SVOBODA 2005b, SVOBODA & KŘENOVÁ 2006). Terénní monitoring rozsahu odumírání lesa byl zastaven a v současnosti neexistují objektivní data o rozsahu odumírání lesa v této první zóně.

Přírodní podmínky

Trojmezí se rozkládá v hlavním šumavském hřebenu ve skupině Třístoličnicku. Zahrnuje původní pralesovité zbytky porostů v pásu od Třístoličnicku po Trojmezí, dále oblast od Trojmezí po Plechý podél hranice s Rakouskem. Území leží v nadmořské výšce 970–1380 m n.m. Roční úhrn srážek se pohybuje mezi 1200–1500 mm, roční průměrná teplota se pohybuje od 3,5 do 4 °C (KOPÁČEK et al. 2002). Půdy jsou hlinitopísčité, písčitohlinité, skeletovité, typu rankru, podzolu a kryptopodzolu (KOPÁČEK et al. 2002, SVOBODA 2003).

Z lesních společenstev převládá přirozená kyselá smrčina středního vzrůstu s přechodem k jeřábové smrčině v hřebenových polohách. V nižších polohách se nacházejí bukové smrčiny, případně smrkové bučiny (PRŮŠA 1990). Vzhledem k heterogenním přírodním podmínkám a rozdílné historii využívání se charakter lesa v rámci celého území Trojmezí výrazně liší. Struktura lesa byla popsána v práci SVOBODA (2005c) a SVOBODA (2005d).

Obrazová data a jejich předzpracování

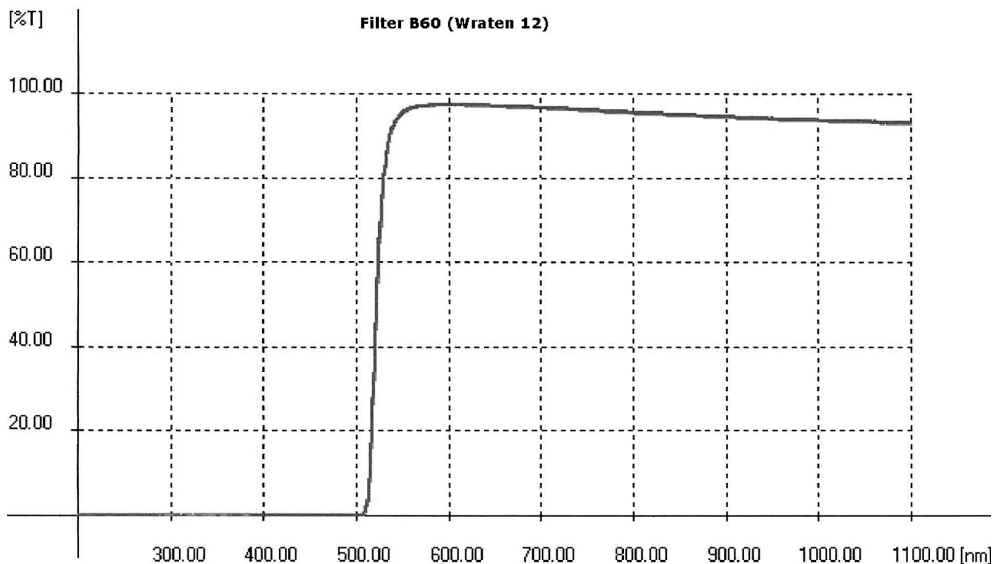
Barevné a barevné infračervené (IČ) letecké snímky

Letecké snímky byly v rámci případové studie analyzovány jako archivní data. Vzájemně se lišily obdobím pořízení, použitým materiálem, v případě předzpracovaných dat navíc nebyly k dispozici žádné informace o způsobu vyhotovení ortofotosnímků. Proto je třeba zdůraznit, že kvalita snímků nebyla pro daný úkol optimální.

Pro klasifikaci byly použity snímky ze čtyř období – barevné infračervené letecké snímky z let 1995 a 2006, a barevné letecké snímky z let 2001 a 2004 (Tab. 1). Ke snímkování bylo použito analogových kamer ZEISS LMK 15 a 2015. Barevné letecké snímky byly pořízeny ve třech spektrálních pásmech viditelné části spektra elektromagnetického záření s radiometrickým rozsahem 8 bitů (256 úrovní jasu). Barevné infračervené (color infrared – CIR) byly pořízeny na film Kodak AEROCROME 2443, který má zvýšenou citlivost v IČ pásmu. K eliminaci záření v modré části viditelného spektra byl použit filtr Kodak WRATTEN č.

Tabulka 1. Přehled použitých snímků a jejich základní charakteristiky.
Table 1. List of analyzed aerial photographs and their basic characteristics.

Zdroj	Rok	Datum snímkování	Typ snímku	Kamera	Měřítko
AOPK	1995	25. 10. 1995	infračervený (IR)	LMK 15	1 : 10000
NP Šumava	2001	04. 11. 2001	barevný (RGB)	LMK 2015	1 : 14000
Gefos a.s.	2004	18. 6. 2004	barevný (RGB)	LMK 2015	1 : 15000
NP Šumava	2006	17. 7. 2006	infračervený (IR)	LMK 2015	1 : 15000



Obr. 1. Transmittance optického filtru Wratten 12.
Fig. 1. Transmittance of the optical filter Wratten 12.

