

IDENTIFIKÁCIA DYNAMIKY LESNEJ POKRÝVKY Z ČASOVÉHO RADU ORTOFOTOSNÍMOK NA ÚZEMÍ VYSOKOŠKOLSKÉHO LESNÍCKEHO PODNIKU

Martin ZÁPOTOCKÝ, Zuzana SLATKOVSKÁ, Milan KOREŇ

Identification of forest cover dynamics from time series of orthophotos on the territory of the University Forest Enterprise

Abstract: Information about historical forest dynamics are crucial to derive its potential characteristics in the future. Studies about changes in a forest landscape require relevant maps. In recent years, a forestry research uses access to archived cartographic works to analyze changes in a forest cover over a wider time period. The availability of orthophotos from previous decades is a suitable basis for deriving the dynamics of the forest cover from the second half of the 20th century to the present. The aim of the paper is to propose a methodical procedure based on the identification of the forest cover on the basis of black and white historical and color current orthophotos. The forest cover is classified on the basis of object-oriented analysis using Trimble's eCognition Developer software. Consequently, this paper deals with a multi-temporal analysis of forest dynamics over the period under review. The multi-temporal analysis is aimed at assessing the forest area in each considered time period in hectares and percentages from the whole area and the absolute change of the forest cover between the individual time horizons in hectares. The area of interest is the University Forest Enterprise of the Technical University in Zvolen – Forest District Budča. Changes in forest dynamics were assessed in three time periods (1949, 1978 and 2009). Assessing the dynamics of the forest cover in the short term by means of orthophotos brings a relatively precise temporal-spatial context to the presented issue which is not only applied in a forestry research and operation, but also for the needs of teaching and understanding the dynamics of the forest environment.

Keywords: automatic classification, forest dynamics, multi-temporal analysis, orthophotos, University Forest Enterprise

Úvod

Identifikácia zmien lesnej pokrývky je významnou súčasťou environmentálnych, sociologických a ekonomických analýz, ktorých výsledky môžu byť aplikované v lesnom hospodárstve, ochrane životného prostredia a plánovaní využitia krajiny. V ostatnom období bolo prezentovaných niekoľko prác zameraných na vývoj dynamiky lesného prostredia v rôznych častiach Európy prostredníctvom archivovaných kartografických diel, ktoré sa zameriavajú na vývoj lesa z dlhodobého hľadiska (De Keersmaeker et al., 2015; Fescenko et al., 2016; Skaloš et al., 2011). Výskum v oblasti dynamiky lesnej pokrývky z historických mapových podkladov bol vo veľkej miere uskutočnený na územiach v Poľskej republike (Ciupa et al., 2016; Kaim et al., 2016; Bednarczyk et al., 2017).

Napriek vysokej vedeckej hodnote je historická analýza mapových podkladov na veľkých územiach relatívne zriedkavá, nakoľko si vyžaduje rozsiahlu databázu mapových podkladov a je

Ing. Martin ZÁPOTOCKÝ, Ing. Zuzana SLATKOVSKÁ, doc. Mgr. Milan KOREŇ, PhD., Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, ul. T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen, e-mail: martin.zapotocky@tuzvo.sk, zuzana.slatkovska@gmail.com, milan.koren@tuzvo.sk

charakterizovaná časovou náročnosťou kvôli geometrickej rektifikácii, digitalizácii a manuálnemu priradovaniu hodnôt o využívaní krajiny (Kaim et al., 2014; Leyk et al., 2005). Z tohto dôvodu sú dlhodobé štúdie zmien využitia krajiny väčšinou obmedzené na relatívne malé oblasti (napr. Bürgi et al., 2015), pričom tieto štúdie môžu slúžiť ako podklad na komplexné odvedenie zmeny krajinej štruktúry na väčšom záujmovom území (Munteanu et al.; 2014; Munteanu et al., 2017).

Okrem využitia historických máp bola tiež v niekoľkých štúdiách riešená aj identifikácia zmeny lesnej pokrývky prostredníctvom spracovania leteckých snímok (Faltan a Bánovský, 2008; Olah a Boltižiar, 2009; Gerard et al., 2010; Faltan et al., 2011). Dostupnosť ortofotosnímkov prináša nové možnosti uplatnenia poloautomatizovaných a automatizovaných metód na identifikáciu krajinných prvkov. V porovnaní s manuálnou vektorizáciou objektov na snímkach, automatické spracovanie podstatne zvyšuje efektívnosť interpretácie ortofotosnímkov.

Využitie objektovo-orientovanej klasifikácie na mapovanie krajinných prvkov v časových radoch na historických čiernobielych ortofotosnímkach bolo čiastočne riešené v niekoľkých prácach so zameraním sa na identifikáciu zosuvu pôdy (Martinez et al., 2012) alebo prízemnej vegetácie (Laliberte et al., 2004). Pre relatívne malé územia a pri vysokej kvalite mapových podkladov sa pri automatizovaných metódach dosahujú dobré výsledky (Iwanowski a Kozak, 2012; Herrault et al., 2013). Automatizované metódy poskytujú uspokojivé výsledky, ak cieľová trieda je ľahko identifikovateľná a kontrastuje so susednými triedami. V prípadoch čiernobielych ortofotosnímkov je presnosť identifikácie otázná (Bednarczyk et al., 2016).

Historické mapy predstavujú jedinečný prístup k spoľahlivému hodnoteniu zmien v krajine (Kaim et al., 2016). Historické ortofotosnímky v spojení s geoinformačnými technológiami poskytujú vhodný nástroj nielen na analýzu vývoja v čase a priestore, ale aj pre pochopenie historických súvislostí. Z tohto dôvodu je významné navrhnúť vhodnú metodiku na efektívnu analýzu historických mapových podkladov pre účely efektívneho posúdenia dynamiky lesného prostredia pre potreby lesníckeho výskumu, výučby a praxe. Zároveň môžeme konštatovať, že vytvorenie časových radov z historických a súčasných máp a ortofotosnímkov sú zdrojom informácií aj pre širokú odbornú verejnosť. Napríklad aplikácia Google Earth sprístupňuje náhľad na krajinu v rámci niekoľkých časových období (Trnčák a Švec, 2013).

Cieľom nášho príspevku bolo navrhnúť komplexný metodický postup na automatizovanú klasifikáciu lesa z čiernobielych a farebných historických ortofotosnímkov. Metodický postup sme prakticky overili na modelovom území Vysokoškolského lesníckeho podniku (VšLP) Technickej univerzity (TU) vo Zvolene. Z historických ortofotosnímkov sme odvodili hranice lesných porastov v troch časových obdobiach (1949, 1978 a 2009), hodnotili správnosť klasifikácie ortofotosnímkov, vypočítali a hodnotili sme zmenu zalesnenia modelového územia v danom časovom období.

