

MODELOVANIE A PREDIKCIA ZMIEN KRAJINY S VYUŽITÍM ÚDAJOV CORINE LAND COVER NA PRÍKLADE ÚZEMIA ZO SEVEROVÝCHODNÉHO SLOVENSKA

Hana STANKOVÁ, Lenka ŠOŠOVIČKOVÁ

Landscape change modelling and prediction using CORINE Land Cover data: case study from north-east Slovakia

Abstract: Analysis of land use (LU) and land cover (LC) changes belong to the most important tasks in the geographical applications. Recent inventories of operational models for LU and LC changes are numerous. The Land Change Modeler (LCM) for Ecological Sustainability is a software solution designed to address the pressing problem of accelerated land conversion. The aim of this study is to model and predict the changes in LC in the northeastern part of Slovakia using LCM with CORINE Land Cover data from years 1990, 2000 and 2006. In years 1990 – 2000 there were three main processes within the area of interest: plant succession, deforestation and intensification of agriculture. We predicted these processes for year 2006 and compared the results with actual LC from year 2006. Comparing the whole LC layers, accuracy was relatively high (Kappa index higher than 0,8) due to the large areas without change. Comparing only the areas of change, accuracy was very low (Kappa index 0,2 was the best result, obtained for the process of plant succession). The critical disadvantage of LCM approach is the change prediction based on the previous development only. The discrepancy between predicted and actual LC changes is mainly due to the changes in trends of land conversion, especially after Slovakia joined the EU in May 2004. The change of agriculture policy caused an increase of agriculture intensification and conversely a decrease of plant succession on the abandoned land. Besides these changes in trends, another difficulty represents the processes closely related to human decisions (i.e. deforestation). In this manner, we could predict ongoing processes, but the completely new changes caused by political, economical or other human decisions are unpredictable without very detailed additional information.

Keywords: land cover, change prediction, modelling, Land Change Modeler (LCM), CORINE Land Cover (CLC)

Úvod

Krajina okolo nás sa neustále mení. Zmeny sú výsledkom jednak prírodných procesov, a jednak pôsobenia človeka na krajinu. Najviditeľnejšie sa zmeny krajiny prejavujú na jej najvrchnejšej vrstve – krajinnej pokrývke (*land cover*), menej viditeľne sa môžu prejaviť zmeny vo využití krajiny (*land use*) (Feranec a Oľahel 2001). Príčiny zmien využitia krajiny súvisia najmä s činnosťou človeka a môžeme ich rozdeliť na priame a nepriame (Lambin a Geist 2007). *Priame* (najbližšie) príčiny operujú na lokálnej úrovni a odhaľujú, ako a prečo sú krajinná pokrývka a ekosystémové procesy modifikované ľuďmi (napr. rozširovanie poľnohospodárstva alebo rozširovanie infraštruktúry). *Nepriame* (základné) príčiny operujú na regionálnej až globálnej úrovni a predstavujú základné hnacie sily pre lokálne akcie. Medzi najdôležitejšie základné príčiny patria prirodzená variabilita, ekonomické faktory, technologické, demografické, inštitucionálne, kultúrne faktory a globalizácia.

Mgr. Hana STANKOVÁ, PhD., Prírodovedecká fakulta UK v Bratislave, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava, e-mail: stankova@fns.uniba.sk

Mgr. Lenka ŠOŠOVIČKOVÁ, Výskumný ústav pôdoznanectva a ochrany pôdy, Gagarinova 10, 827 13 Bratislava, e-mail: l.sosovickova@vupop.sk

Zmeny krajiny pokrývky a využitia krajiny ďalej pôsobia na procesy prebiehajúce v krajine, preto je dôležité tieto zmeny poznať, analyzovať ich príčiny (hnacie sily) a pokúsiť sa predpovedať vývoj krajiny v budúcnosti. Význam zmien krajiny v súčasnom svete dokladá aj špeciálna komisia Medzinárodnej geografickej únie (IGU) pre zmeny využitia krajiny a krajiny pokrývky (LUCC – Land Use and Cover Changes), ktorá pôsobí od roku 2004.

V nedávnej dobe bolo vyvinutých mnoho modelov zmien využitia krajiny a krajiny pokrývky. Tieto modely sa snažia odpovedať na najmenej jednu z nasledovných otázok: Prečo, kedy a kde sa zmeny krajiny objavujú? Jeden z modelovacích nástrojov ponúka aj softvér GIS Idrisi pod názvom Land Change Modeler (LCM). Prostredie LCM umožňuje rýchlo a efektívne zisťovať a hodnotiť zmeny krajiny pokrývky, analyzovať prírastky a úbytky v jednotlivých triedach krajiny pokrývky, modelovať špecifické prechody (typy zmien) v krajine a na základe nich predpovedať smer vývoja krajiny pokrývky do budúcnosti. LCM je dostupný, aj ako rozšírenie pre ArcGIS a jeho funkcionality je bližšie predstavená napr. v príspevku (Stanková 2010).

Jedným z najdôležitejších zdrojov údajov o krajiny pokrývke a jej zmenách v podmienkach Slovenska sú vrstvy CORINE Land Cover (CLC). Tento projekt pod gesciou Európskej environmentálnej agentúry (EEA) mapuje krajinnú pokrývku Európy na podklade družicových údajov Landsat, Spot a IRS. Minimálna rozloha mapovaného areálu je 25 ha. Analýzou zmien krajiny pokrývky Slovenska v rokoch 1970 až 2006, identifikovaných z údajov CLC, sa zaoberajú napr. práce Feranec et al. (2002), Feranec a Oľahel (2008), Feranec a Nováček (2009). Niektorí autori analyzovali dynamiku krajiny prostredníctvom priestorovej intenzity zmien (Feranec et al. 2000), hľadaním vzťahov medzi uskutočnenými zmenami a inými vlastnosťami krajiny (Boltižiar 2007, Oľahel et al. 2011), triedením zmien do rôznych typov podľa príbuznosti procesov, ktoré zmeny spôsobili (Feranec et al. 2000, Čerňanský et al. 2003, Kopecká 2006) alebo podľa hierarchickej úrovne, na ktorej zmena nastala (Cebecauerová a Cebecauer 2005). K poznaniu dynamiky krajiny môže prispieť tiež analýza zmien priestorovej štruktúry plôšok prostredníctvom krajinnoeekologických indexov (Oľahel et al. 2004, Boltižiar 2007, Kopecká a Nováček 2008, Pazúr et al. 2010, Falťan et al. 2011).

Cieľom príspevku je modelovanie zmien krajiny na báze údajov CLC z rokov 1990, 2000 a 2006 s využitím modelovacieho nástroja LCM, na príklade územia zo severovýchodného Slovenska. Predpovedané zmeny do budúcnosti boli porovnávané so skutočnými zmenami, ktoré nastali v rokoch 2000 až 2006.

1. Modelovanie zmien krajiny

Modelovaním zmien krajiny pokrývky a využitia krajiny sa zaoberajú sociálne aj prírodné vedy. Sociálne vedy analyzujú zmeny krajiny na *mikroúrovni*, pričom je dôležité ľudské správanie, psychológia a ekonomické faktory. Naopak, geografia a ekológia sa zameriavajú na krajinnú pokrývku a využitia krajiny na *makroúrovni*, priestorovo vyjadrenej prostredníctvom geografických informačných systémov (GIS) a diaľkového prieskumu Zeme. Medzi týmito dvoma prístupmi je len slabé prepojenie (Verburg et al. 2004).