12 (Obr. 1). Aplikací tohoto filtru se jednotlivé vrstvy IČ filmu stanou citlivé pouze k zelené, červené a infračervené části spektra a snímky se pak zobrazují v nepravých barvách (www.kodak.com).

Letecké snímky z let 2001 a 2004 byly získány již jako připojené do souřadnicového systému (WGS 84 zóna 33N) a ortorektifikované; snímky z roku 1995 a 2006 pak pouze jako skenované a dále nezpracované obrazové soubory. Při skenování pozitivu infračervených snímků se jednotlivé složky spektra – zelená, červená a infračervená – zobrazily do kanálů RGB v nepravém barevném podání. Tyto snímky byly koregistrovány pomocí afinní transformace a společně s ostatními snímky resamplovány na prostorové rozlišení 0,42 m na 1 pixel pomocí interpolační metody nejbližšího souseda (LILLESAND et al. 2004).

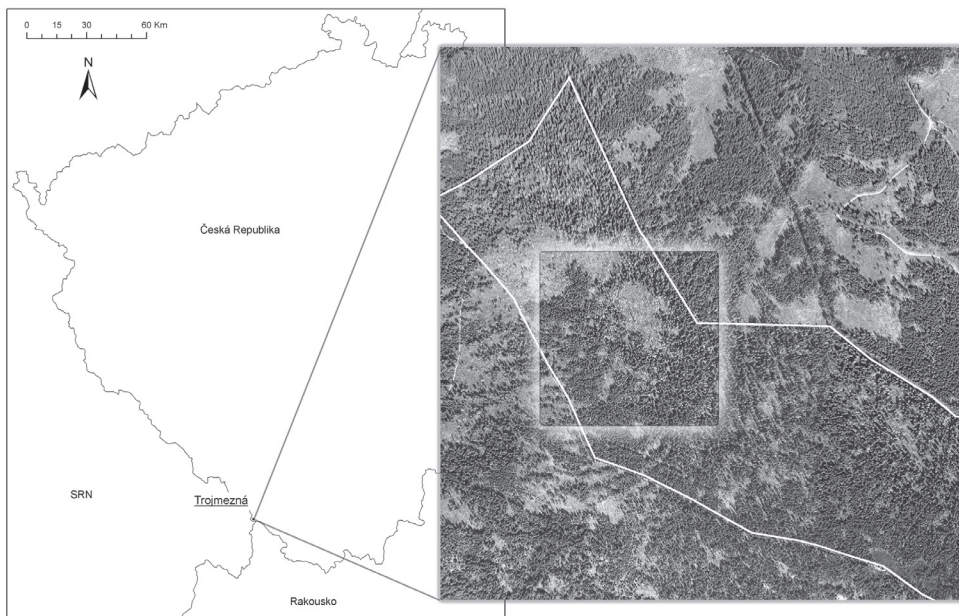
Volba zájmového území

Za účelem klasifikace lesa postiženého odumíráním hlavního stromového patra byla ze snímků vybrána čtvercová oblast cca 600×600 metrů. Tato plocha splnila požadavky definované pro následné vyhodnocení, a to na všech čtyřech snímcích: (1) podstatná část záběru uvnitř hranic první zóny NP, (2) území s evidentním vlivem lýkožrouta smrkového, (3) území v blízkosti středu snímku, (4) území, které je z hlediska stavu porostu charakteristické pro celou oblast, (5) minimální podíl území, kde byla prováděná úmyslná asanace lýkožrouta smrkového.

Poslední zmíněné kritérium bylo dodrženo jen částečně, protože v části analyzovaného území byly některé stromy napadené lýkožroutem smrkovým asanovány. Platí to především pro levý dolní roh analyzované oblasti (Obr. 2), která leží na území Německa a částečně také v pásmu kolem hranice, kde dochází k asanaci i na českém území uvnitř první zóny.

Objektově-orientovaná klasifikace leteckých snímků

Multitemporální analýza leteckých snímků byla založena na objektovém klasifikačním při-



Obr. 2. Lokalizace studované oblasti. Bílá čára značí hranici první zóny NP Šumava. Čtvercový polygon označuje testovanou oblast.

Fig. 2. Localization of the study area. The white line indicates the border of the first zone Trojmezná (Šumava National Park). The shaded polygon indicates the border of the analyzed area.