2. Metodika práce

Identifikácia lesnej a nelesnej plochy predstavuje určenie okrajových hraníc plôch porastenými drevinami pomocou objektovo-orientovanej klasifikácie v programe eCognition Developer spoločnosti Trimble, kde proces segmentácie, klasifikácie a extrakcie ponúka niekoľko možností analýzy obrazu. Procesom segmentácie a klasifikácie obrazu sme na podklade historických a aktuálnych ortofotosnímkov odvodili skutočný stav lesnej pokrývky v jednotlivých obdobiach (1949, 1978 a 2009) na území VšLP.

2.1 Charakteristika záujmového územia

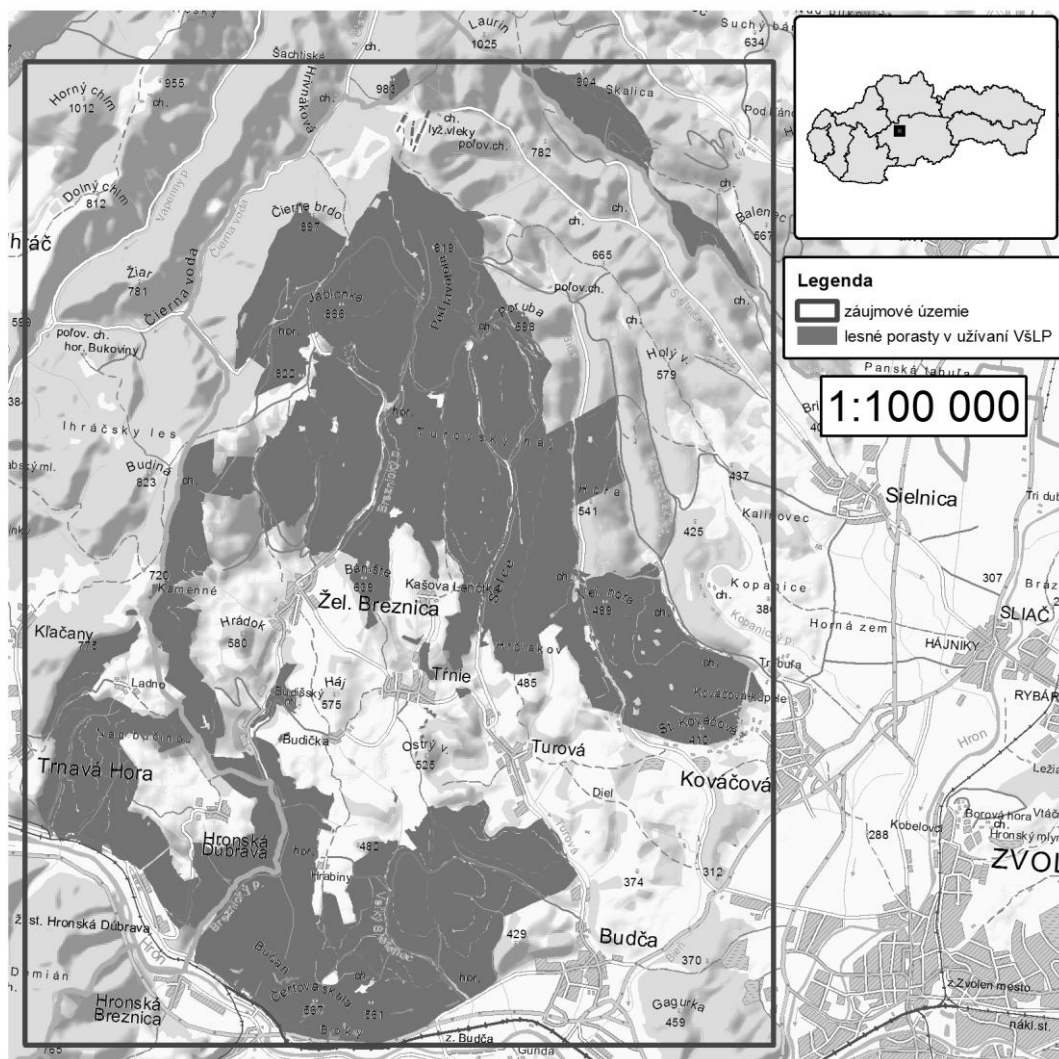
Lesnícka fakulta TU vo Zvolene poskytuje vrcholový stupeň lesníckeho vzdelania na území Slovenskej republiky. Svoje teoretické vedomosti môžu študenti praktizovať v špecializovanom zariadení – VšLP.

Územie VšLP, rozprestierajúce sa prevažne v juhozápadnej časti Kremnických vrchoch (lesná správa Budča) a severovýchodnej časti pohoria Javorie (lesná správa Sekier), predstavuje celistvý lesný komplex, ktorý vytvára modelové podmienky na vykonávanie všetkých základných činností v lese. Je to spôsobené širokou škálou pedologických, klimatických a vegetačných pomerov na území, ktoré je situované v rozmedzí nadmorských výšok 250 – 1 025 m n. m. Využívanie prírodných schopností tohto územia nad rámec bežného obhospodarovania lesa umožňuje skutočnosť, že všetky lesy sú vo vlastníctve štátu v kategórii lesov osobitného určenia. V rámci ochrany prírody

sú na tomto záujmovom území lokalizované dve národné prírodné rezervácie (NPR Boky a NPR Mláčik), ako aj jeden chránený prírodný výtvor a 14 chránených stromov.

Prvotné zameranie VŠLP bolo na využívanie prírodných zdrojov a hospodárskych pomerov na výučbu ako aj absolvovanie preddiplomových a prevádzkových praxí študentov Lesníckej fakulty. Okrem toho sa postupne začali budovať špecializované objekty zamerané na vývoj lesa a hospodársku úpravu lesa, cez meranie klimatických a pôdných pomerov, lesnú techniku, meliorácie až po zhodnotenie lesnej výroby.

Záujmovým územím pre predložený príspevok je územie lesnej správy Budča, pričom vzhľadom na dostupnosť ortofotostánikov z jednotlivých období bol zvolený obdĺžnikový výrez s rozsahom uvedeným na obrázku 1. Výmera záujmového územia je 12 805 ha.



Obr. 1 Záujmové územie VŠLP

2.2 Materiál a podklady

Vhodný podklad za účelom zisťovania dynamiky lesného prostredia z dlhodobého hľadiska predstavuje vojenské mapovanie, ktorého začiatky siahajú do obdobia rokov 1769 až 1784 v rámci I. vojenského mapovania (tzv. Jozefského). Avšak až II. vojenské mapovanie spĺňa podmienky definície štátneho mapového diela vzhľadom na presnejšie geodetické zameranie, ktoré bolo na území Slovenskej republiky vykonané v rokoch 1819 až 1858 (Zeman, 2012). III. vojenské mapovanie (1875 – 1884) poskytlo mapy zhotovené v mierke 1 : 25 000. Merania z tohto mapovania boli použité aj pri tvorbe systému Jednotnej trigonometrickej siete katastrálnej (S-JTSK). Ďalším pokusom o nové štátne mapové dielo bolo IV. vojenské mapovanie, ktoré sa vykonalo len vo Vysokých Tatrách v rokoch 1896 až 1897 (Zeman, 2012). Mapy z vojenských mapovaní z 18. a 19. storočia ukrývajú v sebe málo využitý potenciál o historickej štruktúre krajiny a jej využívaní (Boltížiar et al., 2013). Zobrazenie zalesneného územia je v rámci jednotlivých vojenských mapovaní rôzne. Boltížiar et al. (2013) podrobne opísali zobrazenie hranice a rozšírenia lesa a nelesnej stromovej a krovinovej vegetácie v jednotlivých obdobiach.

