

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Petr Šístek

VALIDACE GLOBÁLNÍCH DATABÁZÍ ZMĚN LESNÍCH PLOCH

**VALIDATION OF GLOBAL FOREST CHANGE DETECTION
DATABASES**

Diplomová práce

Praha 2017

Vedoucí práce: RNDr. Přemysl Štych, PhD.

Prohlášení o autorství

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Jsem si vědom toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity. Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 31. července 2017

.....

Petr Šístek

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval RNDr. Přemyslu Štychovi, PhD. za příkladné vedení mé diplomové práce, jeho cenné rady a připomínky. Také bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za bezmeznou podporu během celého studia.

Abstrakt

Hlavním cílem práce je validace vybraných databází změn lesních ploch založených na analýze časových řad družicových snímků na území České republiky. K tomu byly využity databáze M. C. Hansena a P. V. Potapova, které mapují vývoj lesních ploch v nadnárodním měřítku. Za účelem validace byla navržena metodika, jejíž stěžejní součástí je využití historických ortofotosnímků z období let 2000–2012, které rovněž zachycují ověřované databáze. Získané výsledky byly statisticky zpracovány, což umožnilo zhodnocení přesnosti validovaných databází. V závěru práce jsou diskutovány příčiny zjištěných nepřesností a předkládána doporučení k budoucímu zdokonalení detekce změn lesních ploch.

Klíčová slova: validace, les, land cover, change detection, Hansen, Potapov

Abstract

The main aim of the thesis is to validate selected databases of changes in forest areas based on the analysis of satellite imagery time series in the Czech Republic. For this purpose we are using databases of M. C. Hansen and P. V. Potapov which are mapping the evolution of forest areas internationally. For the purposes of validation, we have proposed a methodology primarily based on historical orthophotographs from 2000–2012, the same time period which is documented in the validated databases. The results obtained were statistically processed, allowing to assess the accuracy of validated databases. At the end of the thesis, we are discussing the causes of identified inaccuracies and presented with recommendations for future improvements of detection of changes in forest areas.

Keywords: validation, forest, land cover, change detection, Hansen, Potapov

OBSAH

Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	8
1 Úvod.....	9
2 Úvod do problematiky.....	11
2. 1. Historie mapování změn krajinného pokryvu	11
2. 2. Definice lesa.....	12
2. 2. 1. Vybrané definice lesa.....	12
2. 2. 2. Typologie lesa.....	14
2. 3. Validace krajinného pokryvu.....	15
3 Data a metodika	17
3. 1. Použitá data	17
3. 1. 1. Databáze Hansena – Global Forest Change 2000–2014	17
3. 1. 2. Databáze Potapova – Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive	20
3. 1. 3. Validace dat	23
3. 1. 3. 1. Validace databáze Hansena	24
3. 1. 3. 2. Validace databáze Potapova.....	25
3. 2. Metodika.....	26
3. 2. 1. Předzpracování vstupních dat.....	26
3. 2. 2. 1. Tvorba validačních oblastí, generace ověřovacích bodů	28
3. 2. 2. 2. Archivní ortofotosnímky ČÚZK	29
3. 2. 2. 3. Určení lesa při validaci	29
3. 2. 2. 4. Princip validace ověřovaného bodu, kódování zjištěných výsledků ...	31
3. 2. 2. 4. 1. Vysvětlení atributů výsledné databáze.....	31
4 Výsledky.....	34
4. 1. Souhrnné výsledky	34
4. 2. Statistické zpracování výsledků v jednotlivých oblastech.....	36
4. 2. 1. Oblast, v níž detekovali změnu Hansen i Potapov.....	36

4. 2. 2. Oblast, v níž detekoval změnu pouze Hansen	37
4. 2. 3. Oblast, v níž detekoval změnu pouze Potapov.....	38
4. 2. 4. Oblast, v níž Hansen ani Potapov nedetekovali žádnou změnu	39
4. 3. Statistické zpracování výsledků z pohledu detekovaných změn	40
4. 3. 1. Hansen – detekce přírůstku	40
4. 3. 2. Potapov – detekce přírůstku	41
4. 3. 3. Hansen – detekce úbytku.....	41
4. 3. 4. Potapov – detekce úbytku.....	42
4. 3. 5. Hansen – oblasti bez detekovaných změn	42
4. 3. 6. Potapov – oblasti bez detekovaných změn	43
4. 3. 7. Oblasti s překryvem detekovaného přírůstku a úbytku	43
4. 4. Srovnání výsledků Hansena a Potapova	46
5 Diskuze	49
5. 1. Ilustrace frekventovaných případů chybné detekce změn.....	50
5. 1. 1. Záměna lesa a zemědělských ploch	50
5. 1. 2. Záměna lesa a vodních ploch	51
5. 2. Ilustrace ojedinělých případů chybné detekce změn.....	52
5. 2. 1. Záměna lesa a povrchového dolu	52
5. 2. 2. Chybná interpretace revitalizace povrchového dolu	53
5. 2. 3. Chybná interpretace vzniku vodní plochy	53
5. 2. 4. Záměna lesa a přehradní hráze	54
6 Závěr.....	55
Seznam literatury a zdrojů.....	56
Seznam příloh	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Časové řady zpracování snímků Landsat.....	21
Obrázek 2: Ověřovací bod ID 3328 – rok 2000.....	50
Obrázek 3: Ověřovací bod ID 3328 – rok 2012.....	50
Obrázek 4: Ověřovací bod ID 3306 – rok 2000.....	51
Obrázek 5: Ověřovací bod ID 3306 – rok 2012.....	51
Obrázek 6: Ověřovací bod ID 2835 – rok 2000.....	51
Obrázek 7: Ověřovací bod ID 2835 – rok 2012.....	51
Obrázek 8: Ověřovací bod ID 3212 – rok 2000.....	52
Obrázek 9: Ověřovací bod ID 3212 – rok 2012.....	52
Obrázek 10: Ověřovací bod ID 2965 – rok 2000.....	53
Obrázek 11: Ověřovací bod ID 2965 – rok 2012.....	53
Obrázek 12: Ověřovací bod ID 1284 – rok 2000.....	53
Obrázek 13: Ověřovací bod ID 1284 – rok 2012.....	53
Obrázek 14: Ověřovací bod ID 3131 – rok 2000.....	54
Obrázek 15: Ověřovací bod ID 3131 – rok 2012.....	54

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Atributy validační databáze.....	31
Tabulka 2: Validační třídy Hansena.....	32
Tabulka 3: Validační třídy Potapova.....	32
Tabulka 4: Souhrnné výsledky validace Hansenovy databáze.....	35
Tabulka 5: Souhrnné výsledky validace Potapovovy databáze.....	35
Tabulka 6: Výsledky validace Hansena – oblast s detekcí změny Hansenem i Potapovem.....	36
Tabulka 7: Výsledky validace Potapova – oblast s detekcí změny Hansenem i Potapovem.....	36
Tabulka 8: Výsledky validace Hansena – oblast s detekcí změny Hansenem.....	37
Tabulka 9: Výsledky validace Potapova – oblast s detekcí změny Hansenem.....	37
Tabulka 10: Výsledky validace Hansena – oblast s detekcí změny Potapovem.....	38
Tabulka 11: Výsledky validace Potapova – oblast s detekcí změny Potapovem.....	38
Tabulka 12: Výsledky Hansena a Potapova – oblast bez detekovaných změn.....	39
Tabulka 13: Výsledky validace Hansena – pixely s detekovaným přírůstkem.....	40
Tabulka 14: Výsledky validace Potapova – pixely s detekovaným přírůstkem.....	41
Tabulka 15: Výsledky validace Hansena – pixely s detekovaným úbytkem.....	41
Tabulka 16: Výsledky validace Potapova – pixely s detekovaným úbytkem.....	42
Tabulka 17: Výsledky validace Hansena – pixely bez detekované změny.....	42
Tabulka 18: Výsledky validace Potapova – pixely bez detekované změny.....	43
Tabulka 19: Výsledek validace Hansena – překryv detekovaného přírůstku a úbytku....	43
Tabulka 20: Výsledek validace Potapova – překryv detekovaného přírůstku a úbytku...43	
Tabulka 21: Srovnání výsledků Hansena a Potapova.....	47

KAPITOLA 1

Úvod

Lesní porosty jsou přirozenou součástí krajinného pokryvu Země a zjišťování dlouhodobých změn jejich rozlohy jsou vysoce aktuální problematikou současnosti. Pokud se ovšem o mapování změn lesních ploch snažíme ve vyšších hierarchických úrovních, přináší to s sebou jistá úskalí. Těmi jsou zejména různé typy i definice lesa, které se v jednotlivých regionech mnohdy velmi významně liší. S tím je spjata obtížnost volby vhodné jednotné metodiky, která by umožnila správnou detekci změn lesního pokryvu v celém sledovaném území.

Problematicke zjišťování změn lesních ploch prostřednictvím časových řad družicových snímků se v celosvětovém měřítku věnuje spousta výzkumných týmů (např. Hansen, 2013; Potapov, 2015; Desclée, 2006; Collins 1996; Coppin 1996). Za stěžejní dílo lze považovat výzkum M. C. Hansena a kol., jehož zásadním dosavadním výstupem jsou globální mapy změn lesního pokryvu v 21. století (Hansen, 2013). Na Hansenovu práci navázal P. V. Potapov, jenž s využitím archivu Landsat zmapoval vývoj lesního pokryvu východní Evropy v letech 1985–2012 (Potapov, 2015). Sami autoři těchto velmi přínosných databází ovšem připouští, že validace jejich výsledků by mohla výrazně přispět ke zdokonalení zvolené metodiky a ke zpřesnění výsledků budoucích výzkumů. Právě možnost vlastního přispění k natolik komplexnímu výzkumu, jakým detekce změn lesních ploch na nadnárodní úrovni je, shledávám jako velmi motivační.

Cílem této práce tedy bude validace databází změn lesních ploch dle Hansena a Potapova na území České republiky v období let 2000–2012. K tomu bude využito archivních ortofotosnímků, které stejně jako družicové snímky zachycují reálný stav krajiny (land cover) ve sledovaném období.

V úvodu práce je věnován prostor rešerši odborné literatury, jejímž cílem je zmapování dosavadních výzkumů týkajících se řešené problematiky. Taktéž zde dochází k seznámení se s v současnosti užívanými definicemi a typy lesa. Právě stanovení definice lesa má zásadní vliv na výsledky výzkumu a lze konstatovat, že aplikované definice Hansenem a Potapovem jsou ve srovnání s celosvětově uznávanými definicemi lesa značně zjednodušené. Z této skutečnosti vychází i vstupní hypotéza práce, jež předpokládá, že zjednodušené definice lesa užívané Hansenem a Potapovem mají zásadní vliv na přesnost detekce změn lesních ploch.

Třetí kapitola je věnována popisu vstupních dat validace a seznámení s navrženou metodikou. Náplní čtvrté kapitoly je prezentace získaných výsledků, které jsou pomocí zavedených statistických metod vyhodnoceny, což umožňuje srovnání přesnosti ověřovaných databází. Validace by rovněž měla vést ke zjištění příčin případných chyb, které jsou v závěrečných kapitolách diskutovány. Na základě interpretace zjištěných nepřesností validovaných databází by následně měla být vyvozena doporučení pro další zdokonalení metod detekce změn lesního pokryvu.

KAPITOLA 2

Úvod do problematiky

2. 1. Historie mapování změn krajinného pokryvu

První snahy o distanční mapování krajinného pokryvu Země jsou spjaty již s lety balónem v 19. století. Významným zjednodušením tohoto procesu byl rozvoj letectví a fotogrammetrie v první polovině století dvacátého, ale zásadní zlom přišel až s rozvojem dálkového průzkumu Země, jenž se datuje od konce 60. let 20. století. Nově vyslané satelity na oběžnou dráhu Země umožnily získávat snímky naší planety z řádově větší vzdálenosti, než tomu bylo doposud. Zásadním usnadněním zpracování těchto snímků přinesl rozvoj geografických informačních systémů, jejichž využití pro klasifikaci krajinného využití jako první souborně rozebrali C. P. Lo a R. L. Shipman (1990).

Spolu se stále se zvyšujícím objemem dat krajinného pokryvu Země i z různých časových období přirozeně docházelo ke snahám o vyhodnocení změn a analýzu vývoje krajinného pokryvu. Od počátku 90. let došlo k rozvoji metodiky těchto výzkumů, které jsou mnohdy velmi odlišné, a Lu a kol. (2004) je popisuje v článku Change detection techniques.

Postupem času nezůstalo jen u analýz změn krajinného pokryvu v konkrétních regionech, ale objevily se i snahy o mapování změn v nadnárodním či globálním měřítku. V tomto případě ovšem nemusí být vždy předmětem analýzy všechny typy krajinného pokryvu. Populárním tématem moderní doby je zejména hodnocení vývoje lesních ploch, kterému se věnuje i tato práce.

2. 2. Definice lesa

Hlavním problémem hodnocení změn plochy lesních porostů ve větších měřítcích je zejména rozdílná definice lesa v různých oblastech světa. Dle Lunda (2008), je ve světě aplikováno více než 800 různých definicí lesa. Na mezinárodní úrovni je používáno několik definic lesních ploch, které stanovily organizace fungující pod záštitou OSN, a budou detailně rozvedeny dále. I v těchto definicích jsou ale patrné velké rozdíly.

2. 2. 1. Vybrané definice lesa

United Nations Environment Programme (UNEP)

UNEP definuje rozdíl mezi souvislým a otevřeným lesem. Za souvislý les je považována plocha pokrytá korunami stromu z více než 40 %. Oproti tomu otevřený les musí dosahovat pouze 10–40% korunního pokryvu (UNEP, 2009). V rámci Úmluvy o biologické rozmanitosti (CBD) UNEP definovala les rovněž jako plochy větší než 0,5 ha s pokryvem korunami stromů vyšším než 10 %, která primárně neslouží k zemědělskému nebo jinému než lesnímu využití. V případech mladého lesa nebo v regionech, v nichž je výška stromu klimaticky potlačena, musí mít stromy potenciál dosáhnout minimální výšky 5 m a požadovaného korunního pokryvu (USDA, 2010).

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

FAO používá definici velmi podobnou UNEP, kdy za les označuje plochy s minimální výškou stromu 5 m, minimálním 10% pokryvem korunami stromů a minimální rozlohou 0,5 ha. Z těchto ploch ovšem navíc výslovně vylučuje městské parky, sady a jiné zemědělské plochy (UNEP, 2009). Tato definice je rovněž užívána v mnoha legendách užívaných v Česku (Mlok, 2004).

Na globální úrovni využívá definici FAO například projekt Evropské komise s názvem GLC 2000, jenž využívá klasifikační systém FAO LCCS. Land Cover Classification System (LCCS) je softwarová aplikace vyvinutá pro mapové účely. Každý typ krajinného pokryvu jednoznačně zařazuje do jedné z tříd. Stromový porost je zde rozčleněn do celkem 10 kategorií, z nichž 7 lze považovat za les. Ten je dále dělen na otevřený a uzavřený dle procentuálního pokryvu povrchu korunami stromů (Di Gregorio a kol., 2000).