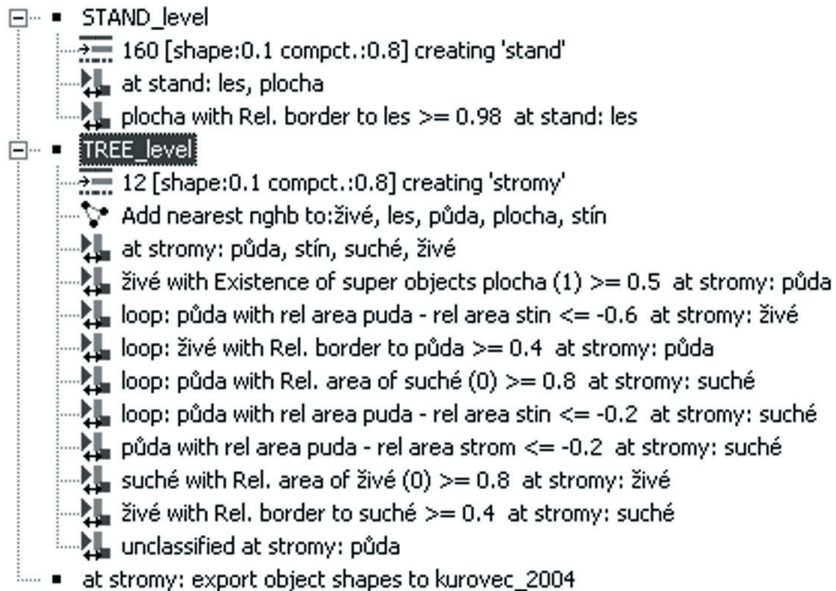
stupu. Při objektově orientované analýze je obraz nejprve rozdělen do tzv. primitiv-souborů více pixelů, které se co možná nejvíce podobají smysluplným objektům. Klasifikace pak probíhá nad těmito objekty, a nikoliv nad samotnými pixely, jako je tomu u běžných metod automatizované klasifikace. Segmentace originálních dat může být provedena do několika úrovní podle požadované velikosti cílových tříd (koruny stromů, porostní skupiny), čímž umožníme využití vzájemných vazeb mezi objekty na jedné nebo více úrovních. Vhodně nastavená segmentace navíc do jisté míry řeší vysokou heterogenitu některých tříd ve snímcích s velmi vysokým prostorovým rozlišením. V rámci následné klasifikace lze pro jednotlivé třídy definovat nejrůznější klasifikační pravidla, založená na spektrální a texturální charakteristice objektů, jejich geometrickém tvaru a kontextu v rámci jedné úrovně (sousedství), či hierarchickém vztahu mezi úrovněmi.

Zapojení multi-úrovňových vztahů mezi objekty (Obr. 3) představuje zásadní posun oproti pixelovým automatizovaným metodám. Analýza tedy zahrnuje dva základní kroky: (1) Obrazová segmentace do několika hierarchických úrovní objektů založená na spektrálních a texturálních znacích. Velikost a tvar segmentů vychází z výpočtu maximální povolené heterogenity (uživatel definuje velikost měřítka cílových segmentů tzv. Scale parameter) (BAATZ & SCHÄPE 1999). (2) Klasifikace objektů podle jejich charakteristických vlastností. Příznaky tříd jsou definovány buď funkcemi členství a na základě číselně vymezených hodnot příznaků se provádí klasifikace, nebo se klasifikuje pomocí klasifikátoru nejbližšího souseda, který porovnává příznaky vybraných vzorků (segmentů vybraných zpracovatelem) a příznaky všech segmentů obrazu a provádí vlastní zařazení segmentu do jedné nebo většinou více tříd.



Obr. 3. Multi-úrovňové vztahy objektové hierarchie. Struktury (objekty) různých měřítek mohou být reprezentovány simultánně a tudíž klasifikovány pomocí vzájemných vztahů (DEFINIENS IMAGING 2006).

Fig. 3. Multi-scale relations within the image object hierarchy. Structures of different scales can be represented simultaneously and thus classified based on relations within each other (DEFINIENS IMAGING 2006).



Obr. 4. Znalostní báze jako zákonitá sekvence procesů obrazové analýzy v Definiens Professional 5.0.10.

Fig. 4. Classification rule-base as the logical sequence of individual processes in Definiens Professional 5.0.10. image analysis environment.

V této studii bylo vyhodnocení leteckých snímků bylo provedeno aplikací sekvence procesů v prostředí Definiens Professional 5.0.10. (DEFINIENS IMAGING 2006). Byla vytvořena základní zákonitá posloupnost procesů, která zahrnovala segmentaci snímků do dvou hierarchických úrovní objektů, klasifikaci podle definovaného souboru příznaků, opravy hranic jednotlivých tříd pomocí kontextuální klasifikace a nakonec export tématické vrstvy do GIS (Obr. 4). Sekvence procesů byla formou znalostní báze (rule-base) přenesena a postupně aplikována na snímky ze všech čtyřech časových období.

Základní segmentace na vyšší úrovni rozdělila obraz na velké polygony zapojeného lesa a polygony bezlesí (s ležícími suchými kmeny), případně polygony se stojícími suchými stromy. Na nižší úrovni byla provedena detailnější segmentace veškerého území mimo plochy bezlesí, kde byly klasifikovány jednotlivé koruny a skupiny stromů, a to na stromy živé a stromy suché. Dále byly vylišeny kategorie volná plocha a stín. Pro potřeby studie byly tedy na vybrané lokalitě vymezeny čtyři základní kategorie klasifikace: (1) živý les, (2) suchý les, (3), volná plocha, (4) stín. Do kategorie živý les byly zařazeny stromy, které v době pořízení leteckého snímku měly převážnou část asimilačních orgánů v zelené barvě. Do

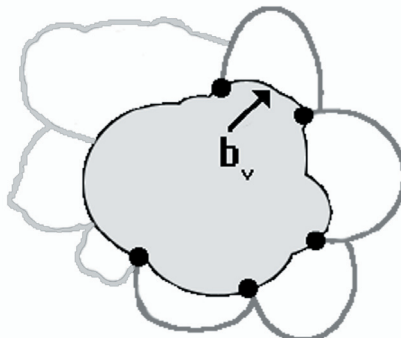
kategorie suchý les byly zařazeny: a) stromy u kterých v době pořízení leteckého snímku asimilační orgány ztratily zelenou barvu, b) stromy bez asimilačních orgánů s korunou tvořenou suchými větvemi v různém stádiu rozpadu koruny. V případě, že došlo ke zlomení stromu a převážná část suché koruny na stojícím pahýlu chyběla, byly tyto stromy klasifikovány jako volná plocha. Do kategorie volná plocha byly zařazeny plochy bez zjevných stojících živých nebo suchých stromů na kterých nově odrůstající stromové patro nebylo identifikovatelné.