Modely zmien krajiny môžu byť statické alebo dynamické. *Statické* modely priamo počítajú situáciu v danom časovom bode, kým *dynamické* pracujú s časovými krokmi, z ktorých každý je východiskovým bodom pre výpočet nasledujúcej situácie. Preto berú do úvahy možný vývoj počas periódy simulácie a lepšie napodobňujú skutočný priestorový vývoj (Koomen et al. 2007).

Ďalšie dôležité delenie modelov vychádza z toho, či je ich výsledkom priestorová reprezentácia zmien (Lambin a Geist 2007). *Priestorové* modely sa zameriavajú na priestorovo-explicitnú reprezentáciu zmien na určitej úrovni priestorového detailu, pri ktorom je zmena indikovaná pre individuálny pixel rastra alebo inú priestorovú entitu, ako napr. administratívnu jednotku (príklady modelov – CLUE, SLUETH, GEOMOD). Väčšina priestorových modelov pracuje s rastrovými údajmi v prostredí GIS (Mičietová a Kožuch 2008). *Nepriestorové* modely sa zase zameriavajú na rýchlosť a veľkosť zmien bez ohľadu na ich priestorovú distribúciu.

Niektoré modely zmien krajiny sa zaoberajú transformáciou a iné alokáciou (Koomen et al. 2007). *Transformačné* modely začínajú zo súčasného stavu krajiny pokrývky a simulujú možný prechod na iný typ krajiny pokrývky, napr. na základe transformačnej pravdepodobnosti alebo stavu okolia. *Alokačné* modely pridelujú určitý typ krajiny pokrývky na základe charakteristík

miesta (začína sa s prázdnu mapou). Súčasný stav krajiny pokrývky teda môže byť jedným z faktorov vplývajúcich na charakter miesta, ale nemusí sa zachovať do budúcnosti.

Prístupy k modelovaniu zmien krajiny môžeme tiež rozdeliť na deterministické a pravdepodobnostné (Koomen et al. 2007). *Deterministické* modely aplikujú striktné vzťahy príčina – následok, kým *pravdepodobnostné* modely berú do úvahy pravdepodobnosť zmeny krajiny. Výhodou je v tomto prípade zahrnutie prvku neurčitosti do modelovania.

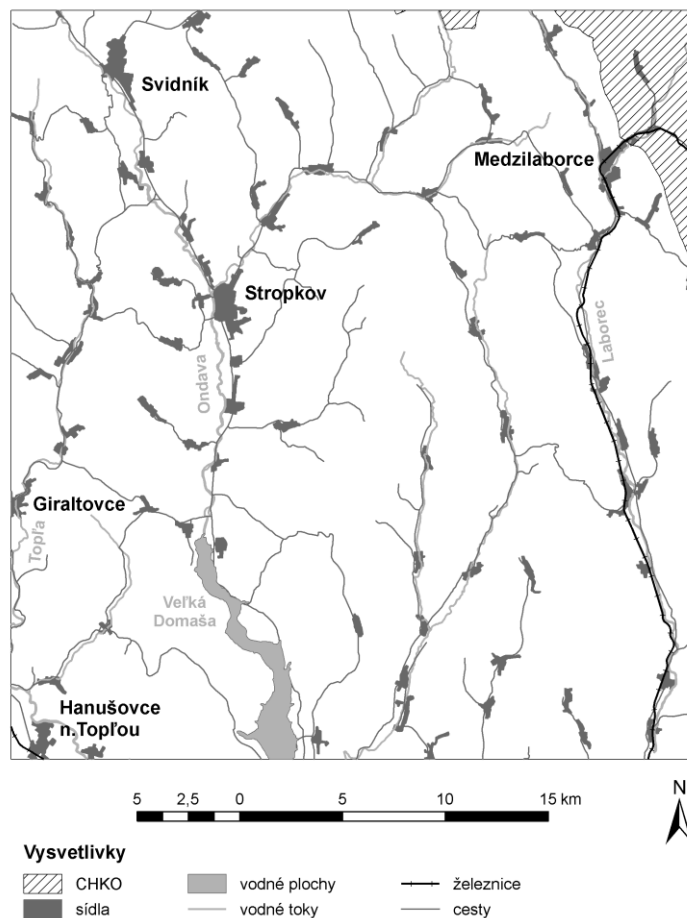
Modelov na simuláciu zmien krajiny existuje mnoho typov, ale všetky sú založené na niekoľkých teoretických princípoch a metódach (Lambin a Geist 2007, Koomen et al. 2007):

1. Bunkové automaty (cellular automata, CA) – sú veľmi vhodné na imitáciu komplexných priestorových procesov na základe jednoduchých rozhodovacích pravidiel (Wolfram 1984 in Koomen et al. 2007). Bunkové automaty sú diskrétné dynamické systémy obsahujúce veľký počet identických základných prvkov, ktoré lokálne interagujú. Hoci sú veľmi jednoduché, môžu generovať bohaté správanie.
2. Multiagentové modely (multi-agent) – popisujú rozhodovanie aktérov v analyzovanom systéme. V multiagentových systémoch je zoskupená množina agentov za určitým cieľom, medzi ktorými sú definované konkrétne vzťahy a väzby. Sú súčasťou rozšírených metód umelej inteligencie. Najznámejším multiagentovým modelom je SWARM.
3. Štatistické analýzy – sú základným nástrojom takmer pre všetky modely zmien krajiny. Typicky aplikujú regresné techniky (lineárne alebo logistické) na hodnotenie zmien. Regresné analýzy pomáhajú kvantifikovať príspevok individuálnych hnacích síl zmien, a tak poskytujú informácie potrebné ku kalibrácii modelov zmien. Mnoho existujúcich modelov je založených výlučne na štatistickom opise pozorovaných zmien LU v minulosti, na základe ktorého predpovedajú budúce vzory. Tieto empiricko-štatistické modely majú výhodu, že sú jednoduché na zostrojenie, ale chýba im teoretický podklad na pochopenie a simuláciu procesov, ktoré skutočne spôsobujú zmeny LU. Aplikovateľnosť týchto modelov je preto limitovaná. Dajú sa použiť na simuláciu možného priestorového vývoja v relatívne krátkom časovom rozpätí v rámci bežných podmienok, ale nedajú sa napr. použiť na simuláciu zmien podľa rôznych budúcich sociálno-ekonomických scenárov.
4. Stochastické modely – sú založené na modeloch prenosu pravdepodobnosti. Stochastický popis procesov sa pohybuje po krokoch cez množinu stavov, ktoré sú definované ako množstvo krajiny pokrytej rôznym využitím, resp. krajinou pokrývkou. Pravdepodobnosti prenosu sú odvodené zo štatistického hodnotenia pozorovaných prenosov.
5. Optimalizačné modely – počítajú optimálnu konfiguráciu využitia krajiny/krajiny pokrývky na základe daných počiatočných podmienok, kritérií a rozhodovacích premenných aplikáciou matematických optimalizačných techník, ako napr. celočíselné lineárne programovanie (integer linear programming) alebo umelé neurónové siete.
6. Dynamické simulačné modely – sú založené na predpoklade, že priestorové a časové vzory zmien krajiny sú vyvolané interakciou biofyzikálnych a sociálno-ekonomických procesov. Na základe apriori znalostí sú komplexné ekosystémy opisované malým počtom diferenciálnych rovníc. Tieto modely nie sú vo väčšine prípadov formulované priestorovo-explicitným spôsobom.
7. Simulácia založená na pravidlách – sa vo všeobecnosti používa na poli fyzikálnych vied a často v kombinácii s GIS. Centrálnym prvkom je imitácia známeho procesu, ktorý sa dá opísať pomocou striktných, kvantitatívnych lokačných pravidiel (napr. erózia pôdy). Príkladom je modelovanie dynamiky krajiny nástrojom LAMOS (Landscape Modelling Shell), ktorý integruje kvantitatívny opis rôznych krajinných procesov, ako je sukcesia vegetácie, narušenie a rozptýlenie, na simuláciu možných krajinnno-ekologických vzorov.
8. Integrované modelovacie prístupy – kombinujú prvky rôznych modelovacích techník, opísaných vyššie, spôsobom najvhodnejším na odpovedanie danej výskumnej otázky. Príkladom je GEOMOD2 a rodina CLUE modelov, ktoré kombinujú štatistické techniky s bunkovými automatmi, resp. integrované hodnotiace modely.