Rozvoj letectva počas vojnovnej situácie v prvej polovici 20. storočia na celom svete otvoril nové možnosti mapovania krajiny. Možnosti leteckého snímkovania koncom prvej polovice 20. storočia priniesli prvé snímky územia Slovenska, ktoré prinášajú detailnejšie mapové podklady pre účely identifikácie prvkov v krajine. Spracovaním čiernobielych leteckých snímok z obdobia 40-tých a 50-tých rokov z archívu Topografického ústavu v Banskej Bystrici vznikla historická ortofotomapa, ktorá pokrýva celé územie Slovenska s rozlíšením 0,5 m (<http://mapy.tuzvo.sk/hofm>). Postupom času sa intenzita leteckého snímkovania územia Slovenska zvyšovala, čím sa vytvorili presnejšie mapové podklady pre hodnotenie dynamiky jednotlivých prvkov krajiny štruktúry.

Zdrojom tematických vrstiev v predloženej príspevku (zastavané územie obce (ZÚO), vodné plochy, jednotky priestorového rozdelenia lesa) na spresnenie klasifikácie lesa bola geografická databáza z roku 2014, ktorú vyhotovilo Národné lesnícke centrum – Ústav lesných zdrojov a informatiky vo Zvolene (NLC – ÚLZI).

Klasifikácia lesnej pokrývky bola uskutočnená prostredníctvom ortofotosnímkov z rôznych časových období (1949, 1978 a 2009), z ktorých boli vytvorené súvislé ortofotomozaiky pre potreby automatizovanej klasifikácie.

Čiernobiela historická ortofotomapa Slovenska (rok 1949) s rozlíšením 50 cm bola obstaraná v rámci projektu Centrum excelentnosti pre podporu rozhodovania v lese a krajine, ITMS 26220120069, ktorého riešiteľom bola TU vo Zvolene v spolupráci s NLC vo Zvolene. Historickú ortofotomapu vyhotovila spoločnosť GEODIS SLOVAKIA, s.r.o. Čiernobiele letecké meračské snímky, z ktorých bola ortofotomapa vytvorená, boli vyhotovené prostredníctvom analógovej fotogrametrickej kamery RB 20/30 v roku 1949 so štandardným formátom snímok 23 × 23 cm. Digitalizácia negatívov bola vykonaná pomocou skenera Leica Helava DSW 200 s hustotou skenovania 1700 DPI (geometrické rozlíšenie 15 µm).

Čiernobiele ortofotosnímky s rozlíšením 50 cm vyhotovené z leteckých meračských snímok z roku 1978 poskytlo NLC – ÚLZI vo Zvolene.

Farebnú ortofotomapu s rozlíšením 50 cm vyhotovili spoločnosti EUROSENSE, s.r.o. a GEODIS SLOVAKIA, s.r.o. Ortofotomapa bola vyhotovená z leteckých meračských snímok z roku 2009.

2.3 Segmentácia a klasifikácia lesa z ortofotosnímkov

Identifikácia lesnej a nelesnej plochy predstavuje určenie okrajových hraníc plôch porastených drevinami pomocou objektovo-orientovanej klasifikácie v programe eCognition Developer.

Procesom segmentácie, ako východiskového kroku analýzy obrazu, sme automatizovaným spôsobom rozdelili obraz na menšie časti nazývané objektové segmenty, kde bolo dôležité ich správne definovať z hľadiska veľkosti a tvaru. Za účelom segmentácie samotných obrazov bola použitá viacúrovňová segmentácia, ktorá spája časti s podobnými hodnotami pixelov do segmentov tak, že homogénne plochy sú zlúčené do väčších segmentov, zatiaľ čo heterogénne plochy do menších.

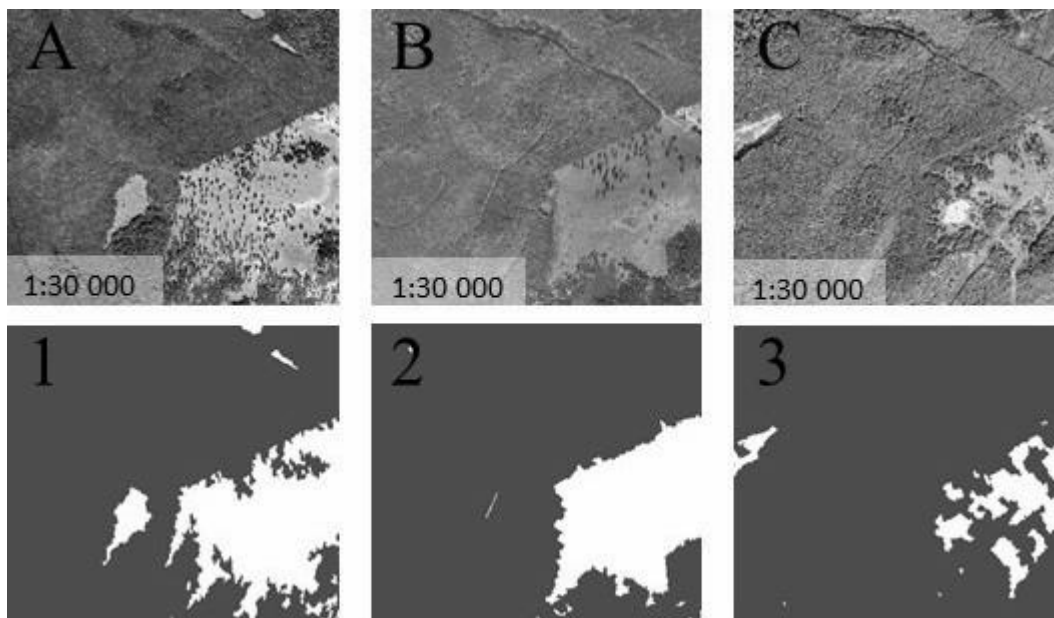
Pri spracovaní celej sady ortofotosnímkov v sledovaných obdobiach boli na základe vizuálneho zhodnotenia stanovené optimálne parametre (mierka, hladkosť a kompaktnosť) vstupujúce do procesu segmentácie. Na dosiahnutie vhodnej homogenity obrazových prvkov sme stanovili hodnoty parametrov pre kompaktnosť 0,8 a hladkosť 0,5. K segmentácii sme pristupovali s hodnotou 100 na parameter mierky. Tento proces bol použitý na odvodenie skutočného stavu lesa v rámci čiastočne automatizovanej klasifikácie, a tiež pre automatizovanú klasifikáciu lesnej pokrývky.