Klasifikace byla primárně řízena výběrem vzorků (segmentů), jejichž příznaky byly porovnávány klasifikátorem nejbližšího souseda a představovaly vzorové plochy pro zatřídění segmentů do tříd. Kategorie objektů byla definovány pomocí průměrných hodnot příznaků (typického projevu) v jednotlivých spektrálních pásmech a jejich odvozeninách. Tyto zahrnovaly především rozdíly a podíly spektrálních pásem u barevných a infračervených snímků. Výsledky spektrální analýzy byly následně přehodnoceny a zpřesněny zapojením (definicí) vztahů kategorií na dvou úrovních objektové hierarchie, jakožto i v rámci sousedství (Obr. 5). Tímto způsobem bylo možné odlišení spektrálně identických tříd (vzrostlé stromy a nárost v barevných snímcích), úpravy plochy korun v zástínu, případně klasifikaci ležících a stojících suchých kmenů.

Správnost klasifikací v jednotlivých letech byla posouzena především na základě vizuální interpretace. Pro roky 2004 a 2006 byly výsledky posouzeny také na základě terénních šetření. Pro každou kategorii bylo manuálně klasifikováno 45 rovnoměrně rozmístěných referenčních objektů, byla sestavena chybová matice (CONGALTON & GREEN 1999) a vypočten standardní statistický ukazatel správnosti klasifikace Index shody Kappa (KIA) (SMITS et al. 1999) (Tab. 2). Na základě automatické klasifikace byla vytvořena vrstva tématických GIS výstupů (Obr. 6) a plochová tabulka zastoupení tříd v čase (Tab. 3).

VÝSLEDKY A DISKUZE

Správnost klasifikace v jednotlivých letech byla posuzována především na základě indexu KIA. V tomto ukazateli bylo dosaženo hodnot 0,94 (1995), 0,85 (2001), 0,90 (2004), 0,93 (2006) KIA. Výsledky lze považovat za velmi dobré, míra shody v rozmezí 85–94 % odpovídá výsledkům analýz leteckých snímků řešených objektovým přístupem v dalších pracích (HALOUNOVÁ 2003, TIEDE et al. 2006).



Obr. 5. Příznak „relativní hranice k“ určuje poměr délky hranice objektu sdílené se sousedním objektem konkrétní třídy b_v k celkové délce hranice objektu (DEFINIENS IMAGING 2006).

Fig. 5. Feature “Relative border to” describes the ratio of the shared border length of an image object with a neighbouring image object assigned to a defined class b_v to the total border length (DEFINIENS IMAGING 2006).

Tabulka 2. Chybové matice odvozené na úrovni obrazových objektů pro klasifikace v jednotlivých letech. KIA (Index shody Kappa).

Table 2. Error matrices based on the object analysis of individual aerial photographs. KIA (Kappa Index of Agreement).

Rok 1996					
Kategorie \ Vzorek	Suchý les	Živý les	Stín	Volná plocha	Suma
Suchý les	45	4	0	7	56
Živý les	0	41	0	4	45
Stín	0	0	45	5	50
Volná plocha	0	0	0	29	29
Suma	45	45	45	45	
KIA pro kategorii	1	0,88	1	0,58	
Celková přesnost	0,89				
KIA	0,85				
Rok 2001					
Kategorie \ Vzorek	Suchý les	Živý les	Stín	Volná plocha	Suma
Suchý les	45	4	0	7	56
Živý les	0	41	0	4	45
Stín	0	0	45	5	50
Volná plocha	0	0	0	29	29
Suma	45	45	45	45	
KIA pro kategorii	1	0,88	1	0,58	
Celková přesnost	0,89				
KIA	0,85				
Rok 2004					
Kategorie \ Vzorek	Suchý les	Živý les	Stín	Volná plocha	Suma
Suchý les	42	3	0	3	48
Živý les	0	42	0	3	45
Stín	0	0	44	0	44
Volná plocha	3	0	1	39	43
Suma	45	45	45	45	
KIA pro kategorii	0,91	0,91	0,97	0,82	
Celková přesnost	0,93				
KIA	0,90				
Rok 2006					
Kategorie \ Vzorek	Suchý les	Živý les	Stín	Volná plocha	Suma
Suchý les	42	0	0	0	42
Živý les	0	43	0	4	47
Stín	0	0	45	0	45
Volná plocha	3	2	0	41	46
Suma	45	45	45	45	
KIA pro kategorii	0,91	0,94	1	0,88	
Celková přesnost	0,95				
KIA	0,93				