Modelovací nástroj LCM patrí medzi dynamické priestorové transformačné modely. Je založený na integrovanom modelovacom prístupe, ktorý zahŕňa štatistické (logistická regresia) a optimalizačné techniky (umelé neurónové siete) na modelovanie a Markovove reťazce a konkurenčnú alokáciu krajiny na predikciu zmien. Zmeny krajiny v budúcnosti LCM predpovedá na základe zmien identifikovaných v minulosti, čiže modeluje pokračujúci trend vývoja.

2. Prípadová štúdia zo severovýchodného Slovenska (údaje a metódy)

Pomocou nástroja LCM v prostredí Idrisi Andes sme realizovali modelovanie a predikciu zmien krajiny na SV Slovenska na podklade vrstiev CLC1990 a CLC2000. Na validáciu zmien sme použili vrstvu CLC2006. Vrstvy CLC sme získali zo Slovenskej agentúry životného prostredia na účely diplomovej práce (Šošovičková 2010). Zaujímavé územie sa nachádza severne od priehrady Veľká Domaša na rozhraní Laboreckej a Ondavskej vrchoviny, má obdĺžnikový tvar s rozlohou 1210,44 km² a zasahuje aj do CHKO Východné Karpaty (obr. 1).



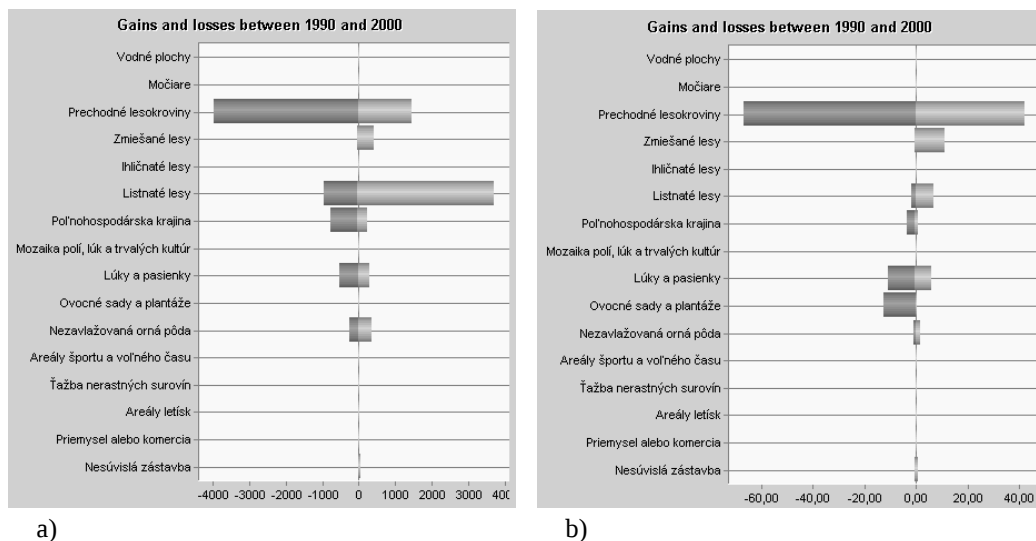
Obr. 1 Mapa záujmového územia

Vstupné údaje o krajinej pokrývke vo vektorovom formáte bolo potrebné konvertovať do rastrového formátu. Ďalšie vstupné údaje do aplikácie LCM tvoril digitálny terénny model (vytvorený interpoláciou z vrstevníc ZM50), raster cestnej siete a raster chránených území. Všetky rastrové vrstvy mali jednotné rozlíšenie 50 m.

2.1 Analýza zmien krajiny

Prvým krokom pri modelovaní zmien je vždy analýza zmien krajiny prebiehajúcich v minulosti (Feranec et al. 2002, Cebecauerová a Cebecauer 2005, Feranec a Oťahel 2008, Oťahel et al. 2011). Analýzou zmien, ku ktorým došlo v záujmovom území v rokoch 1990 až 2000, sme identifikovali hlavné procesy a zmeny, ktoré sme následne modelovali.

K plošne najväčším zmenám za skúmané obdobie došlo pri triede *prechodné lesokroviny* a *listnaté lesy* (obr. 2). Najväčší úbytok zaznamenali *prechodné lesokroviny* (3993 ha, cca 3,3 % celkovej plochy územia) a najväčší prírastok zase *listnaté lesy* (3749 ha, cca 3,1 % celkovej plochy územia). Triedou, ktorá podliehala najväčším zmenám, bola jednoznačne trieda *prechodných lesokrovín*. Až 42 % z jej celkovej rozlohy v spomínanom období pribudlo a až 67 % ubudlo. Ide o prirodzený jav, pretože táto trieda reprezentuje prechodné štádiá lesa od rúbanísk až po mladinu, ktoré neustále vznikajú a zanikajú. Celkovo *prechodných lesokrovín* v hodnotenom období ubudlo, a to predovšetkým na úkor *listnatých lesov*.



Obr. 2 Grafy prírastkov a úbytkov jednotlivých tried v záujmovom území v rokoch 1990 až 2000:
a) prírastky a úbytky v ha, b) podiel prírastkov a úbytkov na celkovej ploche triedy v %