Dalším celosvětovým projektem zabývajícím se klasifikací krajinného pokryvu je GlobCover, jenž byl vytvořen organizací ESA. Definice lesa je zde podobná jako u GLC 2000, avšak kromě otevřenosti/uzavřenosti jsou zde i kategorie zohledňující listnatost či opadavost stromů. Třída les je rozčleněna celkem do šesti jednotlivých kategorií.

Pro klasifikaci lesních porostů respektuje definici lesa FAO i projekt GlobeLand30 vytvořený organizací National Geomatics Center of China (NGCC), který ovšem les dle jeho typologie dále rozřazuje do třinácti kategorií.

Ústav pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHUL)

Definice (ÚHUL) obsahuje k výkladu FAO velké množství upřesňujících ustanovení. Na jejich základě se do této kategorie zařazují i pozemky disponující stromy schopnými výšky 5 m a 10% zápoje na daném stanovišti teprve dosáhnout. Oproti tomu sem nepatří liniové porosty se šířkou menší než 20 m, vodní plochy uvnitř lesů (tůně, rybníčky, apod.) o rozloze překračující 400 m². Taktéž sem nepatří toky a vodní plochy liniového charakteru (slepá říční ramena apod.) se šířkou koryta (řečiště) přesahující 8 m a zpevněné cesty (asfaltové, betonové, kamenné atp.) se šířkou jízdního pruhu překračující 4 m. Do kategorie les se však řadí pozemky, které jsou pouze dočasně odlesněné (holé seče, kalamitní holiny, plochy po přípravě půdy pro obnovu, požářiště atp.) tzn. pozemky, u nichž existuje předpoklad budoucího dosažení požadovaného 10% zápoje stromů s minimální výškou 5 m.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)

UNFCCC neuznává jednotnou celosvětovou definici lesa a respektuje regionálně stanovené parametry. Pouze uvádí, že lesy musí být však definovány jako plocha s minimální rozlohou 0,05–1 ha s minimálním pokryvem korun stromu dosahujícím 10–30 %. Požadovaný minimální potenciál vzrůstu stromu je 2–5 m. Otázka otevřeného a souvislého lesa zde vůbec není řešena. Tato definice je použita také v Kjótském protokolu.

United States Geological Survey (USGS)

Klasifikační systém USGS se od ostatních výše uvedených definic poněkud liší. Lesy jsou v něm definovány jako plocha s podílem korunního pokryvu stromů větším než 10 %, avšak do kategorie lesů se řadí i plochy, u nichž podíl korunního pokryvu stromů

klesl pod 10 %, avšak plocha následně nebyla využita k jinému účelu. Jsou tak zohledněny například cykly kácení a opětovného vysazování lesů. Lesy dle této definice rovněž musí být schopny produkce dřeva nebo jiných lesních surovin a mít znatelný vliv na klimatické nebo vodní režimy (Anderson a kol., 1976).

Klasifikace USGS je čtyřúrovňová. První úroveň je kategorie les, na další úrovni, která by měla být aplikovatelná mezinárodně, jsou rozlišovány lesy listnaté, stálezelené a smíšené. Třetí a čtvrtá úroveň jsou řešeny již regionálně a pro globální analýzy změn lesních ploch již nemají význam.

Urban Atlas

Pro vhodné oblasti pak lze získat informace o krajinném pokryvu i krajinném využití prostřednictvím projektu Urban Atlas. V něm se ovšem definice lesa oproti jiným projektům poněkud liší. Za les jsou považovány plochy o minimální rozloze 1 hektar, jejichž pokrytí povrchu korunami stromů přesahuje 30 %. Minimální výška stromů musí být 5 metrů, přičemž za les jsou zde považovány i keře, křoviny a lesní plantáže.

CORINE

Jednotná legenda se vyznačuje třístupňovou hierarchickou klasifikací, přičemž lesy mají na nejnižší úrovni tři kategorie – jehličnaté, listnaté a smíšené. Minimální výška stromů zde není zohledněna, daný čtverec je přiřazen do dané kategorie, pokud alespoň ze 75 % své rozlohy splňuje charakteristické prvky dané třídy (EEA, 1994).

2. 2. 2. Typologie lesa

Kromě klasifikací založených na interpretaci družicových snímků existují i typologie podle definic světových ekosystémů. Jak uvádí Wiegel (2008), lesy lze rozdělit do šesti kategorií: tropický deštný les (1), polo-stálezelený a opadavý tropický les a trnitý les (2), mírně teplý smíšený a jehličnatý les (3), mediteránní a hustě křovinatý les (4), mírný opadavý les (5) a boreální jehličnatý les – tajga (6). Zároveň pro každou z kategorií platí, že minimální pokryv plochy korunami stromu je 25 % (Wiegel, 2000).

2. 3. Validace krajinného pokryvu

Na základě výše uvedených klasifikačních systémů byly pro rozsáhlé oblasti světa vytvořeny různorodé databáze krajinného pokryvu (např. CORINE, GlobeLand30, GlobCover). Na tvorbu stavových databází krajinného pokryvu často navazuje taktéž vznik databází změnových (např. Hansen, Potapov).

Dle Strahlera (2006) by validace měla být součástí každého úsilí o mapování krajinného pokryvu v globálním měřítku. Bez řádného ověření totiž zůstává jakákoliv mapa krajinného pokryvu, ať už globálního či regionálního rozsahu, pouhou neotestovanou hypotézou.

Strahler (2006) ve svém stěžejním díle *Global Land Cover Validation: Recommendations for Evaluation and Accuracy Assessment of Global Land Cover Maps* dále obsáhle popisuje v současnosti užívanou metodiku validace databází krajinného pokryvu, nutno ovšem konstatovat, že se převážně soustřeďuje na metodiku validace stavových databází, nikoliv změnových.

Nicméně jak Strahler (2006) zmiňuje, validace změn krajinného pokryvu přináší řadu specifických problémů. Lze snadno ověřit chyby v pixelech, v nichž byla detekována změna, ale jelikož ke změnám dochází relativně vzácně, je obtížné nalézt případné chyby ve velkém množství pixelů, u nichž žádná změna zaznamenána nebyla. V případě, že je změna určována prostřednictvím překrytí po sobě jdoucích tematických map, chybná klasifikace v jedné z těchto map způsobí rovněž chybnou detekci změny i v návazném výzkumu.

Jak ovšem Strahler (2006) dodává, validace změnových map představuje nové výzvy a v této oblasti je zřejmá potřeba rozvíjet metody pro oddělení přeměny krajinného pokryvu od meziroční variability a variability klimatu. Začlenění posouzení přesnosti změnových map v porovnání s přesností jednorázových map krajinného pokryvu je nezbytnou potřebou pro globální sledování stavu a vývoje krajinného pokryvu.

Konkrétní navrhovaný postup pro validaci změnových databází přináší Mayaux (2006), který konstatuje, že kvalitativní validace spočívá v systematickém postupu, při němž je každá z buněk vizuálně porovnávána s referenčním datovým zdrojem. Za účelem zjištění

přesnosti validovaných dat je zaznamenáván typ chyb a převažujícího krajinného pokryvu ve validované buňce.

Dle Arsanjaniho (2016) je vizuální interpretace nejen funkční metodou validace, avšak aplikací na družicové snímky vysokého rozlišení byla užívána pro tvorbu map krajinného pokryvu ve většině zemí. Současně Arsanjani využívá a doporučuje pro validaci krajinného pokryvu metodiku vizuální interpretace s využitím aplikace Google Earth.

Na základě výše uvedených odborných publikací lze považovat vizuální interpretaci za vhodnou metodu validace globálních databází změn krajinného pokryvu. Navržená metodika bude podrobně rozebrána v dalších kapitolách této práce.

KAPITOLA 3

Data a metodika

3. 1. Použitá data

3. 1. 1. Databáze Hansena – Global Forest Change 2000–2014

Hansen ve svém výzkumu Global Forest Change 2000–2014 zachycuje celosvětové změny lesních porostů v letech 2000–2014. Výstupem je dataset rastrových dat, který je rozdělen do čtverců o velikosti 10° zeměpisné šířky x 10° zeměpisné délky. Prostorové rozlišení dat je rovno jedné obloukové sekundě na pixel, což na rovníku odpovídá přibližné velikosti pixelu 30 m.

Snaze Hansena o tvorbu globální databáze změn lesního pokryvu výrazně napomohlo otevření archivu snímků Landsat agentury United States Geological Survey (USGS). Aby bylo možné zmapovat změny ploch lesních porostů v celosvětovém měřítku, kromě již zmíněných snímků z archivu USGS bylo využito dalších šest datových sad pro různé části světa. Těmi jsou:

- Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS)
 - Projekt NASA mapující kontinentální úbytek, obnovu a trvalé přeměny lesa (Masek a kol., 2008)
- South Dakota State University (SDSU)
 - Klasifikace ztrát lesního pokryvu v oblastech Konga, Indonésie a evropské části Ruska (Broich a kol., 2011)
- United States Department of Agriculture National Agricultural Statistical Service Cropland Data Layer (USDA NASS CDL)
 - Roční klasifikace typů plodin (Johnson a Mueller, 2010; NASS Cropland Data Layer, 2010)
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation National Carbon Accounting System (CSIRO NCAS)
 - Časové řady klasifikace lesa v oblasti Austrálie (Caccetta a kol., 2007)
- National Institute for Space Research Amazon Deforestation Monitoring Project (INPE PRODES)
 - Klasifikace odlesňování v oblasti Amazonie (Shimabukuro a kol., 2008)
- Conservation International (CI)

- Klasifikace odlesňování v oblasti Bolívie, Barmy a Madagaskaru (Harper a kol., 2007; Killeen a kol., 2007; Leimgruber a kol., 2005)

Primárním datovým zdrojem všech výše uvedených využitých datových sad byly snímky Landsat. Jak uvádí Hansen (2013), nejběžnější zde aplikovanou metodou detekce změn ploch lesních porostů je bi-temporální analýza, která spočívá v prostém srovnání páru snímků téhož území ve sledovaném časovém období. Na analyzovaná data byly aplikovány geometrické a radiometrické korekce, což následně umožnilo vznik globálních map změn lesního pokryvu ve vysokém rozlišení. Tento stěžejní výstup Hansenova výzkumu disponuje následujícími datovými vrstvami:

- Pokrytí korunami stromů v roce 2000 (Tree canopy cover for year 2000)
 - Mapuje veškerou vegetaci vyšší než 5 metrů. Atributem pixelu je hodnota v rozmezí 0–100, která pro každou buňku rastru udává její procentuální pokrytí korunami stromů
- Úbytek lesního pokryvu v letech 2000–2014 (Global forest cover loss 2000–2014)
 - Jako úbytek je definována změna v daném pixelu z lesního pokryvu na jiný pokryv. Každá z buněk rastru nabývá hodnoty 0 (beze ztráty lesa) či 1 (došlo ke ztrátě lesa)
- Přírůstek lesního pokryvu v letech 2000–2012 (Global forest cover gain 2000–2012)
 - Přírůstek je definován jako opak úbytku lesního pokryvu pro dané období. Každá z buněk rastru nabývá hodnoty 0 (nedošlo k přírůstku lesa) či 1 (došlo k příbytku lesa)
- Rok největšího úbytku lesního pokryvu (Year of gross forest cover loss event)
 - Rozčleňuje celkový úbytek lesa ve sledovaném období do ročních úseků. Výstupem je rastr, jehož buňky nabývají hodnot 0 (nedošlo k úbytku lesa) či 1–13 (udávající rok v období 2001–2014, v němž došlo k největšímu úbytku lesa).
- Rozdělení dat (Data mask)
 - Buňky rastru nabývají tří hodnot
 - 0 – pro danou oblast nebyla k dispozici data
 - 1 – zmapovaná oblast
 - 2 – stálé vodní plochy
- Bezoblačný snímek Landsat 7 přibližně pro rok 2000 (Circa year 2000 Landsat 7 cloud-free image composite)

- Referenční multispektrální snímek z nejbližšího roku, pro který byl v dané oblasti k dispozici bezoblačný snímek. V případě, že nebyl k dispozici bezoblačný snímek pro rok 2000, byly využity snímky z nejbližšího roku náležícího do období 1999–2012
- Bezoblačný snímek Landsat přibližně pro rok 2014 (Circa year 2014 Landsat cloud-free image composite)
 - Referenční multispektrální snímek z nejbližšího roku, pro který byl v dané oblasti k dispozici bezoblačný snímek. V případě, že nebyl k dispozici bezoblačný snímek pro rok 2000, byly využity snímky z nejbližšího roku náležícího do období 2010–2012

Výše uvedené vrstvy jsou volně dostupné z:

https://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest/download_v1.2.html

3. 1. 2. Databáze Potapova – Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive

Potapov se ve svém výzkumu Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive soustředí na oblast východní Evropy. Sledovaná oblast tak zahrnuje evropskou část Ruska a státy bývalého východního bloku kromě NDR a Albánie.

Základním datovým zdrojem jeho výzkumu jsou snímky Landsat Thematic Mapper a Enhanced Thematic Mapper Plus (TM / ETM+) z United States Geological Survey (USGS) a data z archivu Earth Resources Observation and Science (EROS). Začátek a konec vegetačního období byl určen s využitím Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), jenž je založen na šestnáctidenním vegetačním indexu NDVI. Jako vegetační období bylo definováno sjednocení všech šestnáctidenních intervalů NDVI, v nichž jejich hodnota dosahovala alespoň 90 % roční průměrné hodnoty NDVI.

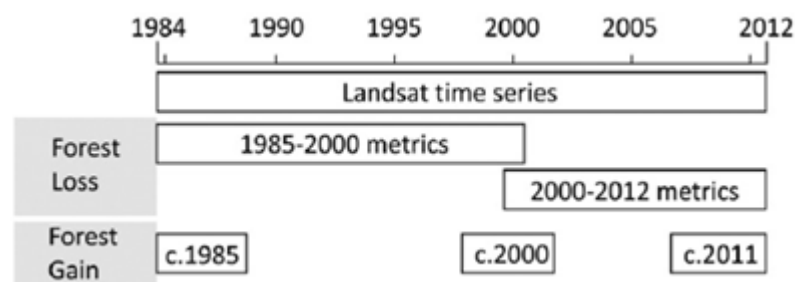
Všechna pásma odrazivosti analyzovaných snímků byla převedena na Top of Atmosphere Reflectance (TOA) a termální pásmo bylo převedeno na jasovou teplotu. Atmosférické korekce nebyly provedeny. Na každý z analyzovaných snímků byla aplikována sada Quality Assessment (QA) modelů za účelem klasifikace krajinného pokryvu do předem určených tříd (pevnina, voda, sníh/led) a zjištění míry znehodnocení snímku oblačností, stínem či oparem.

Tyto QA modely byly vyvinuty v rámci dřívějšího výzkumu Potapova (Potapov a kol. 2011) a pro současné využití byly zdokonaleny prostřednictvím využití dalších dat. Každý z QA modelů se skládá z balíčku sedmi typů stromů odvozených ze 193 testovacích snímků studované oblasti. Pro každý z testovacích snímků byla následně provedena řízená klasifikace.