Proces klasifikácie bol rozdelený do dvoch častí. Prvá časť predstavuje čiastočne automatizovanú klasifikáciu, ktorá slúžila na odvodenie skutočného stavu lesa (získania referenčných údajov). V druhej časti sme vykonali plne automatizovanú klasifikáciu, ktorej výsledok bol vyhodnotený pomocou TTA masky (*Test and Training Area mask*) prezentujúcej rastrový obraz záujmového územia vytvoreného zo skutočného lesa čiastočne automatizovanou klasifikáciou v prvej časti.

2.4 Odvodenie skutočného stavu lesnej pokrývky v jednotlivých obdobiach

Na vyhodnotenie správnosti klasifikácie bolo nevyhnutné vytvoriť referenčné plochy lesnej a nelesnej pokrývky. Referenčné plochy lesnej a nelesnej pokrývky vychádzali zo segmentácie a čiastočne automatizovanej klasifikácie ortofotosnímkov v programe eCognition Developer, ktorú tvorili: automatizovaná klasifikácia prostredníctvom rozhodovacieho stromu s využitím parametra GLCM (Grey-Level Co-occurrence Matrix) a vizuálna kontrola klasifikovaného lesa na každej ortofotosnímkke.

Parameter GLCM sa využíva na opísanie textúry obrazu. Hodnota parametra bola pre každú ortofotosnímkku rôzna (v rozsahu od 70 do 110). V prípadoch nesprávnej klasifikácie segmentov sme takto zaradené segmenty priradili, resp. odobrali z triedy charakterizujúcej les. Pre účely príspevku bolo nevyhnutné definovať les, ktorý bol chápaný zo širšej perspektívy. Medzi lesnú pokrývkou sme zaradili súvislé lesné územia, ktoré formujú jednotky priestorového rozdelenia lesa, ako aj väčšie územia s hustejšie roztrúsenou stromovitou vegetáciou na otvorenej ploche a líniovými stromoradiami okolo ciest a vodných tokov, ktoré nie sú súčasťou jednotiek priestorového rozdelenia lesa. Výstupy klasifikácie boli exportované do *.shp súborov pre ďalšie spracovania v programe ArcGIS 10.2, pričom segmenty boli transformované na polygóny (obr. 2).



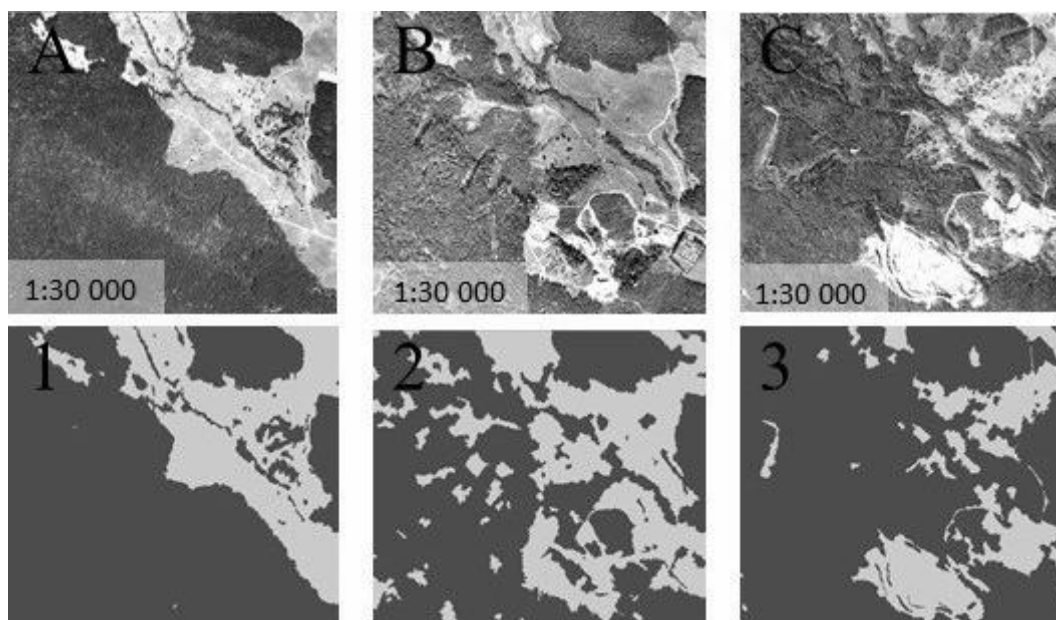
Obr. 2 Porovnanie výrezov z ortofotosnímkov a vrstvy lesa pomocou čiastočne automatizovanej klasifikácie (prislúchajúce obrázky – A1: rok 1949, B2: rok 1978, C3: rok 2009)

Týmto spôsobom sme pre každú ortofotosnímkú získali polygónovú vrstvu správne klasifikovaného lesa, ako aj lesa, ktorý tvorili dodatočne pridané objektové segmenty a dodatočne odobrané polygóny. Štandardnými nástrojmi GIS pre odstránenie časti vrstiev sme z posudzovaného územia odstránili všetky polygóny, ktoré tvorili prienik so ZÚO a vodnými plochami. Pridaním, resp. odobraním nesprávne klasifikovaných polygónov k tematickej vrstve správne klasifikovaného lesa sme získali vrstvu skutočného stavu lesa pre každé posudzované obdobie. Nakoľko sme pre potreby predloženého príspevku brali do úvahy les ako celok, spojili sme všetky polygóny reprezentujúce skutočný stav lesa v danom období do jedného viacnásobného polygónu. V poslednej fáze odvodenia skutočného stavu lesa sme vypočítali výmery polygónu reprezentujúceho les v jednotlivých obdobiach. Získaný skutočný stav lesa následne slúžil ako porovnávací etalón na posúdenie správnosti automatizovanej klasifikácie.

2.5 Automatizovaná klasifikácia

V prípade automatizovanej klasifikácie sa stali vytvorené ortofotomozaiky podkladovým materiálom. Pretože v predchádzajúcom kroku boli z vrstvy referenčného lesa odstránené ZÚO a vodné plochy, bolo treba pred procesom segmentácie a klasifikácie a pre zachovanie jednotnosti porovnáanej plochy odstrániť časti ZÚO a vodných plôch priamo z ortofotomozaiky.

Základným krokom v procese klasifikácie je definovanie triedy *les* a *neles*. Na dosiahnutie čo najreprezentatívnejšieho výsledku klasifikácie sme museli definovať kritériá, ktoré čo najlepšie určujú tieto triedy. Po analýze obrazových objektov sme ako určujúcu podmienku zvolili spektrálnu hodnotu pixela obrazovej vrstvy. Na určenie prahovej hodnoty podmienky triedy *les* sme najskôr vykonali sadu pokusov klasifikácií s hodnotami v intervale $\langle 90, 120 \rangle$ v krokoch po 10 spektrálnych hodnotách, z ktorých sme na základe výsledkov celkovej správnosti a KHAT indexu určili optimálnu prahovú hodnotu zvoleného kritéria pre danú ortofotomozaiku. V ďalšom kroku sme na základe definovania inverznej podmienky stanovili triedu *neles*. Na obr. 3 je znázornený výsledok automatizovanej klasifikácie sledovaných rokov vo výreze ortofotomozaiky.