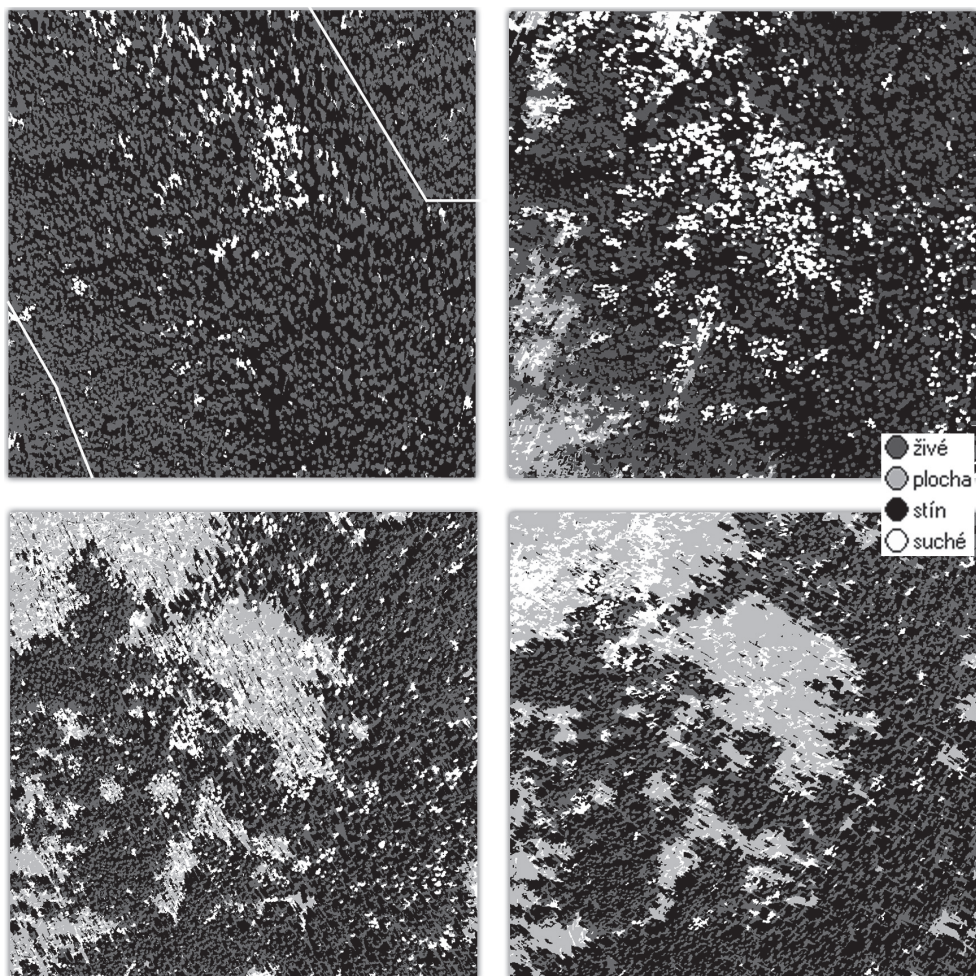
Tabulka 3. Zastoupení jednotlivých tříd klasifikace (v ha a %) z celkové rozlohy analyzované oblasti v jednotlivých letech časové řady.

Table 3. Distribution of classification classes in each year of the analyzed time period. The values are expressed in ha and %.

Rozloha v jednotlivých letech / Typ třídy	1995		2001		2004		2006	
	Rozloha		Rozloha		Rozloha		Rozloha	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Živý les	14,80	41,00	11,76	32,48	9,83	27,15	9,26	25,41
Suchý les	1,33	3,67	4,13	11,40	4,74	13,09	2,88	7,91
Volná plocha	0,00	0,00	1,89	5,21	4,99	13,78	7,99	21,94
Stín	19,77	54,77	18,23	50,36	16,45	45,42	16,09	44,19
Suma	36,10	100,00	36,20	100,00	36,21	100,00	36,42	100,00

Změna v zastoupení a rozsahu jednotlivých analyzovaných kategorií během let 1995 až 2004 je znázorněna na Obr. 6. V roce 1995 byl podíl jednotlivých kategorií v analyzované oblasti následující: živý les 41,0 %, suchý les 3,7 % a stín 54,8 % (Tab. 3). Zjistit, kdy došlo k odumření stromů interpretovaných jako kategorie suchý les na leteckém snímku z roku 1995 není zatím s použitím analyzovaných dat možné. V časové řadě, která byla vyhodnocena zatím chybí kvalitní barevný snímek pořízený před rokem 1995. Podle jedné z mála studií, která se zabývala rozpadem smrkového lesa po odumření v důsledku žíru lýkožrouta smrkového se do deseti let od odumření porostu 75 % stromů zlomí, z toho 50 % stromů se zlomí ve výšce 0–10 m (KUPFERSCHMID et al. 2003). S využitím výsledků této studie je pravděpodobné, že většina stromů klasifikovaných v roce 1995 jako suché odumřela v rozmezí let 1985–1995. Jaká byla prvotní příčina odumření těchto stromů, zda to bylo pouze v důsledku žíru lýkožrouta smrkového, nebo kombinací více faktorů, a co bylo případně zdrojem lýkožrouta smrkového není možné na základě současných dat zjistit.