Poté bylo 75 TM snímků zahrnujících 40 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) a 35 Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED) zkombinováno se 118 snímky ETM+ (zahrnujících 45 snímků SRTM a 73 snímků GMTED) a souborně byly využity pro tvorbu čtyř obecných sad QA modelů. Po aplikaci QA modelu byl každý pixel snímku klasifikován do jedné z kategorií – půda s čirou oblohou, voda, led nebo oblaka/stín.

Následně bylo využito hodnot odrazivosti Top of Canopy (TOC) z dat MODIS ke korekcím, čímž byla zajištěna konzistence mezi senzory v prostoru a čase. Pro každý snímek byla automaticky vygenerována Pseudo-Invariant Objects Mask (PIOM). Následně byly vyloučeny všechny pixely, jež byly dříve klasifikovány do třídy voda či byly znehodnoceny oblačností nebo stínem. Taktéž byly vyloučeny pixely, jejichž rozdíl hodnot odrazivosti mezi MODIS TOC a Landsat TOA přesahoval 5 %. Tento rozdíl byl zjišťován pro červené pásmo Landsat, NIR a SWIR. Výsledkem byly normalizované anizotropní upravené hodnoty odrazivosti. Krátkovlnná spektrální pásma Landsat (modré a zelené) normalizována nebyla, neboť nebyla využívána pro další výzkum. Jasová teplota povrchu byla využívána bez normalizace, a také byl pro každý snímek spočítán index NDVI (Potapov, 2015).

Zpracování snímků Landsat vyústilo ve vytvoření časových řad snímků bez oblak a stínů s normalizovanými hodnotami odrazivosti. Časové řady jsou názorně znázorněny na obrázku č. 1.



Obrázek 1: Časové řady zpracování snímků Landsat

K mapování změn krajinného pokryvu a srovnávání biofyzikálních proměnných, jako je třeba změna výšky porostu v čase, bylo využito multitemporálních metrik. Pro mapování ztrát vzrostlého lesa byly odvozeny dva dlouhodobé intervaly metrických sad, jedna pro období 1985–2000, druhá pro 2000–2012. Tyto sady mají jednoletý překryv, aby bylo zaručeno, že změna okolo roku 2000 byla správně detekována. Pro mapování přírůstku lesa byly odvozeny tři kratší intervaly metrických sad – 1985 (1984–1986), 2000 (1999–2001) a 2011 (2009–2012).

Ztráta lesního porostu byla definována jako jakýkoliv proces, který vede k úbytku stromů v daném pixelu snímku Landsat. Na základě této definice bylo na přirozené ztráty i na zavinění lidským faktorem nahlíženo stejně. Klasifikace byla provedena na pixelové úrovni s minimální mapovací jednotkou o velikosti 0,09 ha, tedy odpovídající velikosti pixelu 30 m. Mapování bylo provedeno s využitím klasifikačního algoritmu. Ten

zahrnoval sedm iterací na principu srovnávání výstupu klasifikace s testovacími polygony. Ty obsahovaly 21 milionů pixelů, z nichž bylo pro každou iteraci náhodně vybráno 20 %.

Pro období 2000–2012 již bylo k dispozici srovnání s databází Hansena. Ten ale vytvářel globální model, který měl vyšší míru opomenutí lesních ztrát než Potapovovův model pro období 1985–2000. Pro zpřesnění výstupů ale bylo pro období 2000–2012 využito Hansenova globálního mapování jakožto tréninkových dat.

Zatímco úbytek lesního porostu má obvykle za následek zjevnou změnu spektrální odrazivosti, přírůstek je postupným procesem s jemnou meziroční změnou. Proto byl přírůstek lesa definován pro oblasti, v nichž korunový kryt stromů dosáhl určité prahové hodnoty do konce studovaného období. Oproti mapování úbytku lesů tak byly vytvořeny tři výstupy pro roky 1985, 2000 a 2011, které byly vytvořeny ze tříletých metrických sad. Vytvoření ročního vývoje nebylo možné pro nízké pokrytí datově chudých regionů. Pro všechny tři sledované metrické sady byl využit totožný model mapování. Práh procentuálního pokrytí pixelu korunami stromů byl stanoven na 49 %. Oblasti, kde na základě výsledků analýzy došlo k úbytkům lesních porostů, byly v tomto případě klasifikovány jako oblasti, v nichž nedošlo k žádnému přírůstku lesa. Následně se ovšem ukázalo, že chybné zachycení okrajů lesa vedlo k mylnému vyhodnocení změn, a za účelem jejich eliminace tak byla zvětšena minimální mapovací jednotka z 0,09 ha na 0,45 ha.

Každému zjištěnému úbytku lesního porostu byla na základě časových řad přiřazena minimální roční hodnota NDVI (v průběhu vegetačního období) a zaznamenána míra pokrytí korunami stromů v daném roce. Pro daný rok byl mapován každý pixel, který byl v daném roce alespoň jednou zaznamenán bez oblačnosti či stínu. V opačném případě byl pixel zařazen do kategorie „no data“. Následně byly analyzovány minimální roční hodnoty NDVI pro všechny pixely, u kterých byl vyhodnocen úbytek lesa, a bylo jim přiřazeno určení roku úbytku lesa. Pokud pixel dosahoval alespoň po dobu dvou let pokrytí korunami stromů vyššího než 49 %, které následně kleslo pod 20 % a v následujícím roce nedošlo k jeho zvýšení, tak je rok úbytku lesa určen s vysokou spolehlivostí. Více než 52 % všech určených ztrát lesa disponuje touto vysokou spolehlivostí. Pokud byla zaznamenána ztráta lesního pokryvu, avšak následující rok míra pokrytí vzrostla, byla pixelu přiřazena střední spolehlivost. V případě, že analýza vývoje lesního pokryvu pixelů, u nichž byl klasifikován úbytek, neprodukovala žádné výsledky (k čemuž došlo u 1,4 % pixelů), byla těmto pixelům přiřazena nízká spolehlivost.

Vzhledem k tomu, že získaná databáze ročního pokrytí korunami stromů má kvůli oblačnosti a nekonzistenci získávání dat časové mezery, určenému roku úbytku lesa nemusí vždy předcházet rok, pro nějž byly k dispozici bezoblačná data. Úbytek je zde ale i přesto možné klasifikovat, neboť byla zaznamenávána i řada let před zjištěným úbytkem lesa. Přírůstků lesních porostů nebylo smysluplné přiřazovat konkrétní rok, kdy k němu došlo, neboť zejména v lesech mírného pásu stromy přirozeně postupně narůstají. Namísto toho byly zjištěným přírůstkům, jak už bylo výše zmíněno, přiřazeny roky 2000 nebo 2012 (Potapov, 2015).

Jako stěžejní výstupy Potapovova výzkumu byly následně vytvořeny tři mapové výstupy zachycující úbytek lesních ploch, přírůstek lesních ploch a dynamický vývoj lesních ploch. Tyto výstupy jsou volně dostupné z:

<http://glad.geog.umd.edu/dataset/eastern-europe-forset-cover-dynamics-1985-2012/>

3. 1. 3. Validace dat

Navržená metodika validace databází změn Hansena a Potapova vychází z rešerše odborné literatury, která je zpracována v kapitole 2. Na jejím základě bylo upuštěno od původního záměru studia vývoje vegetačních indexů.

Bylo přihlédnuto ke skutečnosti, že využití vegetačních indexů představuje způsob, kterým lze vyhodnocovat změny lesních ploch automatizovaně, zatímco vizuální interpretace umožňuje komplexní zhodnocení případných specifických vlastností každého z validovaných pixelů.

Bylo rozhodnuto o provedení kvalitativní validace dle Mayauxe (2006), při níž je každá z ověřovaných buněk vizuálně porovnávána s referenčním datovým zdrojem. Ačkoliv Arsanjani (2016) pro validaci doporučuje využití aplikace Google Earth, užitým referenčním datovým zdrojem se staly archivní ortofotosnímky ČÚZK, které na rozdíl od Google Earth zachycují reálný stav krajiny na začátku i konci Hansenem i Potapovem sledovaného období.

Jak Strahler (2006) zmiňuje, pro validaci databází změn obecně platí, že lze snadno ověřit chyby v pixelech, v nichž byla detekována změna, ale jelikož ke změnám dochází relativně vzácně, je obtížné nalézt případné chyby ve velkém množství pixelů, u nichž žádná změna zaznamenána nebyla.

Na tuto problematiku bylo reagováno tvorbou čtyř validačních oblastí, jejíž vymezení zajistilo rovnoměrné zastoupení pixelů s detekovanou změnou a bez detekované změny v ověřovací množině.

Validace byla provedena v souladu s doporučeními Strahlera (2006), což umožnilo následné zhodnocení přesnosti ověřovaných databází a jejich vzájemné srovnání. Při prezentaci výsledků validace byly získané poznatky zpracovány jak souhrnně, tak rovněž i na základě validačních oblastí či Hansenem a Potapovem konkrétních detekovaných změn.

3. 1. 3. 1. Validace databáze Hansena

Hansenova databáze Global Forest Change 2000–2014 (2014) vlastní validaci výsledků neobsahuje. Autor naopak ve svém výzkumu výslovně uvádí, že robustní validace za účelem zhodnocení přesnosti jeho výstupů by byla velmi vítanou a mohla by napomoci určení optimální metodiky charakterizace změn. To by bylo výrazně nápomocno budoucímu zkvalitnění detekce změn lesních ploch v globálním měřítku.

Validací výsledků Hansena se již zabýval Tropek a kol. (2014), který se soustředil především na tropické oblasti. Hlavním úskalím Hansenovy metodiky se zde ukázala být skutečnost, že za les je zde považována veškerá vegetace přesahující svou výškou 5 metrů. Tato definice v sobě zahrnuje i mnoho typů plantáží, což i na základě výsledků Tropeka činí výstupy Hansenovy detekce snadno rozporovatelnými.

3. 1. 3. 2. Validace databáze Potapova

Součástí Potapovova výzkumu Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive je i vlastní validace výsledků. Správnost Potapovovy databáze změn byla validována na základě pravděpodobnostně rozvrstvených bází pro jednotlivé pixely o velikosti 30 m. Validace proběhla samostatně pro ztrátu lesních ploch v období 1985–2000 a v období 2000–2012 a přesnost těchto validací byla následně porovnána. Bylo vycházeno z předpokladu, že většina chyb a nepřesností se vyskytuje na hranicích jednotlivých oblastí. Z toho důvodu bylo podél hranic vytvořeno okolí o velikosti 1 pixelu (uvnitř oblasti i vně oblasti). Na základě toho byly pixely rozřazeny do čtyř kategorií (1. periferní – žádná změna, 2. periferní – ztráta lesa, 3. jádrové – žádná změna a 4. jádrové – ztráta lesa).

Oblasti přírůstku lesního pokryvu a bezlesé plochy v roce 1985 byly validovány jednotlivě. Kromě toho bylo ověřováno i správné zařazení do výchozí kategorie krajinného pokryvu (znovuzalesnění bývalých lesních ploch vs. zalesnění bývalé zemědělské půdy). Oproti tomu nebyly ověřovány ztráty lesa důsledkem vichřic a požárů, protože tato kategorie je založena na vizuální interpretaci a prostřednictvím snímků Landsat ji nelze ověřit. Celkový počet ověřovacích vzorků, který by měl odpovídat směrodatné odchylce, byl stanoven na 1000 pro ztrátu lesních porostů a na 500 pro přírůstek lesa. Podrobnější validace probíhala ve vybraných opuštěných zemědělských regionech evropské části Ruska, nikoliv ale na českém území, kterým se bude tato práce zabývat.

Vlastní validace dat ukázala, že Potapovův model je na základě odhadované přesnosti spolehlivý. Ztráta lesa v období 2000–2012 byla zmapována s chybovostí 6,96 %. Ohledně přírůstku lesních ploch došlo k pozoruhodné situaci. Znovuobnovení lesa na plochách, které byly zalesněny na začátku sledovaného období (u Potapova tj. v roce 1985), bylo zmapováno s chybovostí pouhých 1,43 %. Oproti tomu u přírůstku lesa na plochách, jež byly na začátku sledovaného období bezlesé, chybovost přesahuje 20 %. Tato chybovost měla být dle závěrů Potapova způsobena chybným považováním nemalého procenta zemědělské půdy za lesní plochy. Tím byla zároveň i podhodnocena možná míra zalesňování bývalých zemědělských ploch.

3. 2. Metodika

Hlavním cílem této práce byla validace detekce změn lesních ploch na území České republiky v databázích Hansena a Potapova, jež byly podrobně popsány výše. Výstupy byly ověřovány pro období let 2000–2012, které zachycují obě zmíněné databáze. Díky tomu bylo možné výstupy Hansena a Potapova nejen validovat, ale také vzájemně porovnat jejich přesnost.

3. 2. 1. Předzpracování vstupních dat

Primárním výstupem validovaných databází shodně byly rastrové vrstvy přírůstků a úbytků lesních ploch. Právě tyto vrstvy se staly předmětem validace. Aby bylo jejich ověření na území České republiky možné, byla nejprve nutná úprava spočívající v uvedení těchto dat do souladu s validovaným územím.

Tato úprava byla stejně jako následná validace provedena s využitím software ArcGIS 10.3.1. Jako maska státního území České republiky byla využita databáze ArcČR 500, konkrétně vrstva Stat_polygon.

Hansen své globální výstupy poskytuje ve čtvercích o velikosti 10° zeměpisné šířky x 10° zeměpisné délky. Jelikož státní území České republiky protíná 50. rovnoběžka severní šířky, k zachycení kompletního území České republiky bylo nutno využít dvou čtverců. Tyto čtvercové rastry byly s využitím funkce Extract by Mask a vrstvy Stat_polygon ořezány a následně prostřednictvím funkce Mosaic spojeny v celistvý rastr plně pokrývající státní území. Tento proces byl shodně proveden jak pro rastr úbytku, tak pro rastr přírůstků.

Potapov své kompletní výstupy poskytuje v jednotlivých rastroch pro přírůstek a úbytek. Tyto rastry jsou ovšem velkého plošného rozsahu a zachycují kompletní Potapovem mapované území. K vyextrahování kýžených dat nicméně stačilo prosté využití funkce Extract by Mask. Maskou zde stejně jako v předchozím případě byla vrstva ArcČR 500.

Před zpracováním rastrových výstupů Hansena a Potapova bylo nutno tyto vrstvy převést ze souřadnicového systému WGS 84 do souřadnicového systému S–JTSK, ve kterém jsou jak vrstva Stat_polygon, tak rovněž i archivní ortofotosnímky ČÚZK. Dle Fajta (2005) se při těchto transformacích pohybují odchylky v poloze na území České republiky v rozmezí 1–3 metrů. Vliv transformace na výsledek validace by tak měl být zanedbatelný.

3. 2. 2. Postup validace

Jelikož předmětem této práce nebylo pouhé ověření výsledků Hansena a Potapova, ale i vzájemné porovnání přesnosti těchto databází, byly pro zvýšení výpovědní hodnoty validace vytvořeny následující čtyři oblasti:

- Oblast, v níž detekovali změnu lesních ploch Hansen i Potapov
 - Rozloha 7 401,0 km²
- Oblast, v níž detekoval změnu lesních ploch pouze Hansen
 - Rozloha 1 181,3 km²
- Oblast, v níž detekoval změnu lesních ploch pouze Potapov
 - Rozloha 4 600,1 km²
- Oblast, v níž Hansen ani Potapov nedetekovali žádnou změnu lesních ploch
 - Rozloha 65 684,4 km²

Jednotlivé oblasti jsou vizualizovány v příloze 1 této práce. Postup jejich tvorby je obsahem kapitoly 3. 2. 2. 1.