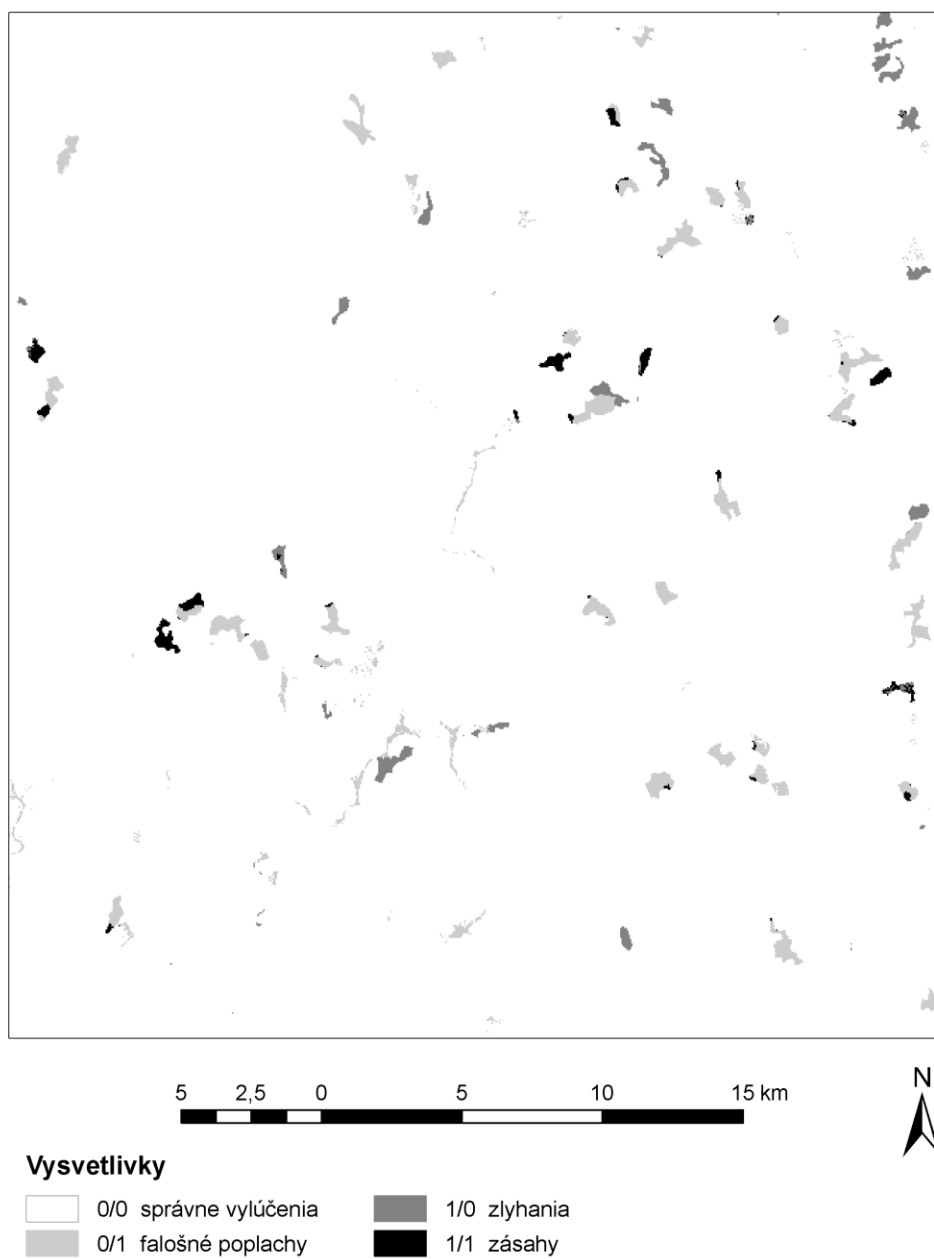
Z mapového vyjadrenia zmien sme zistili, že celkovo došlo k 17 rôznym prechodom (typom zmien) krajinnej pokrývky. Modelovanie všetkých typov zmien by bolo komplikované, časovo náročné a neefektívne, keďže často ide o minimálne plochy zmien. Preto sme na základe plošného filtra vybrali na modelovanie len zmeny s rozlohou nad 200 ha. Na obr. 3 môžeme vidieť, že toto kritérium splnilo 6 typov zmien, ktoré môžeme priradiť k 3 základným procesom prebiehajúcim v záujmovom území:

1. *intenzifikácia poľnohospodárstva* – zmena *poľnohospodárskej krajiny* na *nezavlažovanú ornú pôdu* (1 prechod),
2. *sukcesia (prirodzený proces zarastania)* – prechod *lúk a pasienkov* a *poľnohospodárskej krajiny* na *prechodné lesokroviny* a následne zmena *prechodných lesokrovín* na *listnaté lesy* a *zmiešané lesy* (spolu 4 prechody),
3. *výrub lesa* – zmena *listnatých lesov* na *prechodné lesokroviny* (1 prechod).

2.2 Modelovanie potenciálov zmien

Modelovanie potenciálov zmien je najzložitejšie z celého postupu modelovania a predikcie zmien. Pre implementáciu modelu sú dôležité dva aspekty – výber hnacích síl a kvantifikácia vzťahov medzi hnacími silami a zmenou krajinnej pokrývky. Každý modelovaný proces predstavuje submodel, ktorý je potrebné modelovať zvlášť. Jeden submodel môže zahŕňať jeden alebo viac typov zmien, ktoré sú spôsobené rovnakými hnacími silami. V našom prípade sme osobitne modelovali intenzifikáciu poľnohospodárstva, sukcesiu a výrub.

Pre každý submodel je potrebné otestovať silu (štatistickú významnosť) vysvetľujúcich premenných, ktoré vstupujú do modelovania. Prvým predpokladom bolo, že na všetky tri modelované procesy by mohli mať vplyv statické premenné: nadmorská výška, sklon georeliéfu, orientácia



Obr. 3 Raster krížovej klasifikácie (predpovedané zmeny/skutočné zmeny) vytvorený modelovaním sukcesie (variant vysvetľujúcich premenných č. 3)

georeliéfu voči svetovým stranám, vzdialenosť od ciest, vzdialenosť od miest a vzdialenosť od vodných plôch a tokov. Štatistická významnosť sa preukázala u všetkých premenných s výnimkou orientácie georeliéfu voči svetovým stranám, ktorú sme preto z modelovania vylúčili. Druhým predpokladom bolo, že na všetky tri modelované procesy by mohli mať vplyv dynamické premenné vzdialenosti od miest, kde konkrétny proces nastal (miesta sukcesie, výrubu a intenzifikácie poľnohospodárstva) a vzdialenosti od tried krajinej pokrývky, ktoré príslušný proces mení (pri sukcesii vzdialenosť od prechodných lesokrovín, vzdialenosť od poľnohospodárskej krajiny a vzdialenosť od lúk a pasienkov, pri intenzifikácii vzdialenosť od poľnohospodárskej krajiny, pri výrubu vzdialenosť od listnatých lesov). Posledným predpokladom bolo zahrnúť do procesu modelovania aj krajinnú pokrývku, ktorá je však kategorická premenná. Na jej premenu na kvantitatívnu premennú sa dá využiť nástroj Evidence Likelihood, ktorý vypočíta relatívnu frekvenciu, s ktorou sa jednotlivé triedy krajinej pokrývky vyskytovali na miestach zmeny. Osobitne sme takúto premennú vytvorili pre každý proces a u všetkých troch procesov dosiahli najvyššiu štatistickú významnosť spomedzi všetkých premenných. Ďalšie v poradí, podľa štatistickej významnosti, boli premenné vzdialenosti od areálov tried, na ktorých prebieha daný proces (pri sukcesii a intenzifikácii vzdialenosť od poľnohospodárskej krajiny, pri výrubu vzdialenosť od listnatých lesov). Ďalej nasledovali premenné vzdialenosť od miest, vzdialenosť od vodných plôch a tokov, nadmorská výška, vzdialenosť od ciest a sklon georeliéfu. Najnižšiu vysvetľujúcu silu nadobúdali premenné vzdialenosti od areálov, kde daná zmena nastala, z čoho môžeme vidieť, že pôsobenie všetkých troch procesov sa nekumuluje na špecifických miestach, ale je rozptýlené po celom území. Prehľad vysvetľujúcich premenných pre jednotlivé procesy sumarizuje tab. 1.