Mezi roky 1995 a 2001 došlo k výraznému nárůstu plochy kategorie suchý les a ke snížení rozlohy kategorie živý les. Podíl kategorie suchý a živý les v roce 2001 byl 11,4 a 32,5 %, tj. nárůst v případě suchého lesa o 7,7 % a pokles v případě živého lesa o 8,3 %. Pravděpodobnou příčinou odumření stromů byl žír lýkožrouta smrkového. Zdrojem lýkožrouta smrkového byly pravděpodobně lokality suchého lesa identifikované v roce 1995. Z Obr. 6 je zřejmé, že suché stromy v roce 2001 jsou koncentrovány v okolí suchých stromů z roku 1995. V roce 2001 bylo 5,3 % rozlohy analyzované oblasti zařazeno do kategorie volná plocha. Největší podíl této kategorie byl zjištěn v levém dolním rohu analyzované oblasti (Obr. 6). Tato část analyzovaného území již není součástí Trojmezí (NP Šumava), ale jedná se o německý lesní majetek. V těchto porostech dochází k asanaci lýkožrouta smrkového. Proto v této oblasti nedošlo k nárůstu rozlohy suchého lesa, ale k zvýšení rozlohy kategorie volná plocha, která vznikla jako důsledek asanační těžby. Mezi roky 2001 a 2004 došlo k dalšímu poklesu rozlohy kategorie živý les na 27,2 %. Rozloha kategorie suchý les se v tomto období zvýšila na 13,1 %. Rozloha kategorie volná plocha mezi roky 2001 a 2004 také zvýšila na 5,2 %. Rozloha kategorie suchý les a volná plocha spolu navzájem souvisí. Jak dochází postupně k rozpadu stojících suchých stromů, dochází i k nárůstu plochy, která je klasifikována jako kategorie volná plocha. Z Obr. 6 je opět zřejmá koncentrace suchých stromů na snímku z roku 2004 v okolí suchých stromů klasifikovaných v roce 2001. Na první pohled je patrný nárůst kategorie volná plocha ve střední a levé horní části snímku, kde došlo ke kompletnímu odumření horního stromového patra. Při interpretaci výsledku je nutno vzít v úvahu jeden důležitý fakt. Levá část snímku spadá do cca 200 m širokého pásu lesa podél státní hranice s Rakouskem a Německem, kde se i přestože se jedná o první zónu národního parku



Obr. 6. Změna v rozloze jednotlivých klasifikačních tříd na leteckých snímcích v letech 1995 (nahore vlevo), 2001 (nahore vpravo), 2004 (dole vlevo) a 2006 (dole vpravo).

Fig. 6. Changes in the distribution of individual classification classes on the aerial photographs from year 1995 (top left), 2001 (top right), 2004 (bottom left), and 2006 (bottom right).

provádí asanace lýkožrouta smrkového pokácením a odkorněním napadených stromů. Z tohoto důvodu může být nárůst kategorie volná plocha způsoben nejen rozpadem stojících suchých stromů, ale i asanační těžbou. S použitím dostupných dat není možné tyto dva procesy od sebe zatím přesně odlišit. Mezi roky 2004 a 2006 se rozloha kategorie živý les snížila na 25,4 %. Nárůst byl menší než v předchozích obdobích. Rozloha kategorie suchý les se mezi roky 2004 a 2006 snížila na 8,0 % a rozloha kategorie volná plocha v tomto období vzrostla na 22,0 %. V období 2004 až 2006 tedy došlo k mírnému zpomalení odumírání horního stromového patra, naopak pokračoval výrazný rozpad odumřelých suchých stromů.

Celkově se tedy v období mezi roky 1995 a 2004 snížila rozloha kategorie živý les z 14,8

ha na 9,26 ha. Rozloha kategorie suchý les kolísala mezi jednotlivými analyzovanými roky a rozloha kategorie volná plocha se zvýšila z 0 ha v roce 1995 na 21,94 ha v roce 2006. Samostatnou analyzovanou kategorií při klasifikaci tvořila třída stín. Rozloha této kategorie postupně klesala v jednotlivých letech z 19,77 ha na 16,09 ha. Stíny na obrazových datech obecně představují jeden z problémů automatizované klasifikace leteckých snímků. ASNER & WARNER (2003) poukazují, že podíl stínů ve snímcích vzrostlé vegetace je vždy podstatný a zvyšuje se s hustotou porostu. V případě souvislých lesních oblastí je množství stínu dále ovlivněno velikostí a tvarem korun, hustotou porostu, indexem listové plochy, optickými vlastnostmi asimilačních orgánů, a v neposlední řadě také geometrií slunečního záření a samotného snímkování (GERARD & NORTH 1997, GILABERT et al. 2000). Při vyhodnocení snímků z různých období se proto na množství stínů zásadně projeví různorodost vegetace, ale také odlišnosti v technologii leteckého snímkování. V případě této studie lze množství stínů v jednotlivých letech interpretovat ze dvou hledisek: (1) Datum snímkování. Snímky z let 1995 a 2001 byly pořízeny na konci října (respektive začátkem listopadu), podíl stínů k celkové ploše je tedy ve srovnání s daty z letního snímkování (roku 2004 a 2006) vyšší. (2) Hustota porostu a množství asimilačních orgánů. Podíl stínů k celkové ploše se dále snižuje v důsledku postupného prořezávání lesa žírem lýkožrouta smrkového a chřadnutí napadených stromů.