V každé z těchto oblastí bylo následně náhodně vygenerováno 1 000 ověřovacích bodů, které byly jednotlivě validovány s využitím archivních ortofotosnímků Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK) dostupných prostřednictvím WMS služby Geoportálu ČÚZK.

Při volbě počtu validovaných bodů bylo přihlédnuto k již proběhlé vlastní validaci databáze Potapova, při níž bylo ověřováno 1 000 pixelů s detekovaným úbytkem a 500 pixelů s detekovaným přírůstkem. Oproti Potapovově zvolené metodice byla v této práci navíc zohledněna varianta, že některé nastalé změny lesních ploch mohly být Hansenem či Potapovem při detekci opomenuty. Stanovení 1 000 ověřovacích bodů v každé z oblastí zaručuje, že jak v Hansenově, tak v Potapovově databázi bude validováno 2 000 bodů, v nichž byla detekována změna lesních ploch, a 2 000 bodů, v nichž na základě výsledků jednoho nebo obou autorů k žádné změně lesních ploch nedošlo.

Výstupem validace je souborná databáze, která poskytuje kompletní informace o každém ze 4 000 validovaných bodů. Tato databáze je přílohou práce a je dostupná ve formátech gdb i xlsx. Postup validace i obsah výsledné databáze je podrobně popsán níže.

3. 2. 2. 1. Tvorba validačních oblastí, generace ověřovacích bodů

Při tvorbě validačních oblastí bylo nutno přihlídnout ke skutečnosti, že účelem tvorby validačních oblastí byla následná generace náhodných ověřovacích bodů. Přestože byly výstupy Hansena a Potapova, jež byly vstupními daty pro tvorbu validačních oblastí, v rastrovém formátu, validační oblasti bylo vzhledem k funkcionalitě programu ArcGIS vhodnější zpracovávat ve formě polygonů. Za tím účelem byla nejprve vstupní data (vrstvy Hansen_gain, Hansen_loss, Potapov_gain a Potapov_loss) převedena pomocí funkce Raster to Polygon do vektorového formátu.

Následně bylo prostřednictvím funkce Union provedeno sloučení vrstev přírůstku a úbytku, čímž vznikly dvě vrstvy Hansen_change a Potapov_change. Při tomto úkonu bylo zjištěno, že ve výstupech Hansena i Potapova dochází k překryvům detekce úbytku a přírůstku lesních ploch. Tato problematika bude detailněji řešena níže.

Dalším krokem byla tvorba oblastí, v nichž Hansen a Potapov žádnou změnu lesních ploch nedetekovali. Oblasti Hansen_no_change a Potapov_no_change byly vytvořeny s využitím funkce Erase a vrstvy Stat_polygon dostupné z databáze ArcČR 500.

Kýžené čtyři validační oblasti byly vygenerovány prostřednictvím funkce Intersect. Oblast, v níž detekovali změnu lesních ploch Hansen i Potapov, byla vytvořena průnikem vrstev Hansen_change a Potapov_change. Oblast, v níž detekoval změnu lesních ploch pouze Hansen, byla vytvořena průnikem vrstev Hansen_change a Potapov_no_change. Oblast, v níž detekoval změnu lesních ploch pouze Potapov, byla vytvořena průnikem vrstev Hansen_no_change a Potapov_change. Oblast, v níž Hansen ani Potapov nedetekovali žádnou změnu lesních ploch, byla vytvořena průnikem vrstev Hansen_no_change a Potapov_no_change.

Mnohdy zdánlivě vnitřně složitě validační oblasti byly následně zjednodušeny aplikací funkce Dissolve, která radikálně zredukovala počet polygonů v jednotlivých oblastech, aniž by bylo jakkoliv ovlivněno vymezení těchto oblastí. Výsledné oblasti jsou ale i přesto velmi členité, neboť ve své podstatě vychází z pixelů o velikosti 30 m. Tato skutečnost výrazně snižuje výpovědní hodnotu mapové vizualizace jednotlivých oblastí v celorepublikovém měřítku.

V každé ze čtyř vytvořených validačních oblastí závěrem bylo prostřednictvím funkce Create Random Points náhodně vygenerováno 1 000 ověřovacích bodů. Těmto bodům přiřazeny souřadnice X a Y v souřadnicovém systému S–JTSK. Taktéž byly vytvořeny atributové sloupce nutné pro validaci, jež jsou popsány v kapitole 3. 2. 2. 4.

3. 2. 2. Archivní ortofotosnímky ČÚZK

K validaci databází změn lesních ploch Hansena a Potapova na území České republiky v období let 2000–2012 bylo využito archivních ortofotosnímků ČÚZK. Tento datový zdroj byl do software ArcGIS připojen prostřednictvím služby Web Map Service (WMS).

Validace detekovaných změn probíhala porovnáním stavu okolí ověřovaného bodu v roce 2000 a v roce 2012. Pro zjištění stavu v roce 2000 byly využity ortofotosnímky z let 1998–2001, jež kompletně pokrývají území České republiky. Stav v roce 2012 byl čerpán z ortofotosnímků pořízených v letech 2012 a 2013. Navzdory validovanému období 2000–2012 byl upřednostněn snímek z roku 2013 a nikoliv snímek z roku 2011, neboť ten zachycuje pouze oblast západních Čech, zatímco každý ze snímků z let 2012 a 2013 zachycuje jednu polovinu státního území.

Archivní ortofotosnímky ČÚZK skvěle zachycují reálný stav krajinného pokryvu v okamžiku snímání a jsou tudíž vhodnou alternativou k družicovým snímkům Landsat při validaci detekce změn lesních ploch. Výrazným úskalím validace by neměla být ani skutečnost, že ortofotosnímky nejsou pro každé území k dispozici přesně pro daný rok, v němž Hansen či Potapov změnu vyhodnotili, neboť jak sami autoři uvádějí, ani oni sami neměli při svém výzkumu k dispozici bezoblačný snímek pro každý pixel sledovaného území a v těchto případech si byli nuceni vypomoci snímky z nejbližšího možného roku, pro který bezoblačný snímek k dispozici byl. Počinání při validaci bylo totožné s jimi užitým postupem.

3. 2. 2. 3. Určení lesa při validaci

Při validaci detekovaných změn Hansenem či Potapovem bylo přihlíženo k jejich specifickým parametrům určení lesních ploch. Hansenova definice lesa je oproti světově používaným definicím (viz kapitola 2. 2. 1.) značně zjednodušená a za les jsou v jeho výzkumu považovány všechny porosty vyšší než 5 metrů. Jak již Tropek (2014) na základě své validace Hansenovy databáze poukazoval, toto pojetí definice lesa s sebou nese četná úskalí.

Nutno také zmínit, že v Hansenově metodice není podrobně rozebrán postup spolehlivého určení výšky vegetace. Rovněž není zmíněno nabízející se případné využití rozdílu Digitálního modelu terénu a Digitálního modelu reliéfu a je tedy otázkou, s jakou přesností je Hansen schopen určit, zda porosty svou výškou přesahují pětimetrovou hranici či nikoliv.

Jelikož při vizuální interpretaci ortofotosnímků nelze exaktně se zaručenou přesností určit výšku porostů, při validaci byly s přihlédnutím k Hansenově pojetí za les považovány očividně vzrostlé stromové porosty. Naopak jako lesní porosty nebyly vyhodnoceny křoviny, polomy, paseky či lesní školky. Tyto případy byly ovšem zaznamenávány a budou podrobně rozebrány níže.

Potapovova detekce přírůstku či úbytku lesních ploch vychází z procentuálního pokrytí pixelu korunami stromů. U stálého lesa by dle Potapova mělo pokrytí přesahovat 49 %. Úbytek Potapov detekuje v případě, že procentuální pokrytí pixelu, u něhož dosahovalo 49 % či více, kleslo pod 20 %.

S přihlédnutím k Potapovově pojetí definice lesa bylo tedy kromě výše uvedeného přihlíženo i k poměrnému pokrytí pixelu korunami stromů. Za tím účelem neprobíhala validace pouze přímo v ověřovaných bodech, avšak s využitím funkce Create Fishnet byla vytvořena pixelová mřížka o velikosti 30 m odpovídající ověřovaným vstupním datům. Následně bylo nahlíženo na celý pixel, do něhož ověřovaný bod spadal. V případě, že byl pixel alespoň z poloviny tvořen stromovým porostem, tak byl klasifikován jakožto les, v opačném případě jako bezlesá plocha.

3. 2. 2. 4. Princip validace ověřovaného bodu, kódování zjištěných výsledků

Validace každého ze 4 000 ověřovaných bodů probíhala na základě vizuální interpretace archivních ortofotosnímků ČÚZK dle výše uvedených pravidel. Každý ověřovaný bod měl přiděleno jedinečné identifikační číslo a souřadnice. Kromě těchto údajů byly během validace každému bodu doplněny atributy, jež jsou popsány v tabulce 1.

Atribut	Datový typ	Rozmezí hodnot
H	Short Integer	-11; -1; 0; 1
P	Short Integer	-11; -1; 0; 1
orto_2000	Short Integer	0–1
orto_2012	Short Integer	0–1
H_result	Short Integer	0–7
P_result	Short Integer	0–7
Note	Text	0–50 znaků

Tabulka 1: Atributy validační databáze

3. 2. 2. 4. 1. Vysvětlení atributů výsledné databáze

H

Hodnota atributu H specifikuje, zda Hansen v pixelu, do něhož spadá daný ověřovaný bod, detekoval úbytek (-1), přírůstek (1) či žádnou změnu nedetekoval (0). V případě, že v pixelu, do něhož spadá daný ověřovaný bod, došlo v Hansenově výzkumu k překryvu detekce úbytku a přírůstku lesních ploch, náleží tomuto bodu atribut -11.

P

Hodnota atributu P specifikuje, zda Potapov v pixelu, do něhož spadá daný ověřovaný bod, detekoval úbytek (-1), přírůstek (1) či žádnou změnu nedetekoval (0). V případě, že v pixelu, do něhož spadá daný ověřovaný bod, došlo v Potapovově výzkumu k překryvu detekce úbytku a přírůstku lesních ploch, náleží tomuto bodu atribut -11.

orto2000

Hodnota atributu orto2000 specifikuje, zda v pixelu, do něhož spadá daný ověřovaný bod, na základě vizuální interpretace ortofotosnímků ČÚZK dle stanovených pravidel byl v roce 2000 les či nikoliv. V případě, že v pixelu, do něhož spadá daný ověřovaný bod, les v roce 2000 byl, náleží tomuto bodu atribut 1, v opačném případě atribut 0.

orto2012

Hodnota atributu orto2012 specifikuje, zda v pixelu, do něhož spadá daný ověřovaný bod, na základě vizuální interpretace ortofotosnímků ČÚZK dle stanovených pravidel byl v roce 2012 les či nikoliv. V případě, že v pixelu, do něhož spadá daný ověřovaný bod, les v roce 2012 byl, náleží tomuto bodu atribut 1, v opačném případě atribut 0.

H_result

Hodnota atributu H_result z pohledu databáze Hansena přímo specifikuje výsledek validace pixelu, do něhož spadá daný ověřovaný bod. Jednotlivé hodnoty tohoto atributu vysvětluje tabulka 2.

Hodnota	Význam
0	Výsledek validace je v souladu s výsledkem Hansena
1	Hansen klasifikoval přírůstek, dle validace k žádné změně nedošlo
2	Hansen klasifikoval přírůstek, dle validace došlo k úbytku
3	Dle Hansena k žádné změně nedošlo, dle validace došlo k přírůstku
4	Dle Hansena k žádné změně nedošlo, dle validace došlo k úbytku
5	Hansen klasifikoval úbytek, dle validace k žádné změně nedošlo
6	Hansen klasifikoval úbytek, dle validace došlo k přírůstku
7	U Hansena došlo k překryvu oblasti přírůstku a úbytku

Tabulka 2: Validační třídy Hansena

P_result

Hodnota atributu P_result z pohledu databáze Potapova přímo specifikuje výsledek validace pixelu, do něhož spadá daný ověřovaný bod. Jednotlivé hodnoty tohoto atributu vysvětluje tabulka 3.

Hodnota	Význam
0	Výsledek validace je v souladu s výsledkem Potapova
1	Potapov klasifikoval přírůstek, dle validace k žádné změně nedošlo
2	Potapov klasifikoval přírůstek, dle validace došlo k úbytku
3	Dle Potapova k žádné změně nedošlo, dle validace došlo k přírůstku
4	Dle Potapova k žádné změně nedošlo, dle validace došlo k úbytku
5	Potapov klasifikoval úbytek, dle validace k žádné změně nedošlo
6	Potapov klasifikoval úbytek, dle validace došlo k přírůstku
7	U Potapova došlo k překryvu oblasti přírůstku a úbytku

Tabulka 3: Validační třídy Potapova

Note

Do atributu Note byly zaznamenávány zjištěné specifické případy při detekci změn lesa. Obecně se jednalo o detekované změny v trvale zemědělsky užívaných, urbánních či vodních plochách. Rozboru těchto specifických případů je věnován prostor v diskuzi.

KAPITOLA 4

Výsledky

Výsledná databáze ověřovacích bodů detekce změn Hansena a Potapova byla exportována do programu MS Excel, v němž bylo následně provedeno její statistické zpracování. Cílem tohoto procesu bylo zhodnocení přesnosti validovaných databází a jejich vzájemné porovnání. Přesnost databází byla hodnocena na základě množství ověřovacích bodů (pro účely validace = pixelů; viz kapitola 3. 2. 2. 3.) spadajícího do validační třídy 0 (viz tabulka 2 a 3). Validací třídy 1–6 sloužily k vyhodnocení chyb, které byly validací databází Hansena a Potapova zjištěny. Do validační třídy 7 byly klasifikovány pixely, u nichž v databázích Hansena či Potapova došlo k překryvu detekovaného úbytku a přírůstku. Interpretaci validační třídy 7 je věnována kapitola 4. 3. 7.

Statistické zpracování výsledků bylo provedeno jak souhrnně pro všechny validované pixely databází změn Hansena a Potapova, tak rovněž i jednotlivě pro samostatné validační oblasti. Samostatnou kapitolu tvoří statistické zpracování výsledků z pohledu Hansenem a Potapovem detekovaných změn, které přináší doplňující informace o přesnosti validovaných databází. Srovnání databází bylo provedeno komplexně s přihlédnutím ke kompletnímu statistickému zpracování výsledků.

4. 1. Souhrnné výsledky

Souhrnné zpracování výsledků bylo provedeno samostatně pro Hansenovu (tabulka 4) i Potapovovu (tabulka 5) databázi detekce změn lesních ploch. Pro každou z validačních tříd (viz tabulka 2 a 3) byla zjištěna absolutní a relativní četnost zastoupení pixelů.