Tab. 1 Vysvetľujúce premenné použité pri modelovaní procesov sukcesie, výrubu a intenzifikácie poľnohospodárstva

vysvetľujúca premenná		proces		
		sukcesia	výrub	intenzifikácia
a	nadmorská výška	x	x	x
b	sklon georeliéfu	x	x	x
c	vzdialenosť od ciest	x	x	x
d	vzdialenosť od miest	x	x	x
e	vzdialenosť od vodných plôch a tokov	x	x	x
f	vzdialenosť od miest, kde nastala sukcesia	x	-	-
g	vzdialenosť od území, kde nastal výrub	-	x	-
h	vzdialenosť od území, kde nastala intenzifikácia	-	-	x
i	vzdialenosť od poľnohospodárskej krajiny	x	-	x
j	vzdialenosť od prechodných lesokrovín	x	-	-
k	vzdialenosť od lúk a pasienkov	x	-	-
l	vzdialenosť od listnatých lesov	-	x	-
m	krajinná pokrývka na miestach sukcesie	x	-	-
n	krajinná pokrývka na miestach výrubu	-	x	-
o	krajinná pokrývka na miestach intenzifikácie	-	-	x

Vysvetlivky:

- x – vysvetľujúca premenná bola použitá pri modelovaní procesu
- – vysvetľujúca premenná nebola použitá pri modelovaní procesu

Na samotné modelovanie prechodových potenciálov, na základe vysvetľujúcich premenných, sa v LCM využíva umelá neurónová sieť Multi-Layer Perceptron (MLP) pozostávajúca z vrstiev tvorených uzlami (neurónmi), ktoré sú navzájom poprepájané. Uzly vstupnej vrstvy predstavujú vysvetľujúce premenné, uzly výstupnej vrstvy vyjadrujú potenciálny rozsah modelovaných prechodov. Pri trénovaní siete sa počíta chyba RMS, ktorá v prípade úspešného učenia postupne klesá.

sá. Trénovanie sme testovali s rôznymi kombináciami vysvetľujúcich premenných a následne sme na modelovanie potenciálov vybrali kombináciu, pri ktorej bola dosiahnutá najvyššia presnosť. Vo všeobecnosti platilo, že so zvyšujúcim sa počtom premenných rástla aj správnosť tréningu. Výnimkou bol proces sukcesie, pri ktorom bola najvyššia správnosť dosiahnutá bez použitia premenných *vzdialenosti od ciest, sklonu georeliéfu a vzdialenosti od prechodných lesokrovín*. Tieto premenné mali zároveň aj relatívne malú vysvetľujúcu silu oproti ostatným.

2.3 Predikcia zmien

Výsledkom modelovania pomocou MLP boli rastre prechodových potenciálov pre každý typ zmeny (prechod), ktoré následne vstupovali do procesu predikcie. Predikcia zmien sa, takisto ako modelovanie potenciálov, vykonáva pre každý proces osobitne. Preto nie je možné získať výslednú mapu krajiny pokrývajúcej všetky predpovedané zmeny. Predpovede sme vykonávali na rok 2006, aby sa dala porovnať so skutočným stavom krajiny pokrývajúcej v danom časovom období, a tak overiť správnosť predpovede. Testovali sme tvrdý aj mäkký predikčný model, s použitím aj bez použitia dynamických premenných. Okrem toho sme využili aj možnosť zadať obmedzenie/motiváciu, ktoré môžu ovplyvniť zmeny krajiny v budúcnosti. V našom prípade bol obmedzený proces výrubu na území CHKO Východné Karpaty. Výsledky testovania rôznych variantov predikcie ukázali, že o niečo lepšie výsledky (maximálne o 1 %) boli pri validácii dosiahnuté predikciou s obmedzením oproti predikcii bez obmedzenia, mäkkou predikciou oproti tvrdej predikcii a predikciou s dynamickými premennými oproti predikcii bez dynamických premenných.

Predikcia zmien v LCM je založená na analýze Markovových reťazcov (Markov chain). Tento proces určuje stav systému na základe jeho predošlého stavu a pravdepodobnosti zmien, ktoré medzi nimi nastali. Nejde o jednoduchú lineárnu extrapoláciu, pretože intenzita potenciálnej zmeny sa mení v čase rôzne s cieľom dosiahnuť rovnovážny stav. Výsledkom tvrdej predikcie je mapa krajiny pokrývajúcej v roku predikcie, výsledkom mäkkej predikcie je mapa náchylnosti na zmenu (obr. 4).

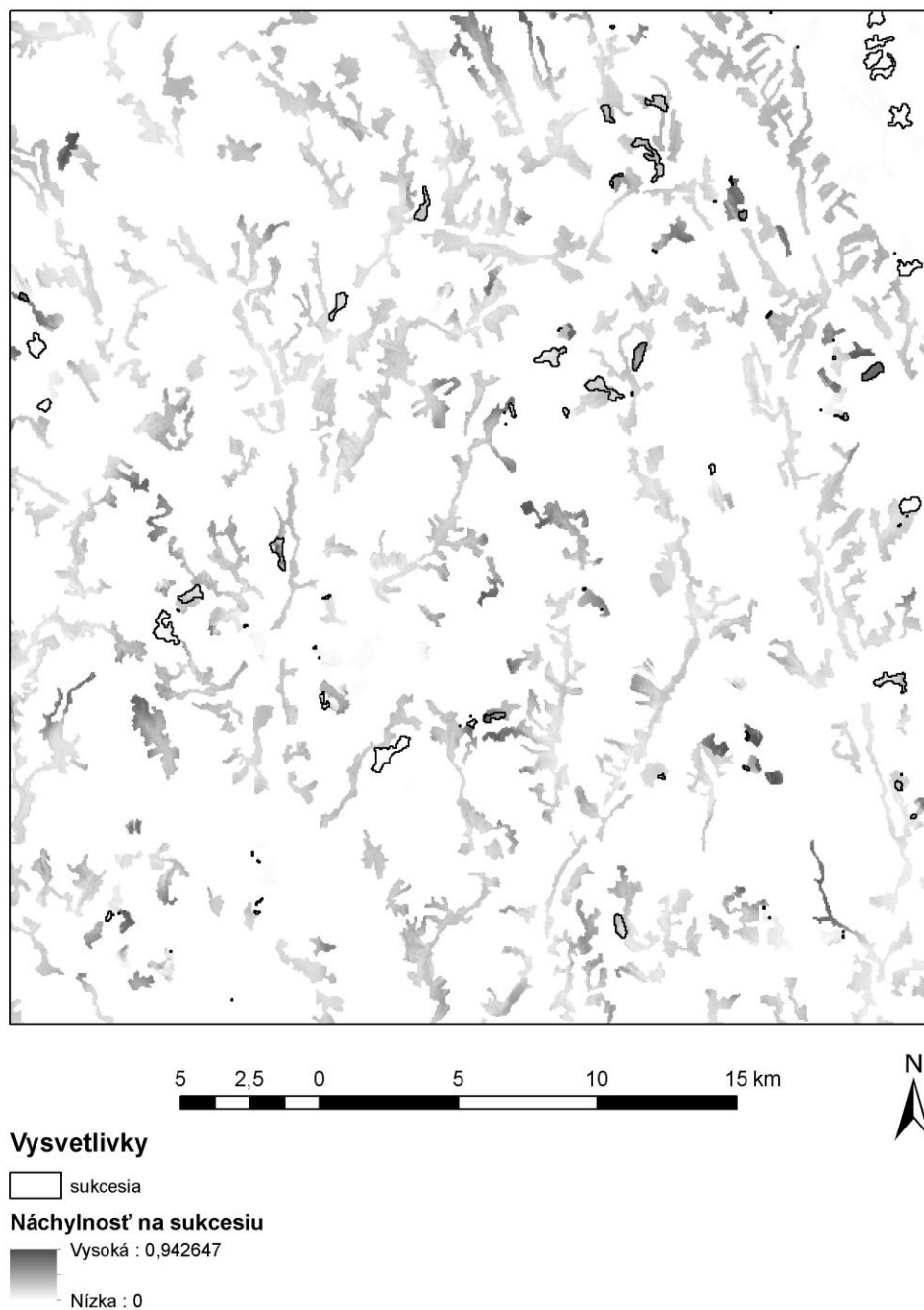
2.4 Validácia

Na validáciu predpovede sa v prostredí programu Idrisi Andes využívajú moduly VALIDATE, ROC a CROSSTAB. Od verzie Idrisi Taiga pribudol do LCM panel Validation, ktorý vykonáva krížovú klasifikáciu troch rastrov – rastra krajiny pokrývajúcej z neskoršieho dátumu, predpovedaného a skutočného rastra krajiny pokrývajúcej z roku predikcie.