ZÁVĚR

V průběhu studie byla testována možnost využití automatizované klasifikace obrazu leteckých snímků při vyhodnocení odumírání horního stromového patra smrkového lesa v důsledku žíru lýkožrouta smrkového. Zároveň byly prezentovány předběžné výsledky tohoto odumírání ve vybrané části území. Pomocí automatizované klasifikace byla zjištěna změna v rozloze živého lesa v analyzované oblasti, která se snížila z 41 % na 25 %. Na základě získaných zkušeností je možné konstatovat, že přístupem tvorby zákonité sekvence procesů lze klasifikovat obrazová data s poměrně vysokou mírou automatizace. Nejedná se totiž o jeden konkrétní algoritmus či příznak kategorie, nýbrž o posloupnost typizovaných algoritmů přenositelnou ve formě znalostní báze. Prahové hodnoty jednotlivých procesů (příznaků) lze upravit pro další snímky v bloku, příp. pro odlišné podmínky snímkování. Metoda tudíž představuje jeden z potenciálně efektivních nástrojů, který bude pravděpodobně možné po dalším testování prakticky využít při opakovaném vyhodnocování rozsahu odumírání lesa. Posouzení možnosti aplikace získaným poznatků na celé území Trojmezenského pralesa bude předmětem dalšího výzkumu.

Poděkování. Tento příspěvek vznikl za podpory projektů GAAV KJB601300602, NAZV QG50097/2004 a CIGA ČZU 20074003. Autoři děkují Správě CHKO a NP Šumava a AOPK za poskytnutí obrazových dat a technické podpory. Autoři dále děkují firmám Georeal a.s. a Gefos a.s. za poskytnutí vybraných obrazových dat.

LITERATURA

- ASNER G.P. & WARNER A.S., 2003: Canopy shadow in IKONOS satellite observations of tropical forests and savannas. *Remote Sensing of Environment*, 87: 521–533.
- BENZ U.C., HOFFMANN P., WILLHAUCK G., LINGENFELDER I. & HEYEN M., 2004: Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS – ready information. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58: 239–258.
- BAATZ M. & SCHÄPE A., 1999: Object – oriented and multi-scale image analysis in semantic network. *Proceedings of the 2nd International symposium on operationalization of remote sensing*, August 16–20, Enschede ITC (<http://www.definiens.com/pdf/publications/itc1999.pdf>).
- BRANDTBERG T., 1999: Automatic individual tree-based analysis of high spatial resolution aerial images on natu-

- rally regenerated boreal forests. *Canadian Journal of Forestry*, 29: 1464–1478.
- BURNETT C. & BLASCHKE T., 2003: A multi-scale segmentation / object relationship modelling methodology for landscape analysis. *Ecological Modelling*, 168: 233–249.
- CONGALTON R.G. & GREEN K., 1999: *Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices*. Lewis Publications, Boca Raton, Florida, 137 pp.
- DEFINIENS IMAGING, 2006: *Definiens Professional 5 User Guide*. Definiens Imaging, Munchen Germany.
- DEFINIENS IMAGING, 2006: *Definiens Professional 5 Reference Book*. Definiens Imaging, Munchen Germany.
- FÖRSTER M. & KLEINSCHMIT B., 2006: Integration of Ancillary Information into Object-based Classification for Detection of Forest Structures and Habitats. In: *1st International Conference on Object-based Image Analysis*, LANG S., BLASCHKE T. & SCHÖPFER E. (eds) July 4-5, 2006, Salzburg, Austria: 1–6.
- GERARD F.F. & NORTH P.R.J., 1997: Analyzing the effect of structural variability and canopy gaps on forest BRDF using a geometric–optical model. *Remote Sensing of Environment*, 62: 46–62.
- GILABERT M.A., GARCIA-HARO F.J. & MELIA L., 2000: A mixture modelling approach to estimate vegetation parameters for heterogeneous canopies in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 72: 328–345.
- HÁJEK F., 2006: Comparison of 4-m and pan-sharpened Ikonos satellite imagery for purpose of automated tree species composition. *Scientia Agriturlturae Bohemica*, 37: 122–127
- HÁJEK F., 2007: Process-based approach to automated classification of forest structures using medium-format digital aerial photos and ancillary GIS information. *European Journal of Forest Research*, in press.
- HALOUNOVÁ L., 2003: Textural classification of B&W serial photos for the forest classification. *Proceedings of 23rd symposium of European Association of Remote Sensing Laboratories*, Gent, June 2–5, 2003: 173–179.
- HAUTKE Č., 1978: Výsledky hodnocení leteckých snímků na specifických fotografických materiálech z imisní oblasti Krušných hor [Assessment of a specific aerial materials from the Krušné hory Mts.]. Ms., report, Lesprojekt Brandýs nad Labem, 52 pp. (in Czech).
- HAY G.J., CASTILLA G., WULDER M.A. & RUIZ J.R., 2005: An automated object-based approach for the multiscale image segmentation of forest scenes. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7: 339–359.
- HEURICH M., 2001: Waldentwicklung im montanen Fichtenwald nach großflächigem Buchdruckerbefall im Nationalpark Bayerischer Wald. In: Waldentwicklung im Bergwald nach Windwurf und Borkenkäferbefall. *Nationalpark Bayerischer Wald, Wissenschaftliche Reihe*, 14: 99–177.
- KOPÁČEK J., KAŇA J., ŠANTRŮČKOVÁ H., PORCAL P., HEJZLAR J., PÍCEK T. & VESELÝ, J., 2002: Physical, chemical, and biochemical properties of soils in watersheds of the Bohemian Forest lakes: I. Plešné Lake. *Silva Gabreta*, 8: 43–66.
- KUPFFERSCHMID ALBISETTI A.D., BRANG P., SCHÖNENBERGER W. & BUGMANN H., 2003: Decay of *Picea abies* snag stands on steep mountain slopes. *Forestry Chronicle*, 79: 247–252.
- LILLESAND M.T., KIEFER W.R. & CHIPMAN J.W., 2003: *Remote Sensing and Image Interpretation – fifth edition*. John Wiley and Sons, New York, 784 pp.
- MAŠKOVÁ Z., BUFGA L. & SMEJKAL Z., 2003: Národní park a chráněná krajinná oblast Šumava. [Šumava National Park and Landscape Protected Area]. In: *Chráněná území ČR – Českobudějovicko, svazek VIII.*, ALBRECHT J. (ed.) Agentura ochrany přírody a krajiny ČR a EkoCentrum Brno, Praha, 160 pp. (in Czech).
- MURTHA P.A. & MCLEAN J.A., 1981: Extravisual Damage Detection? Defining the Standard Normal Tree. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 4: 515–522.
- PRŮŠA E., 1990: *Přirozené lesy České republiky [Natural forest of the Czech republic]*. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 248 pp. (in Czech).
- SMITS P.C., DELLEPAINE S.G. & SCHOWENGERDT R.A., 1999: Duality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: A review and a proposal for a cost-based approach. *International Journal of Remote Sensing*, 20: 1461–1486.
- STOKLASA M., 1995: Informační systém zdravotního stavu lesa z kosmických snímků Landsat TM [Information system of forest health status based on classification of Landsat TM satellite images]. *GIS ve státní správě 6*, Sborník z konference, Chrudim (in Czech).
- SVOBODA M., 2003: Biological activity, nitrogen dynamics, and chemical characteristics of the Norway spruce forest soils in the National Park Šumava (Bohemian Forest). *Journal of Forest Science*, 49: 302–312.
- SVOBODA M., 2005a: Dynamika lesních ekosystémů v prvních zónách Národního parku Šumava [Dynamics of the forest ecosystems in the core zone on the Šumava National Park]. Ms., Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha, 200 pp. (Knihovna Katedry pěstování lesa, Fakulty lesnické a environmentální, České zemědělské univerzity v Praze). (in Czech with English summary).
- SVOBODA M., 2005b: Trojmezenský prales: realita nebo mýtus? [Trojmezna old-growth forest: reality or myth?]. *Živa*, 4: 190–192 (in Czech).
- SVOBODA M., 2005c: Množství a struktura mrtvého dřeva a jeho význam pro obnovu lesa ve smrkovém horském lese v oblasti rezervace Trojmezna [Amount and structure of the dead wood and its importance for the regeneration in Trojmezna spruce mountain old-growth forest]. *Zprávy lesnického výzkumu*, 50: 33–45 (in