Absolutní četnost udává celkové množství ze 4 000 ověřovaných pixelů, které na základě provedené validace spadají do dané validační třídy. Relativní četnost specifikuje poměr počtu pixelů v dané validační třídě vzhledem k celkovému počtu ověřovaných pixelů, který je v tomto případě roven 4 000.

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	2011	50,28
1	291	7,28
2	31	0,78
3	188	4,70
4	141	3,53
5	644	16,10
6	137	3,43
7	557	13,93

Tabulka 4: Souhrnné výsledky validace Hansenovy databáze

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	1894	47,35
1	322	8,05
2	20	0,50
3	264	6,60
4	128	3,20
5	418	10,45
6	73	1,83
7	881	22,03

Tabulka 5: Souhrnné výsledky validace Potapovovy databáze

Souhrnné rozdělení čtyř tisíc ověřovacích bodů do jednotlivých validačních tříd pro Hansena (tabulka 4) a Potapova (tabulka 5) ukazuje, že celková míra správného vyhodnocení změn se u obou validovaných databází pohybuje okolo 50 %. Jak ale vyplývá z dalších statistických výstupů, tyto hodnoty velmi příznivě ovlivnila skutečnost, že polovina ověřovacích bodů pro každou z databází spadala do oblastí, v nichž autory žádná změna lesních ploch nebyla detekována. Za zmínku stojí také skutečnost, že nezanedbatelné množství ověřovacích bodů náleželo do oblastí, v nichž ve výstupech Hansena i Potapova došlo k překryvu vrstev detekovaného úbytku a přírůstku. Tato problematika bude náležitě diskutována níže.

4. 2. Statistické zpracování výsledků v jednotlivých oblastech

Obdobně jako souhrnné výsledky byly zpracovány taktéž výsledky pro jednotlivé validační oblasti (viz kapitola 3. 2. 2.). Do každé z validačních oblastí spadá 1 000 ověřovacích bodů, jejichž statistické zpracování umožňuje detailněji posoudit přesnost detekovaných databází.

Absolutní četnost udává celkové množství z 1 000 ověřovaných pixelů v každé validační oblasti, které na základě provedené validace spadají do dané validační třídy. Relativní četnost specifikuje poměr počtu pixelů v dané validační třídě vzhledem k celkovému počtu ověřovaných pixelů ve validační oblasti, který je v tomto případě roven 1 000.

4. 2. 1. Oblast, v níž detekovali změnu Hansen i Potapov

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	202	20,2
1	110	11,0
2	7	0,7
5	359	35,9
6	78	7,8
7	244	24,4

Tabulka 6: Výsledky validace Hansena – oblast s detekcí změny Hansenem i Potapovem

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	203	20,3
1	107	10,7
2	3	0,3
5	291	29,1
6	47	4,7
7	348	34,8

Tabulka 7: Výsledky validace Potapova – oblast s detekcí změny Hansenem i Potapovem

Výsledky validace oblasti, v níž změny detekovali Hansen (tabulka 6) i Potapov (tabulka 7) ukazují, že detekované změny lesních porostů byly v obou ověřovaných databázích v souladu s vývojem vyplývajícím z archivních ortofotosnímků ČÚZK pouze ve 20 % ověřovacích bodů.

Jak ukazuje validační třída 5, v přibližně třetině ověřovacích bodů této validační oblasti byl na základě výsledků Hansena a Potapova vyhodnocen úbytek v pixelech, v nichž ortofotosnímky i po dvanácti letech zachycují setrvalý stav lesních ploch.

Nezanedbatelné množství ověřovacích bodů náleželo do oblastí, v nichž ve výstupech Hansena i Potapova došlo k překryvu vrstev detekovaného úbytku a přírůstku. Tato problematika bude náležitě diskutována níže.

4. 2. 2. Oblast, v níž detekoval změnu pouze Hansen

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	137	13,7
1	184	18,4
2	26	2,6
5	283	28,3
6	57	5,7
7	313	31,3

Tabulka 8: Výsledky validace Hansena – oblast s detekcí změny Hansenem

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	660	66
3	226	22,6
4	114	11,4

Tabulka 9: Výsledky validace Potapova – oblast s detekcí změny Hansenem

V oblasti, v níž detekoval změnu pouze Hansen, jím byl na základě výsledků validace (tabulka 8) správně určen vývoj lesních ploch v 13,7 % ověřovacích bodů. Oproti tomu u Potapova (tabulka 9), který v této oblasti v žádném z pixelů změnu nedetekoval, byl v 66 % ověřovacích bodů na základě vyhodnocení ortofotosnímků potvrzen nulový vývoj lesních ploch ve sledovaném období.

4. 2. 3. Oblast, v níž detekoval změnu pouze Potapov

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	723	72,3
3	152	15,2
4	125	12,5

Tabulka 10: Výsledky validace Hansen – oblast s detekcí změny Potapovem

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	94	9,4
1	208	20,8
2	15	1,5
5	118	11,8
6	25	2,5
7	540	54

Tabulka 11: Výsledky validace Potapova – oblast s detekcí změny Potapovem

V oblasti, v níž detekoval změnu pouze Potapov, jím byl na základě výsledků validace (tabulka 11) správně určen vývoj lesních ploch pouze v 9,4 % ověřovacích bodů. I poměrné zastoupení ostatních validačních tříd bylo výrazně ovlivněno skutečností, že u plných 54 % ověřovacích bodů v této oblasti došlo v databázi Potapova k překryvu detekovaného úbytku a přírůstku lesních ploch. Tato problematika bude náležitě diskutována níže.

Hansen, jenž v této oblasti v žádném z pixelů změnu nedetekoval, byly výsledky (tabulka 10) potvrzeny v 72,3 % ověřovacích bodů, což značí, že v pixelech, v nichž se výsledky sledovaných databází rozcházejí, opomenul méně změn než Potapov.

4. 2. 4. Oblast, v níž Hansen ani Potapov nedetkovali žádnou změnu

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	949	94,9
3	36	3,6
4	15	1,5

Tabulka 12: Výsledky Hansena a Potapova – oblast bez detekovaných změn

Jelikož v této sledované oblasti Hansen ani Potapov žádnou změnu lesních ploch nedetkovali, jsou jejich výsledky validace (tabulka 12) shodné. Ukazují vysokou shodu databází Hansena a Potapova vývojem lesních ploch dle ortofotosnímků, na základě kterých došlo k opomenutí detekce změn v ověřovaných pixelech pouze v 5,1 % případů.

4. 3. Statistické zpracování výsledků z pohledu detekovaných změn

Za účelem možnosti detailního zhodnocení přesnosti validovaných databází Hansena a Potapova bylo 4 000 ověřovacích bodů, v nichž proběhla validace, analyzováno pro oba autory také jednotlivě na základě jimi určených změn.

Absolutní četnost udává celkové množství ze 4 000 ověřovaných pixelů v každé z databází, ve kterých Hansen či Potapov detekovali určitý typ změny (přírůstek / úbytek / beze změny / překryv přírůstku a úbytku). Relativní četnost specifikuje poměr absolutní četnosti pixelů v dané validační třídě vzhledem k celkovému součtu absolutních četností pixelů v dané tabulce.

4. 3. 1. Hansen – detekce přírůstku

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	140	30,4
1	290	63,0
2	30	6,5

Tabulka 13: Výsledky validace Hansena – pixely s detekovaným přírůstkem

Jak vyplývá z tabulky 13, v ověřovacích bodech, v nichž Hansen detekoval přírůstek, se jeho výsledky shodují s vývojem lesních ploch dle ortofotosnímků přibližně ve 30 % případech. V 65 % případech na základě ortofotosnímků v daných pixelech panoval setrvalý stav, v 6,5 % pak nastal dokonce úbytek.

4. 3. 2. Potapov – detekce přírůstku

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	107	24,3
1	314	71,4
2	19	4,3

Tabulka 14: Výsledky validace Potapova – pixely s detekovaným přírůstkem

Jak vyplývá z tabulky 14, v ověřovacích bodech, v nichž Potapov detekoval přírůstek, se jeho výsledky shodují s vývojem lesních ploch dle ortofotosnímků přibližně ve 24 % případech. V 71 % případech na základě ortofotosnímků v daných pixelech panoval setrvalý stav, ve 4 % pak nastal dokonce úbytek. Ve srovnání s Hansenem tak Potapov častěji klasifikoval přírůstek v oblastech beze změny, o poznání méně frekventovaně pak docházelo k vyhodnocení přírůstku v pixelech, v nichž dle ortofotosnímků nastal úbytek.

4. 3. 3. Hansen – detekce úbytku

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	201	20,5
5	644	65,6
6	137	14,0

Tabulka 15: Výsledky validace Hansena – pixely s detekovaným úbytkem

Jak vyplývá z tabulky 15, v ověřovacích bodech, v nichž Hansen detekoval úbytek, se jeho výsledky shodují s vývojem lesních ploch dle ortofotosnímků přibližně ve 20 % případech. V 66 % případech na základě ortofotosnímků v daných pixelech panoval setrvalý stav, v 14 % pak nastal dokonce přírůstek. Výsledky validace tak ukazují, že Hansen dokázal detekovat přírůstek s vyšší přesností než úbytek.

4. 3. 4. Potapov – detekce úbytku

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	193	28,4
5	414	60,9
6	73	10,7

Tabulka 16: Výsledky validace Potapova – pixely s detekovaným úbytkem

Jak vyplývá z tabulky 16, v ověřovacích bodech, v nichž Potapov detekoval úbytek, se jeho výsledky shodují s vývojem lesních ploch dle ortofotosnímků přibližně ve 28 % případech. V 61 % případech na základě ortofotosnímků v daných pixelech panoval setrvalý stav, v 11 % pak nastal dokonce přírůstek. Výsledky validace tak ukazují, že úbytek dokázal Potapov detekovat s vyšší přesností než Hansen.

4. 3. 5. Hansen – oblasti bez detekovaných změn

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	1672	83,6
3	188	9,4
4	140	7

Tabulka 17: Výsledky validace Hansena – pixely bez detekované změny

Jak vyplývá z tabulky 17, pixely, v nichž Hansen nedetekoval žádnou změnu, odpovídají vývoji lesních ploch dle ortofotosnímků v 83,6 % případech. K opomenutí změn došlo v 16,4 % ověřovacích bodů, zatímco na základě tabulky č. 4 došlo v 23,4 % ověřovacích bodů k detekci změn v pixelech, kde na základě ortofotosnímků k žádnému vývoji lesních ploch nedošlo. Tato skutečnost nabádá ke konstatování, že aplikovaný Hansenův model detekce změn má spíše tendenci vyhodnocovat změny v místech, v nichž k žádné změně nedošlo, namísto toho, aby některé proběhlé změny opomíjel.

4. 3. 6. Potapov – oblasti bez detekovaných změn

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
0	1609	80,5
3	262	13,1
4	129	6,5

Tabulka 18: Výsledky validace Potapova – pixely bez detekované změny

Jak vyplývá z tabulky 18, pixely, v nichž Potapov nedetekoval žádnou změnu, odpovídají vývoji lesních ploch dle ortofotosnímků v 80,5 % případů. K opomenutí změn došlo v 19,6 % ověřovacích bodů, zatímco na základě tabulky č. 5 došlo v 18,5 % ověřovacích bodů k detekci změn v pixelech, kde na základě ortofotosnímků k žádnému vývoji lesních ploch nedošlo. Na rozdíl od výsledků Hansena je tak u Potapova vyrovnaný poměr opomenutých změn a vyhodnocených změn v pixelech, v nichž k žádné změně nedošlo.

4. 3. 7. Oblasti s překryvem detekovaného přírůstku a úbytku

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
-1	73	13,1
0	356	63,8
1	129	23,1

Tabulka 19: Výsledek validace Hansena – překryv detekovaného přírůstku a úbytku

Třída	Absolutní četnost	Relativní četnost (%)
-1	110	12,5
0	620	70,4
1	150	17,0

Tabulka 20: Výsledek validace Potapova – překryv detekovaného přírůstku a úbytku

Jak již bylo zmíněno dříve, u nemalého počtu ověřovacích bodů dochází jak ve výstupech Hansena, tak Potapova, k překryvu detekovaných přírůstků a úbytků lesních ploch. Právě vzhledem k četnosti překryvů nabývá na důležitosti správná interpretace tohoto jevu.

V zásadě se nabízí dvě hypotézy, kterými lze vysvětlit vznik překryvu detekovaného přírůstku a úbytku detekovaných ploch. Pro jejich vysvětlení je nutno se vrátit k metodice výzkumů Hansena a Potapova.

Ohledně první hypotézy je zásadní zmínit, že oba autoři přistupovali k detekci přírůstku a úbytku zcela odděleně. Jejich výstupy tedy obsahují zvlášť vrstvu detekovaných přírůstků a zvlášť vrstvu detekovaných úbytků. Rovněž Potapovova validace ověřovala jednotlivé vrstvy zvlášť a nikoliv komplexně, jako je cílem této práce. Je tedy otázkou, zda nastavená metodika detekce změn, která se pro zjišťování přírůstků a úbytků lišila, nemohla v jistém množství pixelů produkovat kladné výsledky jak pro úbytek, tak pro přírůstek. Tuto hypotézu chybného určení přírůstku či úbytku v jedné z analýz podporuje i zjištěná celková přesnost detekce změn během validace prostřednictvím ortofotosnímků, která nachází v ověřovaných databázích velké množství nepřesností.

Druhá hypotéza vychází z principu zjišťování přírůstku a úbytku ve výzkumu Hansena a Potapova. Zatímco přírůstek je u lesů mírného pásu kontinuálním jevem a nebyla určována jeho přesná datace, u úbytku se Hansen snažil určit konkrétní rok, ve kterém ke ztrátě lesní plochy došlo, a Potapov měl ve svém výstupu rozdělenou vrstvu úbytku na dvě období (2001–2006 a 2007–2012). Tato skutečnost nabízí vysvětlení vzniku překryvu tím způsobem, že v období 2000–2012 mohlo dojít nejprve k úbytku lesních ploch a následně k přírůstku (či naopak) a oba tyto jevy byly mapováním Hansena a Potapova zachyceny.

Tuto hypotézu ovšem proběhlá validace s vysokou pravděpodobností vylučuje. Jak vyplývá z tabulky 19 a tabulky 20, v nadpoloviční většině pixelů, ve kterých u Hansena či Potapova došlo k překryvu detekovaných přírůstků a úbytků, dle ortofotosnímků ve sledovaném období k žádné změně nedošlo. Lze samozřejmě namítnout, že vzhledem k tomu, že při validaci bylo vycházeno pouze z ortofotosnímků z let 2000 a 2012, tak nemůžeme s jistotou určit, co se v analyzovaném území událo v období mezi těmito roky.

Na základě detailní vizuální interpretace ortofotosnímků lze ovšem pro drtivou většinu pixelů, pro něž bylo konstatováno, že v nich k žádné změně nedošlo, tvrdit, že v těchto pixelech k žádným změnám nedocházelo ani v celém průběhu sledovaného období. Je totiž krajně nepravděpodobné, v mnoha případech dokonce i zcela nemožné, aby

v průběhu dvanácti let na místě prokazatelně hustého lesa v případě jeho vykácení vyrostl neméně hustý stromový porost. V opačném, rovněž nesmírně frekventovaném případě, bychom pro potvrzení druhé hypotézy byli nuceni připustit, že na obhospodávaném poli v horizontu dvanácti let vyrostl les, který byl následně pokácen, a na jeho ploše byly opět vysazeny zemědělské plodiny. Nezřídka docházelo k překryvu detekovaných přírůstků a úbytků i v zastavěných plochách a těmto specifickým případům bude věnován prostor v diskuzi.