Modul VALIDATE odpovedá na otázku, ako dobre súhlasí dvojica máp vzhľadom na množstvo a lokalizáciu buniek v každej triede krajiny pokrývajúcej. Na odpovedanie týchto otázok počíta modul niekoľko Kappa indexov a súvisiacich charakteristík. Podiel správne klasifikovaných buniek rastra k celkovému počtu buniek sa v module VALIDATE označuje $M(m)$. Je to najvšeobecnejšie používané meradlo zhodnosti medzi mapami, no aj napriek tomu nie je veľmi spoľahlivé, pretože veľká časť krajiny môže byť správne klasifikovaná iba náhodne. O zhode medzi mapami s vylúčením náhodnej zhody vypovedá Kappa index (KIA), ktorý je v module VALIDATE označený *Kstandard*. Zaujímavý je tiež index *Klocation*, ktorý vyjadruje zhodu v umiestnení buniek rastrov.

Nevýhodou modulu VALIDATE, aj panela Validation je, že porovnávajú celé rastre. V LCM sa dajú predpovedať len zmeny zapríčinené jedným procesom, kým skutočný raster krajiny pokrývajúcej je vo väčšine prípadov výsledkom viacerých procesov spolupôsobiacich v krajine. Ak nechceme porovnávať celé rastre, ale iba špecifické typy zmien (napr. tie, ktoré vznikli sukcesiou), je potrebné vytvoriť binárne rastre skutočných a predpovedaných zmien a porovnať ich v module CROSSTAB. CROSSTAB porovnáva dva rastre obsahujúce kategorické premenné pomocou tabuľkového triedenia a krížovej klasifikácie, pričom sa počíta index Kappa zhody a graficky sú znázornené zásahy (1/1 – správne predpovede zmeny), falošné poplachy (1/0 – zmena bola predpovedaná, ale nenastala), zlyhania (0/1 – zmena nastala, ale nebola predpovedaná) a správne vylúčenia (0/0 – zmena nebola predpovedaná a ani nenastala).

Výsledky mäkkej predikcie môžeme zhodnotiť pomocou ROC (Relative Operating Characteristics) štatistiky v module ROC. ROC porovnáva raster pravdepodobnosti výskytu a binárny raster, ktorý ukazuje skutočnú lokalizáciu danej triedy. Pri ROC analýze sa graficky znázorňuje podiel skutočných a falošných pozitív v podobe krivky. ROC hodnota v rozmedzí 0 až 1 potom predstavuje plochu pod touto krivkou. Vysoká hodnota ROC značí vysokú zhodu a presnú predpoveď.



Obr. 4 Náchylnosť na sukcesiu (mākkā predikcia) a areály, na ktorých skutočne došlo k sukcesii v rokoch 2000 až 2006

3. Výsledky a diskusia

Výsledky validácie predpovede pre všetky tri modelované procesy sú znázornené v tab. 2. Vybrané sú varianty modelov so všetkými vysvetľujúcimi premennými a tie, ktoré dosiahli najlepšie výsledky pri validácii. Pri sukcesii to bol variant č. 3 (modul CROSSTAB) a variant č. 6 (moduly VALIDATE a ROC), pri výrube variant č. 2 a pri intenzifikácii poľnohospodárstva variant č. 3. Pri porovnaní celých rastrov modulom VALIDATE môžeme vidieť, že výsledky predikcie, s použitím rôznych variantov vysvetľujúcich premenných, sa od seba odlišujú len minimálne (rozdiel bol maximálne 1 %). Kappa indexy dosahujú pomerne vysoké hodnoty (nad 0,8), čo je ale spôsobené najmä tým, že na väčšine územia nedošlo k zmenám a ani neboli predpovedané (Šošovičková 2010).

Tab. 2 Výsledky validácie predpovede modulmi VALIDATE, ROC a CROSSTAB

por.	vysvetľujúce premenné	VALIDATE			ROC	CROSSTAB				
č.		M(m)	Klocation	Kstandard		Kappa	0/0	0/1	1/0	1/1
sukcesia										
3	m,i,d,e,k,a,c,b	0.865	0.853	0.804	0.824	0.195	97.72%	0.46%	1.57%	0.26%
5	m,i,d,e,k,a,c,b,j,f	0.866	0.853	0.806	0.803	0.143	97.89%	0.54%	1.40%	0.17%
6	m,i,d,e,k,a,f	0.867	0.855	0.807	0.863	0.082	86.63%	0.05%	12.66%	0.66%
výrub										
2	n,l,d,e,a	0.871	0.875	0.815	0.864	0.079	98.95%	0.40%	0.60%	0.05%
4	n,l,d,e,a,b,g	0.870	0.873	0.813	0.810	0.044	98.93%	0.42%	0.62%	0.03%
intenzifikácia										
3	o,i,d,e,a	0.876	0.874	0.821	0.922	0.022	97.94%	1.94%	0.09%	0.03%
4	o,i,d,e,a,b,h	0.876	0.873	0.821	0.918	0.017	97.94%	1.95%	0.09%	0.02%

Väčšie rozdiely medzi jednotlivými procesmi a variantmi vysvetľujúcich premenných môžeme vidieť pri module CROSSTAB, ktorý hodnotí iba oblasti zmeny. Pri sukcesii dosiahol najväčší počet zásahov variant č. 6 (0,66 %), pri ktorom bol však zároveň vysoký počet falošných poplachov (takmer 13 %). Najvyšší celkový Kappa index (0,195), a teda aj najsprávnejšiu predpoveď zmien, sme zaznamenali pri variante č. 3, ktorý mal zásahov o niečo menej (0,26 %).

Raster krížovej klasifikácie tohto variantu znázorňuje obr. 3. Vidíme, že zásahov je pomerne málo, prevládajú zlyhania, a najmä falošné poplachy. Keď však porovnáme mäkkú predpoveď (náchylnosť na sukcesiu) so skutočnosťou (obr. 4), zistíme, že na väčšine zmenených území model predpovedal sukcesiu, avšak s nižšou hodnotou náchylnosti, ktorá sa nepremietla do tvrdého modelu. Pomerne vysokú správnosť mäkkej predpovede potvrdzuje aj vysoká hodnota ROC (0,82).

Bližšou analýzou máp zmien sme zistili, že správne boli predpovedané najmä zmeny z prechodných lesokrovín na listnaté lesy, medzi ktorými však bolo aj mnoho falošných poplachov. Súvisí to s tým, že trieda prechodných lesokrovín zahŕňa jednak mladinu, ktorá v priebehu 6 rokov môže dorásť na dospelý les, ako aj rúbaniská, ktoré po prirodzenom alebo umelom zalesnení potrebujú dlhší čas, aby sa zmenili na les. Detailnejšia klasifikácia krajinnej pokrývky by, teda v tomto prípade, pomohla vyššej správnosti predpovede.

Medzi zlyhaniami prevažovali zmeny z poľnohospodárskej krajiny alebo lúk a pasienkov na prechodné lesokroviny. Tento proces je ťažké predpovedať, pretože jeho lokalizácia závisí najmä od rozhodnutí vlastníkov poľnohospodárskej pôdy, ktorí sa rozhodnú pôdu ďalej nevyužívať a nechajú ju postupne zarastať.