- Czech).
- SVOBODA M., 2005d: Struktura horského smrkového lesa v oblasti Trojmezí ve vztahu k historickému vývoji a stanovištním podmínkám [Structure of the Trojmezí spruce old-growth mountain forest with respect to historical development]. *Silva Gabreta*, 11: 42–63 (in Czech).
- SVOBODA M. & KŘENOVÁ Z., 2006: Trojmezský prales – minulost, současnost a budoucnost? [Trojmezí old-growth forest – past, present and future?]. *Šumava*, 11: 9–11 (in Czech).
- TIEDE D. & HOFFMANN CH., 2006: Process oriented object-based algorithms for single tree detection using laser scanning data. *Proceedings of Conference 3D Remote sensing in Forestry*, Feb 14–15 2006, Vienna: 151–156.
- TIEDE D., LANG S. & HOFFMANN CH., 2006: Supervised and Forest Type-specific Multi-scale Segmentation for a One-level-representation of Single Trees. *Proceedings of the 1st International Conference on Object-based Image Analysis*, LANG S., BLASCHKE T. & SCHÖPFER E. (eds.) July 4–5, 2006 Salzburg, Austria (pages pending).
- WOODCOCK C.E., MACOMBER S.A., PAX-LENNEY M. & COHEN W.B., 2001: Monitoring large areas for forest change using Landsat: Generalization across space, time and Landsat sensors. *Remote Sensing of Environment*, 78: 194–203.
- WULDER M.A., DYMOND C.C., WHITE J.C., LECKIE D.G. & CARROLL A.L., 2006: Surveying mountain pine beetle damage of forests: A review of remote sensing opportunities. *Forest Ecology and Management*, 221: 27–41.
- ZEMEK F., HEŘMAN M. & KLOUDA Z., 1999: Bark beetle calamity assessment from remotely sensed data. *Silva Gabreta*, 3: 161–172.
- ZEMEK F. & HEŘMAN M., 2001: Bark beetle – a stress factor of spruce forests in the Bohemian Forest. *Ekológia*, 20: 95–107.
- ZEMEK F., ČUDLÍN P., BOHÁČ J., MORAVEC I. & HEŘMAN, M., 2003: Semi-natural forested landscape under a bark beetle outbreak: a case study of the Bohemian Forest (Czech Republic). *Landscape Research*, 28: 279–292.
- ŽIHĽAVNÍK Š. & SCHEER L., 2000: *Dial'kový prieskum Zeme v lesníctve* [Remote sensing in forestry]. Vysokoškolská učebnica TU vo Zvolene, 289 pp. (in Slovak).

Received: 1 December 2006

Accepted: 7 March 2007