Na základě výše uvedených argumentů se jeví jako pravděpodobnější první hypotéza předpokládající skutečnost, že k současné detekci přírůstku a úbytku v témže pixelu mohlo docházet u Hansena i Potapova v drtivé většině případů chybně.

4. 4. Srovnání výsledků Hansena a Potapova

Ke srovnání přesnosti výsledků Hansena a Potapova byly využity hodnoty získané statistickým zpracováním výsledků. Srovnání proběhlo v sedmi srovnávacích kategoriích:

- Podíl shody v oblasti shodné detekce změn
 - Pro Hansena i Potapova udává relativní četnost ověřovacích bodů spadajících do validační třídy 0 ve validační oblasti, v níž detekovali změnu lesních ploch Hansen i Potapov (kapitola 4. 2. 1.)
- Podíl shody v oblasti rozdílné detekce změn
 - Pro Hansena udává relativní četnost ověřovacích bodů spadajících do validační třídy 0 ve validační oblasti, v níž detekoval změnu lesních ploch pouze Hansen (kapitola 4. 2. 2.)
 - Pro Potapova udává relativní četnost ověřovacích bodů spadajících do validační třídy 0 ve validační oblasti, v níž detekoval změnu lesních ploch pouze Potapov (kapitola 4. 2. 3.)
- Podíl shody v pixelech bez detekované změny
 - Pro Hansena i Potapova udává relativní četnost ověřovacích bodů spadajících do validační třídy 0 v oblastech, ve kterých jimi nebyla detekována žádná změna (kapitola 4. 3. 5.)
- Podíl shody v pixelech s detekovaným přírůstkem
 - Pro Hansena udává relativní četnost ověřovacích bodů spadajících do validační třídy 0 v pixelech, ve kterých jím byl detekován přírůstek (kapitola 4. 3. 1.)
 - Pro Potapova udává relativní četnost ověřovacích bodů spadajících do validační třídy 0 v pixelech, ve kterých jím byl detekován přírůstek (kapitola 4. 3. 2.)
- Podíl shody v pixelech s detekovaným úbytkem
 - Pro Hansena udává relativní četnost ověřovacích bodů spadajících do validační třídy 0 v pixelech, ve kterých jím byl detekován úbytek (kapitola 4. 3. 3.)
 - Pro Potapova udává relativní četnost ověřovacích bodů spadajících do validační třídy 0 v pixelech, ve kterých jím byl detekován úbytek (kapitola 4. 3. 4.)
- Podíl ověřovacích bodů s překryvem přírůstku a úbytku

- Pro Hansena i Potapova udává relativní četnost pixelů, ve kterých došlo v jejich databázích změn k překryvu detekovaného přírůstku a úbytku (kapitola 4. 3. 7.)
- Souhrnný podíl shody ve validovaných pixelech
 - Pro Hansena i Potapova udává souhrnnou relativní četnost ověřovacích bodů spadajících do validační třídy 0 (kapitola 4. 1.)

Srovnávány byly relativní četnosti ověřovacích bodů spadajících do validační třídy 0 v jednotlivých srovnávacích kategoriích. Cílem srovnání tudíž bylo posouzení, v kolika procentech daných srovnávacích tříd dokázali Hansen a Potapov detekovat typ změny lesních ploch v souladu s výsledky validace.

Kategorie	Hansen	Potapov
Podíl shody v oblasti shodné detekce změn	20,2 %	20,3 %
Podíl shody v oblasti rozdílné detekce změn	13,7 %	9,4 %
Podíl shody v pixelech bez detekované změny	83,6 %	80,5 %
Podíl shody v pixelech s detekovaným přírůstkem	30,4 %	24,3 %
Podíl shody v pixelech s detekovaným úbytkem	20,5 %	28,4 %
Podíl ověřovacích bodů s překryvem přírůstku a úbytku	13,9 %	22,0 %
Souhrnný podíl shody ve validovaných pixelech	50,3 %	47,4 %

Tabulka 21: Srovnání výsledků Hansena a Potapova

Na základě shrnutí výše uvedených výsledků v tabulce 21 lze konstatovat, že Hansen souhrnně dosahuje mírně přesnějších výsledků než Potapov. Je ovšem na místě zmínit, že Potapov dosahuje vyšší přesnosti při detekci úbytků, avšak současně má také výrazně vyšší podíl pixelů, v nichž došlo k překryvu detekovaných úbytků a přírůstků.

Celková přesnost výsledků obou autorů je oproti původním předpokladům relativně nízká. Pozitivně lze hodnotit pouze vysokou míru shody v oblastech, v nichž Hansen a Potapov žádnou změnu nedetekovali. Na základě toho lze konstatovat, že dle výsledků validace na území České republiky došlo k zachycení většiny proběhlých změn lesních ploch, byť současně byly detekovány změny i v oblastech, kde dle ortofotosnímků k žádným změnám nedošlo, či dokonce byly autory detekovány změny opačného charakteru. K těmto omylům došlo u Hansena v 4,2 % ověřovacích bodů, u Potapova pak pouze v 2,3 % ověřovacích bodů.

Rozpor validace provedené v této práci s vlastní validací Potapova (viz kapitola 3. 1. 3. 2.) lze vysvětlit skutečností, že Potapov se ve své validaci zabýval pouze vybranými opuštěnými zemědělskými regiony evropské části Ruska, které pravděpodobně ve srovnání s lesy České republiky nabízí o poznání jiné typy lesních porostů.

Snížení souhrnného podílu shody výsledků Hansena a Potapova přinesla rovněž záměrně zvolená metodika validace, díky níž polovina ověřovacích bodů ležela právě v oblastech, ve kterých se detekované změny jednotlivých srovnávaných databází lišily.

KAPITOLA 5

Diskuze

Validace databází detekce změn lesních ploch Hansena a Potapova byla provedena s přihlédnutím k jejich specifickým prvkům nastavené metodiky. Bylo předpokládáno, že přesnost ověřovaných databází by mohl negativně ovlivnit Hansenův téměř neobjasněný proces zjišťování výšky vzrostlé vegetace a Potapovova metodika založená na procentuálním pokrytí pixelů korunami stromů. Pojetí obou autorů v sobě skrývala mnohá úskalí. Při porovnání s globálně užívanými definicemi lesa u Hansena hrozila klasifikace sadů jakožto lesních ploch, u Potapova, jenž naopak výšku nezohledňoval, kupříkladu záměna hustých křovin za lesy.

Jak ale validace ukázala, nepřesnosti ověřovaných databází nespočívaly pouze v těchto detailech. Bylo zcela běžnou praxí, že u obou autorů docházelo k detekci změn lesů uprostřed luk či zemědělsky trvale obdělávaných ploch. Je neoddiskutovatelné, že při rozmanitosti existujících lesních typů je velmi komplikované nastavit jednotnou metodiku pro detekci změn lesních ploch na kontinentální či globální úrovni tak, aby bylo dosaženo uspokojivé přesnosti. I přes tuto skutečnost je ale nutno konstatovat, že přinejmenším na území České republiky docházelo u Hansena i Potapova k časté chybné detekci změn. Vzhledem k jejich charakteru lze tvrdit, že primární problém momentálně netkví v rozličnosti pojetí definice lesa, nýbrž v samotné klasifikaci lesních ploch.

Je na místě zmínit, že k nejzávažnějším chybám v detekci změn lesních ploch docházelo v oblastech, v nichž se výsledky ověřovaných databází lišily. Lze ovšem vyzdvihnout vysokou míru shody s ortofotosnímky v oblastech, kde Hansen i Potapov shodně žádnou změnu nezaznamenali. Na druhou stranu přesnost detekce změn v oblastech, ve kterých změnu (mnohdy opačného charakteru) detekovali oba autoři, byla nižší, než bylo očekáváno.

Příčinou vysokého počtu zjištěných chyb může být značná odlišnost metodiky výzkumů Hansena a Potapova a aplikované metodiky validace. Zásadní odlišnost spočívá ve skutečnosti, že zatímco detekce změn ve výzkumech obou autorů probíhala na základě automatizovaných algoritmů, během validace byly jednotlivé pixely vizuálně interpretovány. Ačkoliv vizuální interpretace je ze své podstaty subjektivní metodou, nutno konstatovat, že ortofotosnímky díky svému vysokému rozlišení zachycují reálný stav krajiny ve velmi dobré kvalitě. To umožnilo v rámci možností maximálně objektivní

vyhodnocení vývoje lesních ploch ve sledovaném období, který ovšem v mnoha případech byl v rozporu se závěry Hansena či Potapova.

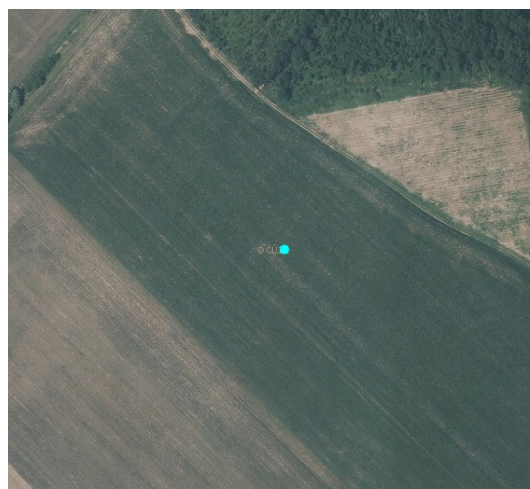
V průběhu validace byla zaznamenána i řada specifických případů vycházejících pravděpodobně z chybné klasifikace lesa. Tyto případy jsou ilustrovány v kapitole 5. 1.

5. 1. Ilustrace frekventovaných případů chybné detekce změn

5. 1. 1. Záměna lesa a zemědělských ploch



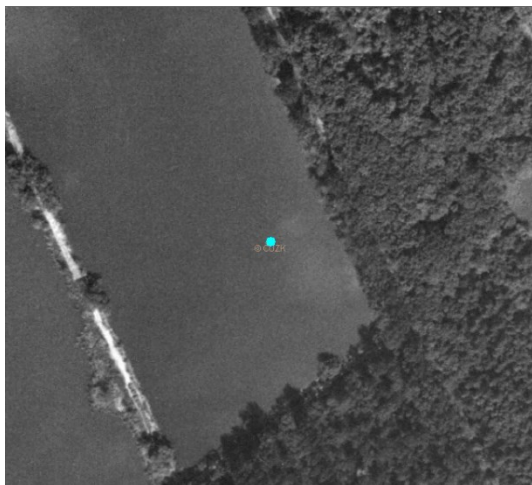
Obrázek 2: Ověřovací bod ID 3328 – rok 2000



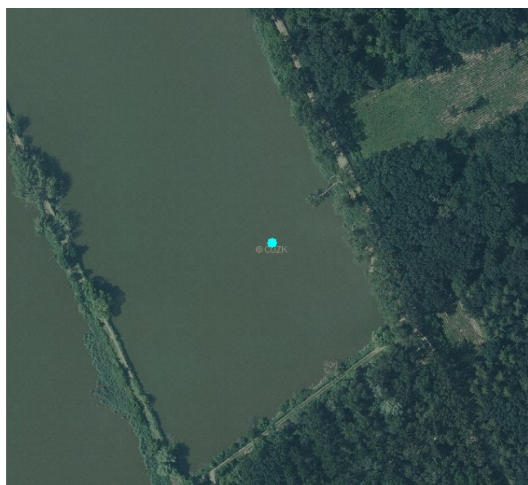
Obrázek 3: Ověřovací bod ID 3328 – rok 2012

K ilustraci chybné klasifikace lesa namísto zemědělské plochy byl využit ověřovací bod ID 3328. V pixelu, do něhož tento ověřovací bod náleží, Hansen i Potapov detekovali úbytek lesních ploch.

5. 1. 2. Záměna lesa a vodních ploch



Obrázek 4: Ověřovací bod ID 3306 – rok 2000



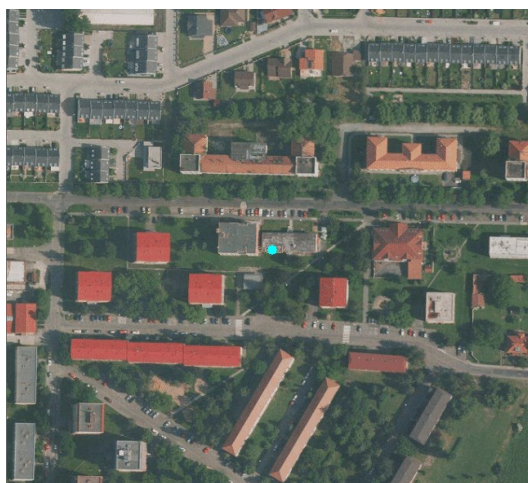
Obrázek 5: Ověřovací bod ID 3306 – rok 2012

K ilustraci chybné klasifikace lesa namísto vodní plochy byl využit ověřovací bod ID 3306. V pixelu, do něhož tento ověřovací bod náleží, Hansen i Potapov detekovali úbytek lesních ploch.

5. 1. 3. Záměna lesa a urbánních ploch



Obrázek 6: Ověřovací bod ID 2835 – rok 2000



Obrázek 7: Ověřovací bod ID 2835 – rok 2012

K ilustraci chybné klasifikace lesa namísto urbánní plochy byl využit ověřovací bod ID 2835. V pixelu, do něhož tento ověřovací bod náleží, dle Hansena došlo k úbytku lesních ploch, Potapov zde správně žádnou změnu nedetekoval.

5. 2. Ilustrace ojedinělých případů chybné detekce změn

5. 2. 1. Záměna lesa a povrchového dolu



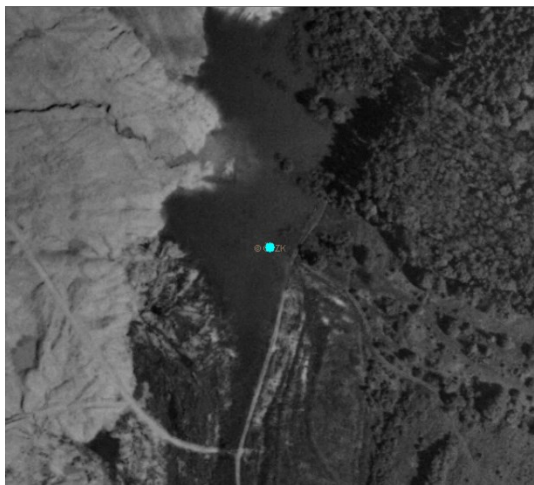
Obrázek 8: Ověřovací bod ID 3212 – rok 2000



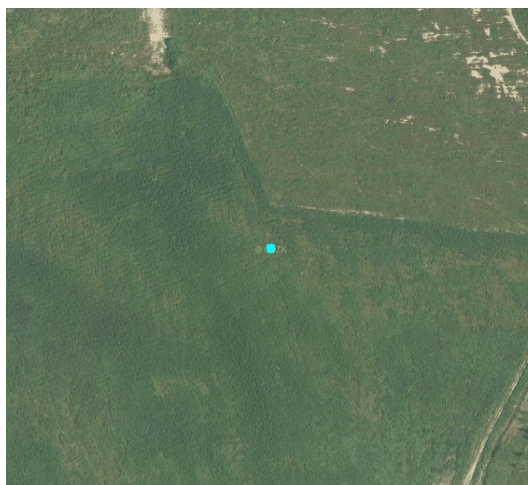
Obrázek 9: Ověřovací bod ID 3212 – rok 2012

K ilustraci chybné klasifikace lesa namísto povrchového dolu byl využit ověřovací bod ID 3212. V pixelu, do něhož tento ověřovací bod náleží, Hansen i Potapov detekovali přírůstek lesních ploch.