Obr. 3 Porovnanie výrezov z ortofotosnímkov a vrstvy lesa pomocou automatizovanej klasifikácie (prislúchajúce obrázky – A1: rok 1949, B2: rok 1978, C3: rok 2009)

3. Výsledky

Hodnotenie správnosti automatizovaných klasifikácií sme vykonali na základe generovania kontingenčných tabuliek. Na vyjadrenie dynamiky lesnej pokrývky v sledovanom období bola vytvorená atribútová tabuľka jednotiek priestorového rozdelenia lesa, kde hlavnými ukazovateľmi dynamiky sú výmery lesa v sledovaných obdobiach a absolútne a relatívne hodnoty odlesnenej a zalesnenej plochy.

3.1 Správnosť klasifikácie lesa

Záujmové územie predloženého príspevku je tvorené prevažne lesnými porastmi v užívaní VŠLP (767 jednotiek priestorového rozdelenia lesa). Pre potreby ďalšieho spracovania výsledkov sme vytvorili atribútovú tabuľku súčasných lesných porastov z hľadiska ich historického vývoja (obr. 4). Súčasťou tabuľky sú atribúty identifikujúce lesné porasty (*identifikátor – IDPS, dielec – DC, čiastková plocha – CP, porastová skupina – PS*), ktoré boli prebrané spolu s ich geometriou z geografickej databázy NLC vo Zvolene. Atribút *IDPS* môže slúžiť ako identifikátor na pripojenie ďalších taxačných charakteristík lesných porastov (vek, zakmenenie, dreviny a pod.) z geografickej databázy NLC.

Dynamiku lesa v sledovanom období ilustrujú 3 atribúty pre 3 obdobia, v ktorých bol booleanskou logikou vyjadrený výskyt lesa v jednotlivých obdobiach (1 – zalesnená plocha; 0 – bez zalesnenia). Na základe prieniku polygónovej vrstvy hranice lesných porastov s lesom z daného časového obdobia sme priradili hodnoty 1 alebo 0. Hodnota 1 bola priraďovaná v prípade, keď referenčný les mal prienik s plochou aktuálneho lesného porastu aspoň na 75 %. Súčasťou atribútovú tabuľky je atribút kontinuity *idk*, prostredníctvom ktorého bol pripojený číselník so slovným opisom v atribúte *nazov* slovne opisujúci kontinuitu lesa počas sledovaného obdobia.

FID	Shape *	IDPS	DC	CP	PS	r1949	r1978	r2009	idk	nazov
0	Polygon	2013EF0380340_0	340		0	1	1	1	4	relatívne nenarušená kontinuita lesa od 50. rokov
1	Polygon	2013EF0380365a0	365	a	0	0	1	1	3	relatívne nenarušená kontinuita lesa od konca 70
2	Polygon	2013EF0380365b0	365	b	0	1	1	1	4	relatívne nenarušená kontinuita lesa od 50. rokov
3	Polygon	2013EF0380366a0	366	a	0	1	1	1	4	relatívne nenarušená kontinuita lesa od 50. rokov
4	Polygon	2013EF0380366c0	366	c	0	1	1	1	4	relatívne nenarušená kontinuita lesa od 50. rokov
5	Polygon	2013EF0380366d0	366	d	0	0	1	1	3	relatívne nenarušená kontinuita lesa od konca 70
6	Polygon	2013EF0380418_2	418		2	1	1	1	4	relatívne nenarušená kontinuita lesa od 50. rokov
7	Polygon	2013EF0380418_3	418		3	0	1	0	1	plocha bez zalesnenia približne začiatkom 21. st
8	Polygon	2013EF0380419_1	419		1	1	1	1	4	relatívne nenarušená kontinuita lesa od 50. rokov
9	Polygon	2013EF0380419_2	419		2	1	1	1	4	relatívne nenarušená kontinuita lesa od 50. rokov

Obr. 4 Atribútová tabuľka lesných porastov v užívaní VŠLP

Pri určovaní celkovej správnosti šlo o relatívne vyjadrenie správne klasifikovaných obrazových prvkov z ich celkového počtu. KHAT index vychádza z metódy maximálnej pravdepodobnosti pomocou odvodennej trénovacej množiny (klasifikátora) odstráni určité percento chýb, ktoré by vyprodukoval úplne náhodný proces klasifikácie (Žíhla a Scheer, 2001). Hodnotenie správnosti automatizovaných klasifikácií bolo vykonané na základe vygenerovaných kontingenčných tabuliek programom eCognition Developer spoločnosti Trimble. Vygenerovaním kontingenčných tabuliek sme zhodnotili miery správnosti pomocou celkovej správnosti a KHAT indexu.

Na základe dosiahnutých výsledkov (tab. 1) môžeme konštatovať, že pri použití parametra miery s hodnotou 100 na ortofotosnímokach z roku 1949 bola dosiahnutá najvyššia celková správnosť 0,899 (pri súčasnej hodnote indexu KHAT 0,769). V rámci posudzovania ortofotosnímkov z roku 1978 bola najvyššia celková správnosť 0,836 (pri súčasnej hodnote indexu KHAT 0,580)

dosiahnutá zadefinovaním prahovej hodnoty 110. V rámci hodnotenia ortofotosnímkov z roku 2009 považujeme za najvhodnejšiu prahovú hodnotu 110, kde sme pri klasifikačnom procese dosiahli celkovú mieru správnosti 0,937 (pri súčasnej hodnote indexu KHAT 0,801). Avšak na základe dosiahnutých výsledkov môžeme konštatovať, že pri použití farebnej ortofotosnímkov boli rozdiely v celkovej správnosti len minimálne.

Tab. 1 Hodnoty celkovej správnosti a indexu KHAT pre jednotlivé spektrálne hodnoty pixela v sledovaných rokoch

Spektrálna hodnota pixela	1949		1978		2009	
	Celková správnosť	KHAT index	Celková správnosť	KHAT index	Celková správnosť	KHAT index
90	0,871	0,720	0,577	0,239	0,907	0,737
100	0,899	0,769	0,772	0,494	0,933	0,798
110	0,892	0,742	0,836	0,580	0,937	0,801
120	0,860	0,654	0,830	0,533	0,924	0,745

Použitie čiernobielych ortofotomozaik v porovnaní s farebnou ortofotomozaikou vykazuje väčšiu variabilitu hodnôt celkovej správnosti pri použití rôznych spektrálnych hodnôt pixela. Je to spôsobené menším rozsahom farieb použiteľných pre dostatočné znázornenie lesnej pokrývky z historických ortofotomozaik. Zároveň z výsledkov vyplýva, že ortofotomozaika vyhotovená z leteckých meračských snímkov z roku 1978 vykazuje väčšiu variabilitu hodnôt celkovej správnosti, čo môžeme pripísať vplyvu menších rozdielov vo farebnom znázornení medzi lesným prostredím a otvorenými plochami (lúk, polí).