To isté sa týka aj procesov výrubu a intenzifikácie poľnohospodárstva, ktorých lokalizácia takisto závisí predovšetkým od rozhodnutia človeka. Pri týchto procesoch taktiež prevažovali falošné poplachy a zlyhania nad zásahmi, a celková správnosť predpovede bola nízka (Kappa index pri výrube len 0,08; pri intenzifikácii 0,2). Celkovo platilo, že proces sukcesie sa vyskytoval v oveľa

väčšej miere v období rokov 1990 až 2000, než v neskoršom období, pre ktoré bola robená predikcia. Rozloha sukcesie klesla približne 5-násobne (z 4506 ha na 865 ha), naopak intenzifikácia poľnohospodárstva 10-násobne stúpila (z 235 ha v rokoch 1990 až 2000 na 2383 ha v rokoch 2000 až 2006).

Môžeme konštatovať, že trendy vývoja sa v období predikcie zmenili, čo súvisí najmä so vstupom Slovenskej republiky do Európskej únie (EÚ) v roku 2004. Po politickej a sociálno-ekonomickej transformácii spoločnosti v 90-tych rokoch dochádzalo na mnohých územiach k opúšťaniu poľnohospodárskej pôdy, na ktorej hospodárenie nebolo v trhových podmienkach viac rentabilné. Radikálny zlom v dotačnej politike nastal na prelome rokov 1991 a 1992, kedy poklesli dotácie na úroveň 42 % oproti roku 1989. V nasledujúcom období prevládal v agrárnom sektore negatívny vývoj, keď sa prehlbovala strata a klesal počet ziskových poľnohospodárskych subjektov. V roku 1995 bolo hospodárenie so ziskom zaznamenané iba v 45 % podnikov (Kotulič 2010). Dôsledkom tohto vývoja bolo opúšťanie poľnohospodárskej pôdy a jej zarastanie náletovými drevinami (proces sukcesie).

Podľa analýzy zmien krajiny pokrývky Slovenska v rokoch 1990 až 2000 (Feranec a Ořahel 2008) predstavovalo zarastanie lúk a pasienkov krovinami štvrtý plošne najvýznamnejší proces po výrube, zalesnení a premene *nezavlažovanej ornej pôdy* na *mozaiku polí, lúk a trvalých kultúr*. Tento trend pokračoval v rámci Slovenska aj v rokoch 2000 až 2006 (Feranec a Nováček 2009), avšak v záujmovom území už bol oveľa menej výrazný. Naproti tomu sa tu veľmi výrazne prejavil iný trend, ktorý súvisí so vstupom Slovenska do EÚ a zvýšenými dotáciami do poľnohospodárstva. Vo vybraných produkčných regiónoch dochádza k intenzifikácii poľnohospodárstva, a s tým súvisiacej zmene *poľnohospodárskej krajiny a lúk a pasienkov na nezavlažovanú ornú pôdu*.

Z výsledkov môžeme vidieť, že validácia modelov zmien je veľmi dôležitá. Pritom z literatúry vyplýva, že len malé množstvo LUC modelov bolo validovaných na základe časových údajov a mnohé modely neboli validované vôbec (Verburg et al. 2004).

Záver

Cieľom príspevku bolo testovanie nástroja LCM na modelovanie a predikciu zmien krajiny s reálnymi údajmi z územia Slovenska. Ako podkladové údaje o krajine pokrývke sme použili vrstvy vytvorené v rámci projektu CLC z rokov 1990, 2000 a 2006 z územia severovýchodného Slovenska. Potvrdilo sa, že prostredie LCM je vhodné najmä pre aplikácie vyžadujúce rýchlu a názornú analýzu zmien krajiny. Ponúka rozmanité výsledky vo forme máp a grafov, nevýhodou pri analýze zmien je absencia kontingenčnej tabuľky (Stanková 2010). Výhodou je, naopak, možnosť filtrácie zmien v mapových výstupoch na základe rozlohy, čo nám umožňuje identifikovať najdôležitejšie zmeny, a tým pádom aj procesy prebiehajúce v území.

Modelovanie zmien je zložitejší proces, pri ktorom treba na základe expertných poznatkov vybrať vysvetľujúce premenné, ktoré by mohli mať súvislosť so zmenami, štatisticky zhodnotiť ich vysvetľujúcu silu, a na základe toho navrhnúť model, podľa ktorého sa umelá neurónová sieť „naučí“ predpovedať potenciál zmien. Tento proces funguje veľmi dobre, správnosť učenia dosahovala pri všetkých procesoch nad 90 %. To však ešte nič nehovorí o správnosti predpovede zmien, ktorá sa hodnotí prostredníctvom špeciálnych modulov na validáciu, pričom je potrebné mať k dispozícii mapy skutočnej krajiny pokrývky minimálne z troch časových horizontov.

Zmeny sú často nelineárne a dôležitú úlohu hrajú prahy. Nelineárne správanie vyžaduje dynamické modelovanie s relatívne krátkymi časovými krokmi, aké je implementované aj v LCM. Limitujúcim faktorom je to, že vstupom do modelu môžu byť len dva časové horizonty. Zmeny krajiny sú predpovedané na základe jej vývoja v minulosti, preto pri zmene trendov predpoved' zlyháva. Pri modelovaní a predikcii procesov sukcesie, výrubu a intenzifikácie poľnohospodárstva v záujmovom území sa ukázalo, že dva z troch procesov si nezachovali svoj trend z minulosti. Kým rozloha sukcesie v rokoch 2000 až 2006 značne poklesla oproti rozlohe v rokoch 1990 až 2000, pri intenzifikácii poľnohospodárstva tomu bolo naopak. Uvedené zmeny trendov súvisia najmä so vstupom Slovenska do EÚ a odlišnou poľnohospodárskou politikou. Pri procese výrubu síce nedošlo k významnej zmene trendu, tento proces je však ťažké lokalizovať, pretože závisí najmä od ľudského faktora. Bez prídavných informácií, ako sú napr. lesné hospodárske plány, ho nie je možné presne predpovedať. To isté platí aj pre proces intenzifikácie poľnohospodárstva a čiastočne aj pre sukcesiu (zarastanie poľnohospodárskych pozemkov krovinami).

Vo všeobecnosti vidíme využitie nástroja LCM v podmienkach Slovenska v dvoch rovinách. Nástroj je dobre využiteľný pri modelovaní prírodných procesov, ako napr. sukcesia, za predpokladu dostatočne detailných vstupných údajov o krajinnej pokrývke, ako aj o ďalších zložkách prírodnej krajiny. Naopak, pri predpovedaní procesov ovplyvnených do veľkej miery človekom, ako je napr. výrub/zalesnenie, intenzifikácia/extenzifikácia poľnohospodárstva alebo urbanizácia, nie je koncept modelovania na základe pokračujúcich trendov veľmi vhodný. Aby sme dosiahli akceptovateľné výsledky, buď by nesmeli v sledovanom období dôjsť k zmene trendu (napr. k zmene politickej alebo ekonomickej situácie), alebo by bolo nutné použiť detailné prídavné informácie, ktoré mnohokrát nie sú k dispozícii. Preto využitie nástroja LCM v súčasnosti vidíme skôr v modelovaní rôznych scenárov vývoja krajiny pri zmenených vstupných podmienkach alebo pri skúmaní trendov zmien. V budúcnosti by sme chceli pokračovať v analýze a modelovaní zmien krajinnej pokrývky záujmového územia na základe novej vrstvy CLC 2012 a overiť, či sa trend vývoja z rokov 2000 až 2006 zachoval alebo zmenil.