5. 2. 2. Chybná interpretace revitalizace povrchového dolu



Obrázek 10: Ověřovací bod ID 2965 – rok 2000



Obrázek 11: Ověřovací bod ID 2965 – rok 2012

K ilustraci chybné interpretace revitalizace povrchového dolu byl využit ověřovací bod ID 2965. V pixelu, do něhož tento ověřovací bod náleží, došlo v průběhu dvanácti let k revitalizaci lomu, jenž byl zarovnan a zatravněn. Hansen zde detekoval úbytek lesních ploch, Potapov z pohledu svého výzkumu správně žádnou změnu nezaznamenal.

5. 2. 3. Chybná interpretace vzniku vodní plochy



Obrázek 12: Ověřovací bod ID 1284 – rok 2000



Obrázek 13: Ověřovací bod ID 1284 – rok 2012

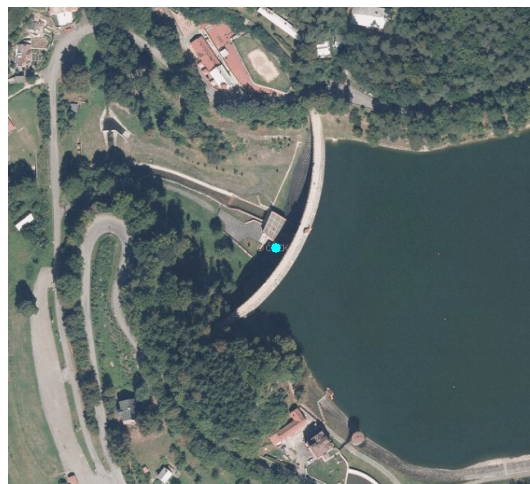
K ilustraci chybné interpretace vzniku vodní plochy byl využit ověřovací bod ID 1284. V pixelu, do něhož tento ověřovací bod náleží, došlo v průběhu dvanácti let k vzniku

vodní plochy. Zatímco Hansen zde žádnou změnu nezaznamenal, Potapov detekoval přírůstek lesních ploch.

5. 2. 4. Záměna lesa a přehradní hráze



Obrázek 14: Ověřovací bod ID 3131 – rok 2000



Obrázek 15: Ověřovací bod ID 3131 – rok 2012

K ilustraci chybné klasifikace lesa namísto přehradní hráze byl využit ověřovací bod ID 3131. V pixelu, do něhož tento ověřovací bod náleží, Hansen i Potapov detekovali přírůstek lesních ploch.

KAPITOLA 6

Závěr

Detekce změn lesních ploch je v současnosti aktivně rozvíjejícím se geoinformačním odvětvím disponujícím potenciálem přinášet velmi cenné informace o vývoji lesního pokryvu v čase. Nejvýznamnějších výsledků v této oblasti v posledních letech dosáhli Hansen a Potapov. Jejich databáze vývoje lesního pokryvu jsou unikátní velikostí analyzovaného území, což ovšem s sebou přináší řadu problémů. Z toho důvodu je nutné vzniklé databáze podrobně validovat za účelem jejich budoucího zdokonalení.

Cílem této práce bylo ověření detekovaných změn Hansena a Potapova na území České republiky v období let 2000–2012, které je sledováno oběma zmíněnými autory. Zvolená metodika validace s využitím archivních ortofotosnímků ČÚZK se ukázala býti efektivní, neboť jejím prostřednictvím bylo nalezeno nemalé množství nepřesností.

Tyto nepřesnosti oproti původnímu očekávání ve většině případů nepramenily z Hansenovy problematické definice lesa, kterou již ve své validaci diskutoval Tropek (2014). Jak se totiž ukázalo, chyby v četných případech pramenily z chybného vymezení lesních porostů při klasifikaci.

Zvýšení přesnosti budoucích výzkumů by mělo napomoci primárně zdokonalení klasifikačních algoritmů, které by eliminovalo možnost detekce změn na trvale užívaných zemědělských plochách, ve vodě či v zastavěných oblastech. Až následně by měla být řešena problematika zdokonalení definice lesa, po jejíž aplikaci by na křoviny či sady nemělo být nahlíženo jako na lesní plochy.

Vzhledem k typologicky analogickým nedostatkům validovaných databází lze jen doporučit další spolupráci Hansena a Potapova. Jelikož zejména v oblastech, v nichž se výsledky validovaných databází rozcházejí, zpravidla dokázal jeden z autorů detekovat nastalou změnu správně, tak by vzájemná výměna informací měla být přínosem ve snaze o další zlepšení.

S přihlédnutím ke globální rozmanitosti typů lesa lze závěrem doporučit obdobnou validaci databází Hansena a Potapova i pro další jimi analyzovaná území.

SEZNAM LITERATURY A ZDROJŮ

ARCDATA (2013): Administrativní členění a socioekonomické údaje: geodatabáze verze 3.3. Arcdata Praha. [cit. 2017-07-28]. Dostupné z:

<https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-500>

ARSANJANI, Jamal Jokar, SEE, Linda a Amin TAYYEBI. Assessing the suitability of GlobeLand30 for mapping land cover in Germany. *International Journal of Digital Earth*. 2016, 9(9) 873-891.

ARSANJANI, Jamal Jokar; TAYYEBI, Amin a Eric VAZ. GlobeLand30 as an alternative fine-scale global land cover map: Challenges, possibilities, and implications for developing countries. *Habitat International*. 2016, 55, 25-31.

BROICH, M. a kol. Time-series analysis of multi-resolution optical imagery for quantifying forest cover loss in Sumatra and Kalimantan, Indonesia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2011, 13, 277–291.

CACCETTA, P. A a kol. Continental monitoring: 34 years of land cover change using Landsat imagery. 32nd International Symposium on Remote Sensing of Environment, June 25–29, 2007, San José, Costa Rica. 2007.

COLLINS, John B. a Curtis E. WOODCOCK. An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data. *Remote sensing of environment*. 1996, 56(1), 66-77.

COPPIN, Pol R. a Marvin E BAUER. Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote sensing reviews*. 1996, 13(3-4), 207-234.

DEER, Peter. *Digital change detection techniques in remote sensing*. 1995.

DESCLÉE, Baudouin, Patrick BOGAERT a Pierre DEFOURNY. Forest change detection by statistical object-based method. *Remote Sensing of Environment*. 2006, 102(1), 1-11.

DU, Yong, Philippe M. TEILLET a Josef CIHLÁŘ. Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection. *Remote sensing of Environment*. 2002, 82(1), 123-134.

ESRI 2015. *ArcGIS Desktop: Release 10. 3. 1*. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

FAJT, Jaromír. Geometrické transformace v GIS [online]. Plzeň, 2005 [cit. 2017-07-29].

Dostupné z:

<http://old.gis.zcu.cz/studium/ugi/referaty/05/GeometrickeTransformace/index.html>.

FAO: Food and Agriculture Organisation of the United Nations [online]. [cit. 2017-07-28].

Dostupné z: <http://www.fao.org>

FUNG, Tung. An assessment of TM imagery for land-cover change detection. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1990, 28(4), 681-684.

GREEN, Kass, Dick KEMPKA a Lisa LACKLEY. Using remote sensing to detect and monitor land-cover and land-use change. *Photogrammetric engineering and remote sensing*. 1994, 60(3), 331-337.

HANSEN, Matthew C. a kol. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*. 2013, 342(6160), 850-853.

HANSEN, Matthew C. a Thomas R LOVELAND. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote sensing of Environment*. 2012, 122, 66-74.

HANSEN, Matthew C., Stephen V. STEHMAN a Peter V. POTAPOV. Quantification of global gross forest cover loss. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2010, 107(19), 8650-8655.

HENEBRY, Geoffrey M. Detecting change in grasslands using measures of spatial dependence with Landsat TM data. *Remote sensing of environment*. 1993, 46(2), 223-234.

HARPER, G. J. a kol. Fifty years of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Environmental Conservation*. 2007, 34, 1-9.

HESTER, D. B. High-resolution land cover change detection based on fuzzy uncertainty analysis and change reasoning. *International Journal of Remote Sensing*. 2010, 31(2), 455-475.

JOHNSON, D. M. a MUELLER, R. The 2009 cropland data layer. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2009, 11, 1201–1205.

KILLEEN, T. J. a kol. Thirty years of land-cover change in Bolivia. *Ambio*. 2007, 36, 600–606.

KRYLOV, Vladimir A. a kol. Change detection with synthetic aperture radar images by Wilcoxon statistic likelihood ratio test. *Image Processing (ICIP), 2012 19th IEEE International Conference on. IEEE, 2012, 2093-2096.*

LAMBIN, Eric F. a Alan H. STRAHLERS. Change-vector analysis in multitemporal space: a tool to detect and categorize land-cover change processes using high temporal-resolution satellite data. *Remote sensing of environment*. 1994, 48(2), 231-244.

LAMBIN, Eric F. a Alan H. STRAHLERS. Remotely-sensed indicators of land-cover change for multitemporal change-vector analysis. *International Journal of Remote Sensing*. 1994, 15(10), 2099-2119.

LAWRENCE, Rick L. a William J. RIPPLE. Calculating change curves for multitemporal satellite imagery: Mount St. Helens 1980–1995. *Remote sensing of environment*. 1999, 67(3), 309-319.

LO, C. P. a R. L. SHIPMAN. A GIS approach to land-use change dynamics detection. *PE&RS, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 1990, 56(1), 1483-1491.

LUND, Jens Friis a Thorsten TREUE. Are we getting there? Evidence of decentralized forest management from the Tanzanian Miombo woodlands. *World development*. 2008, 36(12), 2780-2800.

LUNETTA, Ross S. Land-cover change detection using multi-temporal MODIS NDVI data. *Remote sensing of Environment*. 2006, 105(2), 142-154.

MANAKOS, Ioannis a kol. Validation and Inter-Comparison of Spaceborne Derived Global and Continental Land Cover Products for the Mediterranean Region: The Case of Thessaly. *Land*. 2017, 6(2) 34.

MASEK, Jeff G. a kol. North American forest disturbance mapping from a decadal Landsat record. *Remote Sensing of Environment*. 2008, 112(6), 2914–2926.

MAYAUX, Philippe a kol. Validation of the Global Land Cover 2000 Map. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006, 44(7) 1728-1739.

MLOK: Malý ochranný kruh. *Lesy*. [online]. 2004 [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <http://mlok.czechian.net/temata/lesy/lesy.pdf>

MORISSETTE, Jeffrey T., S. KHORRAM a T. MACE. Land-cover change detection enhanced with generalized linear models. *International journal of remote sensing*. 1999, 20(14), 2703-2721.

PENGR, Bruce a kol. A global reference database from very high resolution commercial satellite data and methodology for application to Landsat derived 30m continuous field tree cover data. *Remote Sensing of Environment*. 2015, 165, 234-248.

POTAPOV, Peter V. a kol. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive. *Remote Sensing of Environment*. 2015, 159, 28-43.

POTAPOV, Peter V. a kol. Change mapping using Landsat data composites for European Russia. *Remote Sensing of Environment*. 2011, 115, 548–561.

READ, Jane M. a N. S.-N. LAM. Spatial methods for characterising land cover and detecting land-cover changes for the tropics. *International Journal of Remote Sensing*. 2002, 23(12), 2457-2474.

RIDD, Merrill K. a Jiajun LIU. A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment. *Remote sensing of environment*. 1998, 63(2), 95-100.

SHIMABUKURO, Yosio E. a kol. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat Thematic Mapper images of the Amazon region. *International Journal of Remote Sensing*. 1998, 19(3) 535-541.

STEHMAN, Stephen V. a kol. A global land-cover validation data set, II: Augmenting a stratified sampling design to estimate accuracy by region and land-cover class. *International Journal of Remote Sensing*. 2012, 33(22) 6975-6993.

STRAHLER, Alan H. a kol. Global land cover validation: Recommendations for evaluation and accuracy assessment of global land cover maps. European Communities, Luxembourg, 2006, 51(4).

TIEDE, Dirk. A new geospatial overlay method for the analysis and visualization of spatial change patterns using object-oriented data modeling concepts. *Cartography and geographic information science*. 2014, 41(3), 227-234.

TROPEK, Robert. a kol. Comment on "High-resolution global maps of 21st-century forest cover change". *Science*. 2014, 344(6187), 981-981.

UNEP: Vital forest graphics. Nairobi, Kenya, c2009. ISBN 978-92-807-2903-0.

USDA Forest Service. Forest Inventory and Analysis National Program: International definitions of forest. [online]. 2010 [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: [http://www.fia.fs.fed.us/documents/pdfs/Guide 2-Forest definitions- a global view.pdf](http://www.fia.fs.fed.us/documents/pdfs/Guide%20Forest%20definitions-a%20global%20view.pdf)

WANG, Fangju. A knowledge-based vision system for detecting land changes at urban fringes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1993, 31(1), 136-145.

WEIGEL, Marlene. U·X·L encyclopedia of biomes. Detroit: U·X·L, c2000. ISBN 0-7876-3733-5.

XIAN, George a Collin HOMER. Updating the 2001 National Land Cover Database impervious surface products to 2006 using Landsat imagery change detection methods. *Remote Sensing of Environment*. 2010, 114(8) 1676-1686.

YUE, Tian Xiang. A curve-theorem based approach for change detection and its application to Yellow River Delta. *International journal of remote sensing*. 2002, 23(11), 2283-2292.

ZHAN, X. Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. *Remote Sensing of Environment*. 2002, 83(1), 336-350.