3.2 Dynamika lesnej pokrývky v sledovanom období

Hlavnými ukazovateľmi dynamiky sú výmery lesa v sledovaných obdobiach a absolútne a relatívne hodnoty odlesnenej a zalesnenej plochy. Pre účely odvodenia týchto charakteristík sme v programe ArcGIS 10.2 použili nástroje na postupné získanie sledovaných veličín. Absolútne vyjadrenie výmery lesa, ako aj lesa s rôznou kontinuitou, bolo vypočítané v troch časových obdobiach s použitím štandardných funkcií GIS na výpočet výmer. Výpočet výmery lesných častí, ktoré boli zobrazené na snímke z posudzovaného obdobia a zároveň zmizli na snímke z nasledujúceho obdobia (odlesnenie) a ktoré na snímke z predchádzajúceho obdobia neboli zalesnené v porovnaní so snímkom z posudzovaného obdobia (zalesnenie), je možné analyticky vyjadriť:

$$vo_r = v_{r-1} - v_r \text{ (ha)} \quad (1)$$

$$vz_r = v_r - v_{r-1} \text{ (ha)} \quad (2)$$

$$vo_r = \frac{vo_r}{v_r} * 100 \text{ (%) } \quad (3)$$

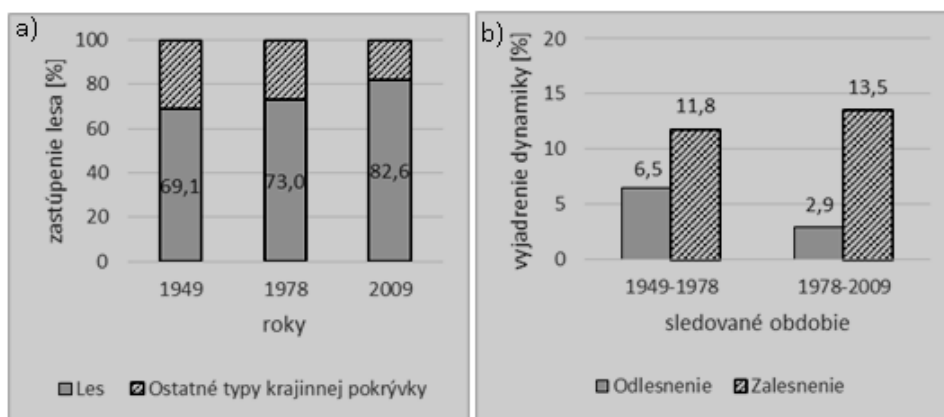
$$vz_r = \frac{vz_r}{v_r} * 100 \text{ (%) } \quad (4)$$

kde v je výmera v hektároch, vo je výmera odlesnenej plochy, vz je výmera zalesnenej plochy, r je posudzované obdobie, $r-1$ je predchádzajúce obdobie.

Podľa grafov na obr. 5 môžeme konštatovať, že zastúpenie lesa v záujmovom území má rastúcu tendenciu. Od začiatku po koniec časového radu narástla lesnatosť územia o 13,5 % (viac ako 0,2 % ročne). Z hľadiska absolútneho vyjadrenia výmery ide o nárast zalesneného územia o 1 544 ha. Výmera lesa v približne strede časového radu v roku 1978 naznačuje mierne exponenciálny nárast počas celého sledovaného obdobia. V prvej polovici sledovaného obdobia vzrástla lesnatosť o 3,9 %, zatiaľ čo v druhej polovici až o 9,6 %. Uvedený trend môže mať príčiny v užívaní územia

Vysokoškolským lesným podnikom až od roku 1958, ktorých lesy v súčasnosti tvoria významnú časť záujmového územia. Z tohto dôvodu je predpoklad, že lesy do tohto obdobia boli zaradené prevažne do kategórie hospodárskych lesov so zameraním na ťažbu drevnej hmoty pri zachovaní trvalo udržateľného a odborného hospodárenia v lesoch. Po zaradení územia do užívania VŠLP sa lesy evidujú ako lesy osobitného určenia, kde je predpoklad nižšej ťažby. O uvedenej skutočnosti svedčí aj zvýšené percento odlesnenia v prvej polovici sledovaného časového radu (6,5 %) v porovnaní s druhou polovicou (2,9 %).

Na základe uvedených zmien kategórií lesa sa dá predpokladať aj nárast zalesnenia, avšak zmena medzi prvou a druhou polovicou časového radu v zalesnení nie je tak výrazná ako pri odlesnení. Zväčšená odlesnená plocha a zmenšená zalesnená plocha v prvej polovici sledovaného časového radu môžu byť spôsobené aj väčším využívaním poľnohospodárskej pôdy miestnym obyvateľstvom. Zároveň je dôležité si uvedomiť, že zníženie lesnej pokrývky mohlo spôsobiť viacej dôvodov, a to nielen vplyvom samotného odlesnenia, ale napr. aj požiaru a podobne.



Obr. 5 a) Zastúpenie lesa v sledovaných rokoch v percentách, b) Odlesnenie a zalesnenie z celkovej výmery lesa na konci sledovaného obdobia

Postupnou migráciou miestneho obyvateľstva do väčších miest (Zvolen, Banská Bystrica) sa od 2. polovice sledovaného obdobia znižovala poľnohospodárska činnosť, čo tiež nepriamo pôsobilo na zmenu a ťažbu v rámci udržateľných lesníckych operácií.

Prekrytím polygónov charakterizujúcich les zo snímok z rokov 1949 a 1978 so stavom lesa zo snímok z roku 2009 sme odvodili nový atribút kontinuity *idk*, ktorý ukazuje, či sa les pokrýva s lesom z historických ortofotosnímkok. V prípade, že sa les na ortofotosnímkach z roku 2009 čiastočne prekryval s lesom zo starších ortofotosnímkok, bol rozdelený na zalesnenú plochu v predchádzajúcom období a nezalesnenú plochu. Týmto spôsobom vznikla podrobnejšia mapa zobrazujúca tri kategórie lesa:

- les s kontinuitou menej ako 31 rokov (les, ktorý sa nachádzal iba na ortofotosnímkach z roku 2009),
- les s kontinuitou viac ako 31 rokov a menej ako 60 rokov (les na ortofotosnímkach z roku 2009 a súčasne na snímkach z roku 1978),
- les s kontinuitou viac ako 60 rokov (les, ktorý sa nachádzal iba na ortofotosnímkach z roku 1949).

Prekrytím vrstiev z rôznych období sme získali informáciu o kontinuite lesnej pokrývky v záujmovom území počas sledovaného časového radu. Na základe dosiahnutých výsledkov môžeme hovoriť o relatívne neprerušenej kontinuite v rámci posudzovaného lesa. Prevažná časť záujmového územia bola od začiatku sledovaného obdobia súvislo pokrytá lesnými porastami. Vplyvom nízkej úrovne urbanizácie okolitých obcí a racionálnej ťažbe drevnej hmoty kvôli špecifickému zameraniu územia, nedochádzalo k výraznejším narušeniam stálej súvislosti lesnej pokrývky.