Práca vznikla na základe podpory udelenej Agentúrou na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu APVV-0326-11.

Literatúra

- BOLTIŽIAR, M. (2007). *Štruktúra vysokohorskej krajiny Tatier*. Nitra (Univerzita Konštantína Filozofa v Nitre), 248 s.
- CEBECAUEROVÁ, M., CEBECAUER, T. (2005). Špecifické vizualizácie zmien krajinnej pokrývky ako nástroj poznávania zmien krajiny. *Kartografické listy*, 13, s. 34-42.
- ČERNÁNSKÝ, J., KOŽUCH, M., STANKOVÁ, H. (2003). Sledovanie a hodnotenie zmien vysokohorskej krajiny s využitím ortofotomáp. In *Geoinformatizácia kartografie: Zborník z 15.kartografickej konferencie s medzinárodnou účasťou 4.-5.9.2003 vo Zvolene*, Zvolen (Technická univerzita vo Zvolene), s. 93-100.
- FALŤAN, 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, s.156-171.
- FERANEC, J., ŠŮRI, M., CEBECAUER, T., OŤAHEL, J. (2000). Mapy zmien krajiny Česka, Maďarska, Rumunska a Slovenska. *Kartografické listy*, 8, s. 45-50.
- FERANEC, J., OŤAHEL, J. (2010). *Krajinná pokrývka Slovenska*. Bratislava (Veda), 124 s.
- FERANEC, J., ŠŮRI, M., CEBECAUER, T., OŤAHEL, J. (2002). Methodological aspects of landscape changes detection and analysis in Slovakia applying the CORINE Land Cover databases. *Geografický časopis*, 54, 3, s. 271-288.
- FERANEC, J., OŤAHEL, J. (2008). Land Cover Changes in Slovakia in the Period 1970-2000. *Geografický časopis*, 60, 2, s. 113-128.
- FERANEC, J., NOVÁČEK, J. (2009). The CORINE Land Cover database of Slovakia and its changes in the period 2000-2006. *Moravian Geographical Reports*, 17, 3, pp. 2-9.
- KOOMEN, E., STILLWELL, J., BAKEMA, A., SCHOLTEN, H. J. eds. (2007). *Modelling Land-Use Change: Progress and Applications*. Springer, 392 p.
- KOPECKÁ, M. (2006). Identifikácia a hodnotenie zmien krajiny vo veľkej mierke (na príklade okolia Trnavy). *Geografický časopis*, 58, 2, s. 125-148.
- KOPECKÁ, M., NOVÁČEK, J. (2008). Hodnotenie fragmentácie krajinnej pokrývky na báze dátových vrstiev CORINE Land Cover. *Geografický časopis*, 60, 1, s. 31-44.
- KOTULIČ, R. (2010). Vybrané aspekty pri posudzovaní prosperity a efektívnosti podnikateľských činností v manažmente poľnohospodárskych podnikov. In *Analýza základných ekonomických faktorov a ich využitie pri reštrukturalizácii poľnohospodárstva a zabezpečení trvalo udržateľného rozvoja Slovenska* (Zborník vedeckých prác z vedeckého seminára 16.11.2010 v Prešove), Prešov (Prešovská univerzita v Prešove), s. 57-75.
- LAMBIN, E., GEIST, H. J. (2007). Causes of land-use and land-cover change. *Encyclopedia of Earth*. [online] [cit. 2012-07-24]. Dostupné na: <http://www.eoearth.org/article/Causes_of_land-use_and_land-cover_change>

- MIČIETOVÁ, E., KOŽUCH, M. eds. (2008). *Špecializované informačné technológie v prírodovednom výskume: Geoinformačné technológie*. Bratislava (Elita), 145 s.
- OŤAHEL, J., FERANEC, J., CEBECAUER, T., PRAVDA, J., HUSÁR, K. (2004). The landscape structure of the district of Skalica: assessment of changes, diversity and stability. *Geographia Slovaca*, 19, 74 s.
- OŤAHEL, J., HUSÁR, K., FERANEC, J. (2011). Zmeny krajiny: analýza a kartografická interpretácia na príklade regiónu Tatry. *Kartografické listy*, 19, s. 113-123.
- PAZÚR, R., OŤAHEL, J., HURBÁNEK, P. (2010). Analýza štruktúry krajiny pokrývky na príklade vybraných typov prírodnej krajiny. *Kartografické listy*, 18, s. 87-95.
- STANKOVÁ, H. (2010). Modelovanie zmien krajiny pomocou nástroja Land Change Modeler. In Feranec, J., Fencík, R. eds. *Aktivita v kartografii*, s. 103-112.
- ŠOŠOVIČKOVÁ, L. (2010). *Modelovanie zmien krajiny s využitím údajov CORINE Land Cover*. Diplomová práca. Bratislava (Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského v Bratislave), 86 s.
- VERBURG, P., SHOT, P., DIJST, M., VELDKAMP, A. (2004). Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal*, 61 (4), pp. 309-324.

S u m m a r y

Landscape change modelling and prediction using CORINE Land Cover data: case study from north-east Slovakia

Land use (LU) and land cover (LC) change analysis belongs to most important tasks in the geographical applications. Recent inventories of operational models for LU and LC change are numerous. The Land Change Modeler (LCM) for Ecological Sustainability is a software tool integrated within the IDRISI system and also available as an extension to ESRI's ArcGIS. LCM represents the strong and fast tool for land change modelling and prediction. As one of the few LU and LC models, LCM provides also the model validation.

The aim of our study was to model and predict the changes in LC in the northeastern Slovakia using LCM with CORINE Land Cover (CLC) data from years 1990, 2000 and 2006. Between 1990 and 2000, there were three main processes in studied area: plant succession, deforestation and intensification of agriculture. We predicted these processes into year 2006 and the results we compared with the actual LC from year 2006. Various static and dynamic variables were included in the model, i.e. altitude, slope, distance from the water, distance from the roads, distance from the settlement, LC in the areas of change, distance from the areas of change or distance from the specific LC classes.

Predicted LC was compared with the real one using cross-tabulation, cross-classification and ROC (Relative Operating Characteristics) statistic. Comparing the whole LC layers, accuracy is relatively high (Kappa index higher than 0,8) due to the large areas without change. Comparing only the areas of change, accuracy is low (Kappa index lower than 0,2), mainly due to the changes in nature of land development after Slovakia's accession to the EU. The change of agriculture policy caused an increase of agriculture intensification and conversely a decrease of plant succession on the abandoned land. Other problems are related with the processes located in the areas selected mainly by a human decision (i.e. deforestation), which is very difficult to predict without any additional information.

Therefore the critical disadvantage of LCM approach is the change prediction based on the previous development. In this manner, we could predict ongoing processes, but the completely new changes caused by political, economical or other human decisions are unpredictable with LCM and most other models too. In Slovakia, we can model the various development scenarios with LCM and analyze the affect of various input conditions on the future land development.

Fig. 1 Map of the studied area

Fig. 2 Gains and losses in the studied area between 1990 and 2000: a) gains and losses in hectares, b) proportion of gains and losses on the class area in %

Fig. 3 Cross-classification image (predicted change/actual change) of plant succession (variant of explanatory variables no. 3)

Fig. 4 Susceptibility to succession (soft prediction) and areas of the actual changes between 2000 and 2006

Tab. 1 Explanatory variables used in modelling of plant succession, deforestation and intensification of agriculture

Tab. 2 The results of validation with VALIDATE, ROC and CROSSTAB module