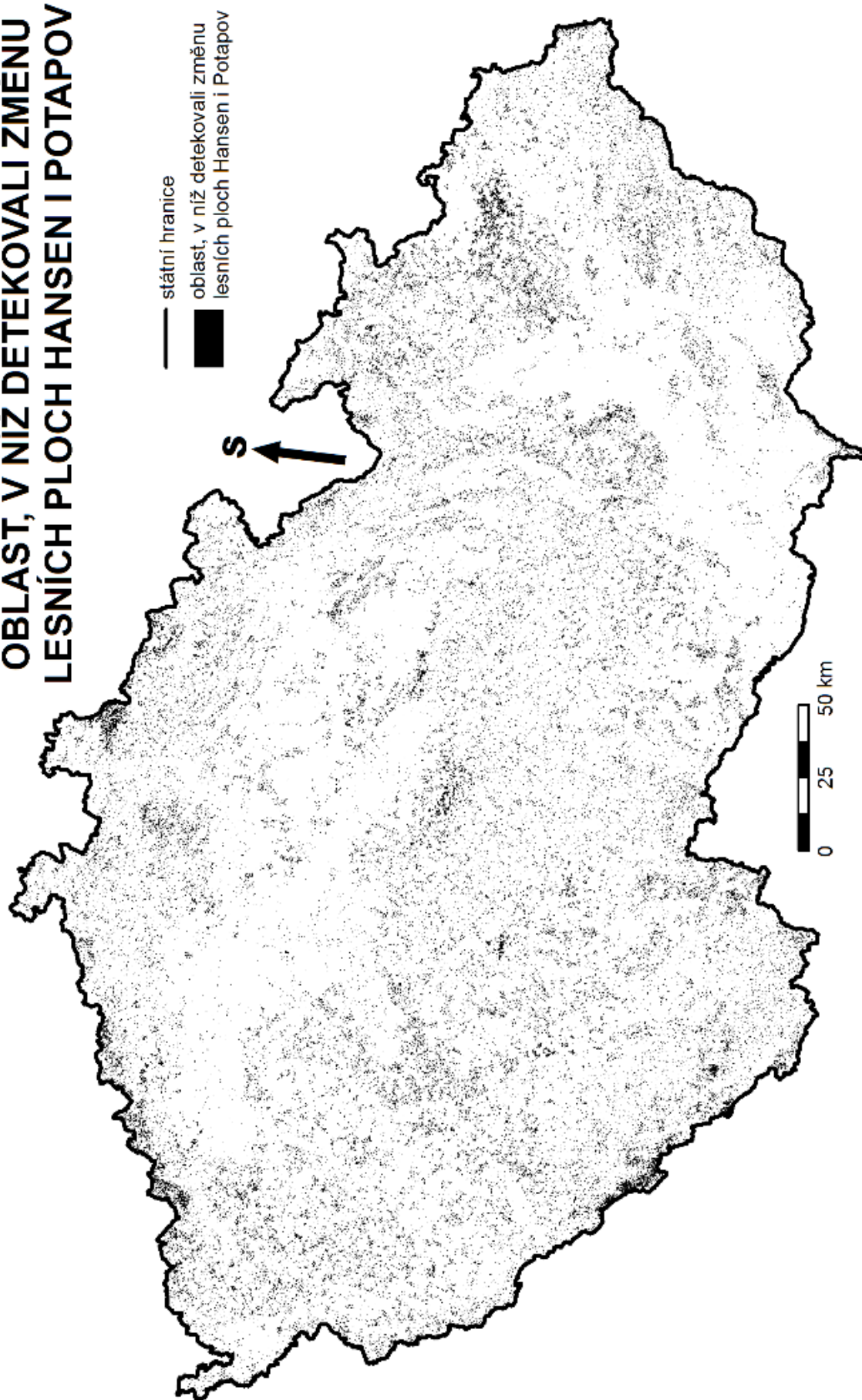
.

SEZNAM PŘÍLOH

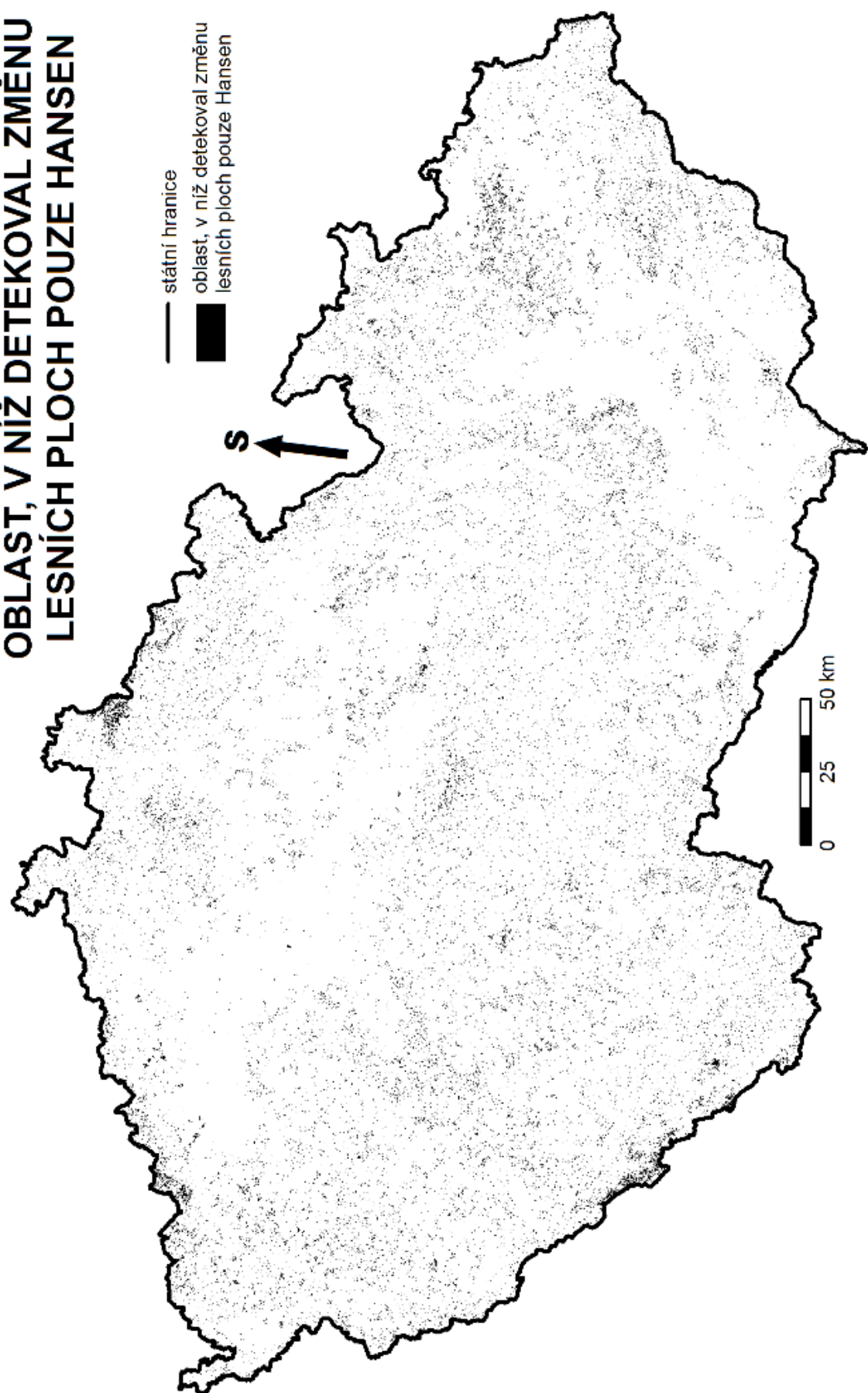
Příloha 1: Vizualizace validačních oblastí.....	62
Příloha 2: Obsah přiloženého CD.....	66

Příloha 1: Vizualizace validačních oblastí

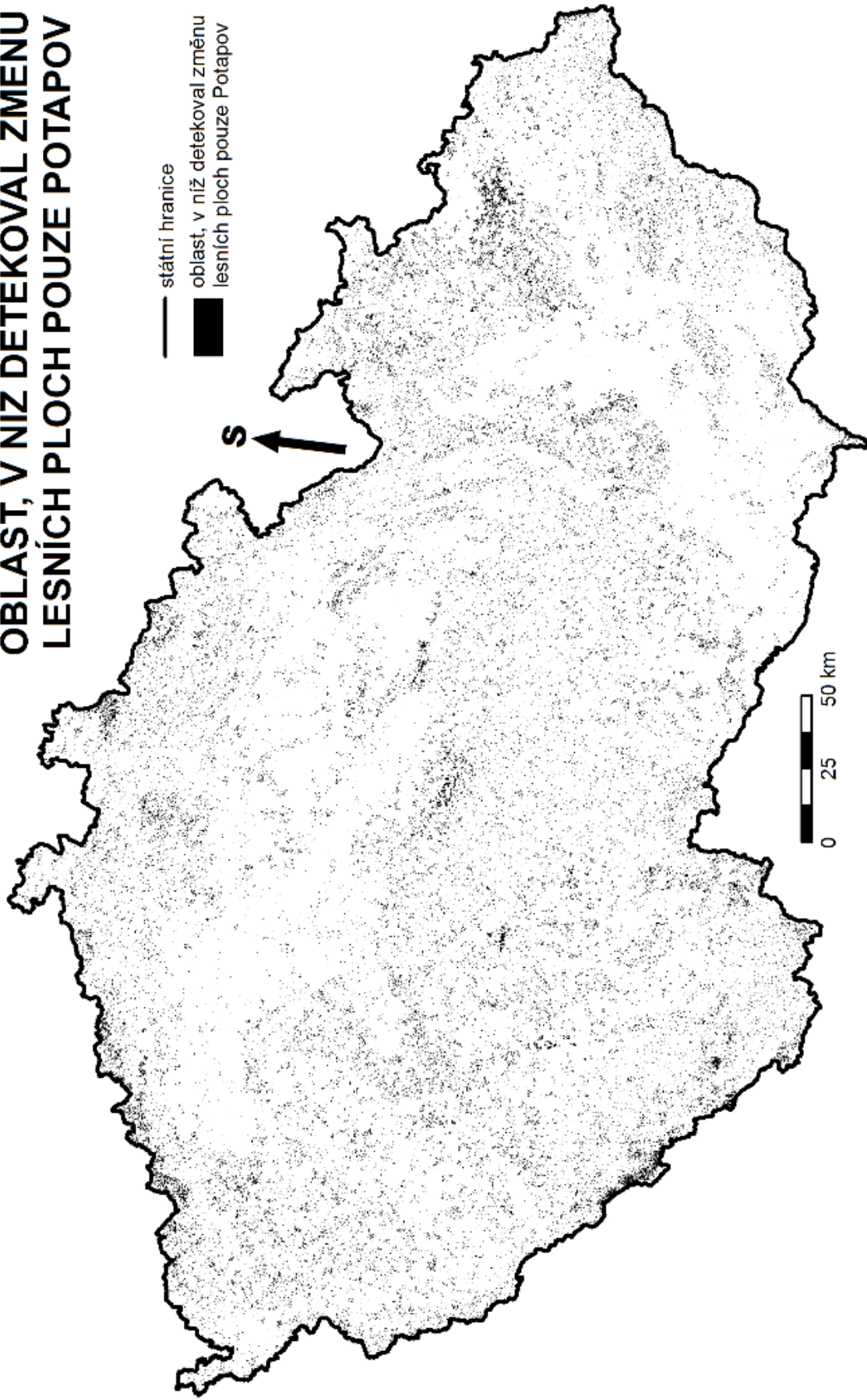
OBLAST, V NÍŽ DETEKOVALI ZMĚNU LESNÍCH PLOCH HANSEN I POTAPOV



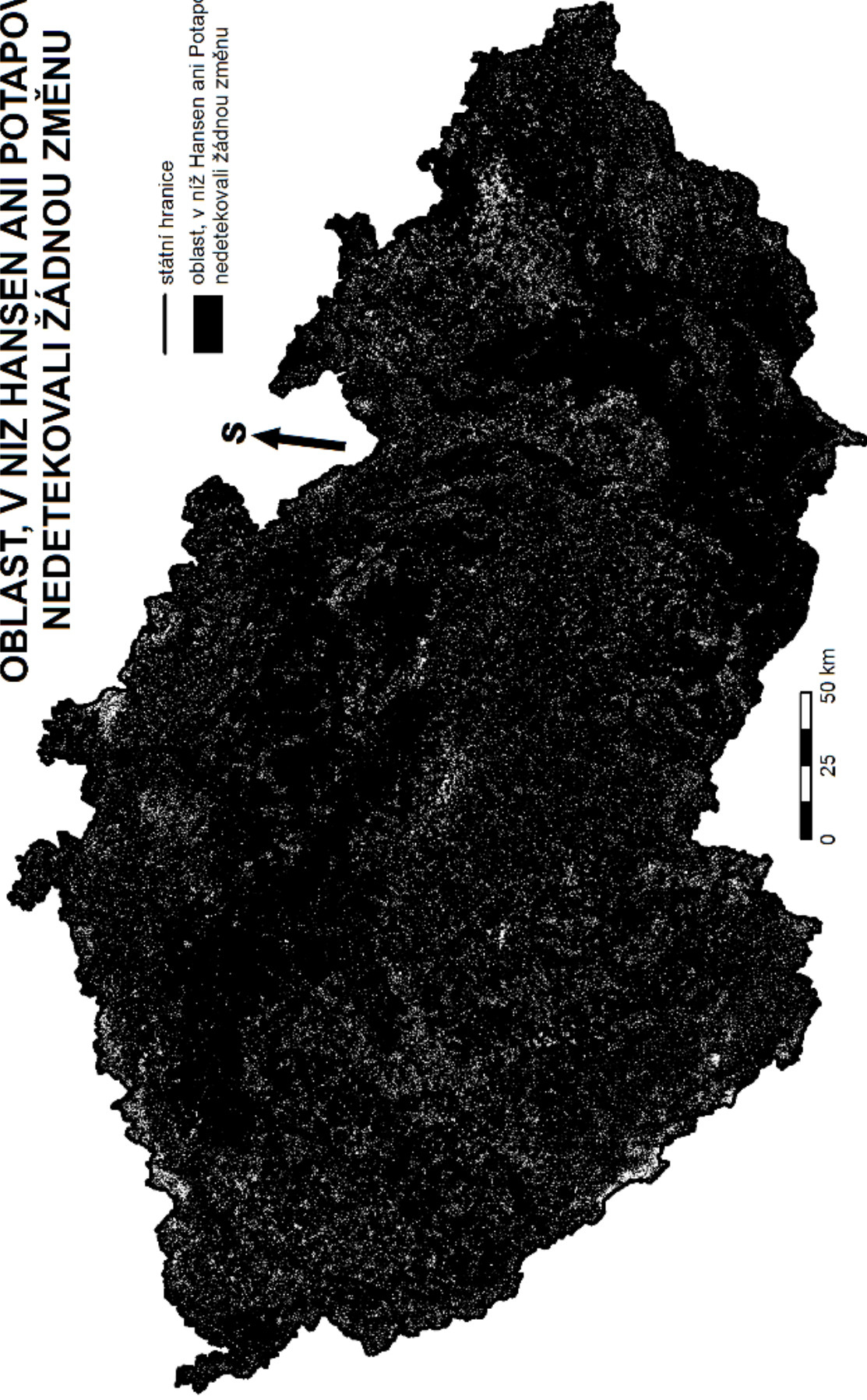
OBLAST, V NIŽ DETEKOVAL ZMĚNU LESNÍCH PLOCH POUZE HANSEN



OBLAST, V NÍŽ DETEKOVAL ZMĚNU LESNÍCH PLOCH POUZE POTAPOV



OBLAST, V NÍŽ HANSEN ANI POTAPOV NEDETEKOVALI ŽÁDNOU ZMĚNU



— státní hranice

■ oblast, v níž Hansen ani Potapov
nedetekovali žádnou změnu

S ↑

0 25 50 km

Příloha 2: Obsah přiloženého CD

- Souborná databáze s výsledky validace ve formátu gdb
- Souborná databáze s výsledky validace ve formátu xlsx