Záver

Rekonštrukcia stavu sledovaného javu alebo objektu v krajine v rôznych časových obdobiach prostredníctvom nástrojov GIS predstavuje stále veľký potenciál v lesníckom výskume a výučbe (Kaim et al., 2016; De Keersmaecker et al., 2016), pri hodnotení biodiverzity a klimatických zmien (Fuchs et al., 2013) a analýze priestorových zmien vo využití krajiny (Statuto et al., 2016; Bičík et al., 2015). Doterajší výskum sa v prevažnej miere zameriaval na sledovanie uvedených javov z dlhodobejšieho hľadiska prostredníctvom historických kartografických diel z vojenských mapovaní z 18., 19. a začiatku 20. storočia. Historický stav bol vo vybraných prípadoch porovnávaný so súčasným stavom prostredníctvom farebných ortofotosnímkov, kde skúmaný typ krajiny štruktúry bol digitalizovaný manuálnou vektorizáciou (napr. Skaloš et al., 2011). Výhodou použitia starých máp je jednoznačné zobrazenie hraníc rôznych typov využitia krajiny. Nevýhodou je ich dostupnosť, presnosť georeferencovania a časová náročnosť v prípade manuálnej vektorizácie (Kaim et al., 2016). Zároveň treba dodať, že dôkladnejšie sledovanie dynamiky určitých typov krajiny (napr. roztrúsené šírenie lesa na otvorenej ploche) si vyžaduje podrobnejší detail. Čiernobiely ortofotosnímkový zdroj často jediným primeraným zdrojom údajov dokumentujúcich skutočný priestorový dosah lesov v predchádzajúcich desaťročiach. Za nevýhodu môžeme považovať možnosť ich použitia pre skúmanie dynamiky javov len v relatívne krátkom časovom období.

V príspevku prezentujeme proces identifikácie lesa z ortofotosnímkov tvoriacich 60 rokov dlhý časový rad a vyhodnotenie dynamiky lesnej pokrývky počas sledovaného obdobia. Predložená metodika poskytuje návrh čiastočne automatizovanej klasifikácie skutočného stavu lesa a výsledky z použitia automatizovanej klasifikácie na čiernobielych a farebných ortofotomozaikách z rokov 1949, 1978 a 2009. Multitemporálnou analýzou na záujmovom území VŠLP sme odvodili hlavné ukazovatele dynamiky lesa prostredníctvom štandardných nástrojov GIS. Na základe dosiahnutých výsledkov môžeme konštatovať, že šírenie lesnej pokrývky na záujmovom území malo počas sledovaného obdobia rastúcu tendenciu, čo môžeme v prevažnej miere pripísať zmene kategórie lesa vplyvom založenia VŠLP na tomto území na začiatku sledovaného obdobia. S tým súvisí aj odlišný prístup k hospodáreniu na tomto území vzhľadom na nielen poloprevádzkové činnosti, ale aj vedecko-výskumné aktivity v spojení s výučbou budúcich lesníkov.

Príspevok bol vypracovaný s finančnou podporou Internej projektovej agentúry TUZVO (IPA) v rámci projektu Návrh participatívneho GIS pre publikovanie informácií o lesoch, projekt IPA č. 7/2017.

Literatúra

- BEDNARCZYK, B., KAIM, D., OSTAFIN, K. (2016). Forest cover change or misinterpretation? on dependent and independent vectorisation approaches. *Prace Geograficzne*, 146, pp. 19-30.
- BIČÍK, I., KUPKOVÁ, L., JELEČEK, L., KABRDA, J., ŠTYCH, P., JANOUŠEK, Z., WINKLEROVÁ, J. (2015). Land Use Changes in Czechia 1845-2010. *Land Use Changes in the Czech Republic 1845-2010*, Springer Geography (Springer, Cham).
- BOLTIŽIAR, M., OLAH, B., PETROVIČ, F. (2013). Historické mapy – zdroj dát pri štúdiu krajiny a jej zmien. *Životné prostredie: revue pre teóriu a starostlivosť o životné prostredie*, 47, 1, s. 8-12.
- BÜRGI, M., SALZMANN, D., GIMMI, U. (2015). 264 years of change and persistence in an agrarian landscape: a case study from the Swiss lowlands. *Landscape Ecology*, 30, 7, pp. 1321-1333.
- CIUPA, T., SULIGOWSKI, R., WAŁEK, G. (2016). Use of GIS-Supported Comparative Cartography and Historical Maps in Long-Term Forest Cover Changes Analysis in the Holy Cross Mountains (Poland). *Baltic Forestry*, 22, 1, pp. 63-73.
- DE KEERSMAECKER, L., ONKELINX, T., DE VOS, B., ROGIERS, N., VANDEKERKHOVE, K., THOMAES, A., DE SCHRIJVER, A., HERMY, M., VERHEYEN, K. (2016). The analysis of spatio-temporal forest changes (1775-2000) in Flanders (Northern Belgium) indicates habitat-specific levels of fragmentation and area loss. *Landscape Ecology*, 30, 2, pp. 247-259.
- FALĽAN, V., BÁNOVSKÝ, M. (2008). Changes in land cover in the area of Výšné Hágy – Starý Smokovec, impacted by the wind calamity in November 2004 (Slovakia). *Moravian Geographical Reports*, 16, 3, pp. 16-26.
- FALĽAN, V., BÁNOVSKÝ, M., BLAŽEK, M. (2011). Evaluation of land cover changes after extraordinary windstorm by using the land cover metrics: a case study on the High Tatras foothill. *Geografie*, 116, 2, pp. 156-171.

- FESCENKO, A., LUKINS, M., FESCENKO, I. (2016). Validation of Medium-Scale Historical Maps of Southern Latvia for Evaluation of Impact of Continuous Forest Cover on the Present-Day Mean Stand Area and Tree Species Richness. *Baltic Forestry*, 22, 1, pp. 51-62.
- FUCHS, R., HEROLD, M., VERBURG, P. H., CLEVERS, J., EBERLE, J. (2013). Gross changes in reconstructions of historic land cover/use for Europe between 1900-2010. *Global Change Biology*, 21, 1, pp. 299-313.
- GERARD, F., BUGÁR, G., GREGOR, M., HALADA, L., HAZEU, G., HUITU, H., KÖHLER, R., KOLAR, J., LUQUE, S., MÜCHER, C. A., OLSCHOFSKY, K., PETIT, S., PINO, J., SMITH, G., THOMSON, A., WACHOWICZ, M., BEZÁK, P., BROWN, N., BOLTÍŽIAR, M., DE BADTS, E., FERANEC, J., HALABUK, A., MANCHESTER, S., MOJSES, M., PETROVIĆ, F., PONS, X., RODA, F., ROSCHER, M., SUSTERA, J., TUOMINEN, S., WADSWORTH, R., ZIESE, H., HERRAULT, P. A. (2010). Determining Europe's land cover changes over the past 50 years using aerial photographs. *Progress in Physical Geography*, 34, pp. 183-205.
- HERRAULT, P. A., SHEEREN, D., FAUVEL, M., PAEGELOW, M. (2013). Automatic Extraction of Forest from Historical Maps based on Unsupervised Classification in the CIELab Color Space. *Geographic Information Science at the Heart of Europe, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, (Springer International Publishing), pp. 95-112.
- IWANOWSKI, M., KOZAK, J. (2012). Automatic detection of forest regions on scanned old maps. *Przegląd Elektrotechniczny*, 88, 4, pp. 249-252.
- KAIM, D., KOZAK, J., KOLECKA, N., ZIÓLKOWSKA, E., OSTAFIN, K., OSTAPOWICZ, K., GIMMI, U., MUNTEANU, C., RADELOFF, V. C. (2016). Broad scale forest cover reconstruction from historical topographic maps. *Applied Geography*, 67, pp. 39-48.
- KAIM, D., KOZAK, J., OSTAFIN, K., DOBOSZ, M., OSTAPOWICZ, K., KOLECKA, N., GIMMI, U. (2014). Uncertainty in historical land-use reconstructions with topographic maps. *Quaestiones Geographicae*, 33, 3, pp. 55-63.
- LALIBERTE, A. S., RANGO, A., HAVSTAD, K. M., PARIS, J. F., BECK, R. F., MCNEELY, R., GONZALEZ, A. L. (2004). Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 93, 1-2, pp. 198-210.
- LEYK, S., BOESCH, R., WEIBEL, R. (2005). A conceptual framework for uncertainty investigation in map-based land cover change modelling. *Transactions in GIS*, 9, 3, pp. 291-322.
- MARTINEZ, J. A., MARTHA, T. R., KERLE, N., VAN WESTEN, C. J., JETTEN, V. G., KUMAR, K. V. (2012). Object-oriented analysis of multi-temporal panchromatic images for creation of historical landslide inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, pp. 105-119.
- MUNTEANU, C., KUEMMERLE, T., BOLTÍŽIAR, M., LIESKOVSKY, J., MOJSES, M., KAIM, D., KONKOLY-GYURO, E., MACKOVČIN, P., MÜLLER, D., OSTAPOWICZ, K., RADELOFF, V. C. (2014). Forest and agricultural land change in the Carpathian region – a meta-analysis of long-term patterns and drivers of change. *Land Use Policy*, 39, 5, pp. 685-697.
- MUNTEANU, C., KUEMMERLE, T., BOLTÍŽIAR, M., HALADA, L., KAIM, D., KIRÁLY, G., KONKOLY-GYURÓ, E., KOZAK, J., LIESKOVSKY, J., MOJSES, M., MÜLLER, D., OSTAFIN, K., OSTAPOWICZ, K., RADELOFF, V. C. (2017). 19th century land-use legacies affect contemporary land abandonment in the Carpathians. *Regional Environmental Change*, 11, 8, pp. 2209-2222.
- OLAH, B., BOLTÍŽIAR, M. (2009). Land use changes within the Slovak biosphere reserves zones. *Ekológia* 28, 2, pp. 127-151.
- SKALOŠ, J., WEBER, M., LIPSKÝ, Z., TRPÁKOVÁ, I., ŠANTRUCKOVÁ, M., UHLIOVÁ, L., KUKLA, P. (2011). Long-term changes in forest cover 1780- 2007 in central Bohemia, Czech Republic. *European Journal of Forest Research*, 131, 3, pp. 871-884.
- STATUTO, D., CILLIS, G., PICUNO, P. (2016). Analysis of the effects of agricultural land use change on rural environment and landscape through historical cartography and GIS tools. *Journal of Agricultural Engineering*, 47, 1, pp. 28-39.
- TRNČÁK, L., ŠVEC, P. (2013). Změny v krajině pohledem historických map. *Vesmír: přírodovědecký časopis*, 92, 3, pp. 160-162.
- ZEMAN, M. (2012). Historické mapové diela na geoportal.sazp.sk. *Enviromagazín: odborný časopis o životnom prostredí*, 17, 5, s. 20-21.
- ŽÍHLAVNÍK, Š., SCHEER, L. (2001). *Dial'kový prieskum Zeme v lesníctve*. Zvolen (Technická univerzita vo Zvolene).

S u m m a r y

Identification of forest cover dynamics from various time series of orthophotos on the territory of the University Forest Enterprise

Identification of changes in a forest cover is an important part of several environmental, sociological and economic analyses, the results of which can be applied in a forest management. Recently, several studies have been presented, focusing on the development of forest dynamics in different parts of Europe with the aid of archived cartographic works. The identification of the forest cover in the previous period was largely solved by manual vectorization of the area of interest on historical maps. However, the creation of orthophotos makes new possibilities for the use of semi-automated and automated methods for the purposes of identification of landscape elements, thus increasing the effectiveness of its identification in comparison with the manual vectorization of objects. At the same time, it is necessary to mention that more detailed monitoring of the dynamics of certain types of landscape (e.g. scattered forest spreading on an open area) requires more specific detail. Black and white orthophotos are often the only reasonable source of data documenting the true spatial extent of forests in the past decades. The territory of interest for this paper is the area of the University Forest Enterprise (EFE) of the Technical University in Žvolen on an area of 12,805 hectares.

In this paper, we present the process of identifying the forest cover from orthophotos forming the time series, as well as the assessment of forest dynamics during the monitored period of 60 years. The presented methodology provides a proposal for a partially automated classification of the actual state of the forest and the results from the use of the automated classification on the black and white and color orthophotos mosaics from years 1949, 1978 and 2009. By multi-temporal analysis on the area of UFE we deduced the main indicators of forest dynamics using standard GIS tools. On the basis of the results, we can conclude that the spread of the forest environment in the area had an increasing tendency during the monitored period. This can be attributed to the change of the forest category due to the establishment of UFE in this territory at the beginning of the monitored period. This is also related to a different approach of the forest management in this area, with regard not only to semi-operational activities, but also to scientific and research activities in connection with the teaching of future foresters.

Fig. 1 Territory of interest of UFE

Fig. 2 Comparison of the orthophotos and the forest layer created using semi-automated classification (the corresponding figures – A1: year 1949, B2: year 1978, C3: year 2009)

Fig. 3 Comparison of the orthophotos and the forest layer created using automated classification (the corresponding figures – A1: year 1949, B2: year 1978, C3: year 2009)

Fig. 4 Attribute table of forest stands of UFE

Fig. 5 a) Representation of the forest in the monitored years, b) Deforestation and afforestation of the total forest area at the end of the monitored period

Tab. 1 Assessment accuracy and values of KHAT index in observed years

Prijaté do redakcie: 29. októbra 2017

Zaradené do tlače: december 2017