

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie



**URČOVÁNÍ OBSAHU CHLOROFYLU
Z HYPERSPEKTRÁLNÍCH OBRAZOVÝCH DAT**

Diplomová práce

**RETRIEVAL OF CHLOROPHYLL CONTENT FROM
HYPERSPECTRAL IMAGE DATA**

Master degree thesis

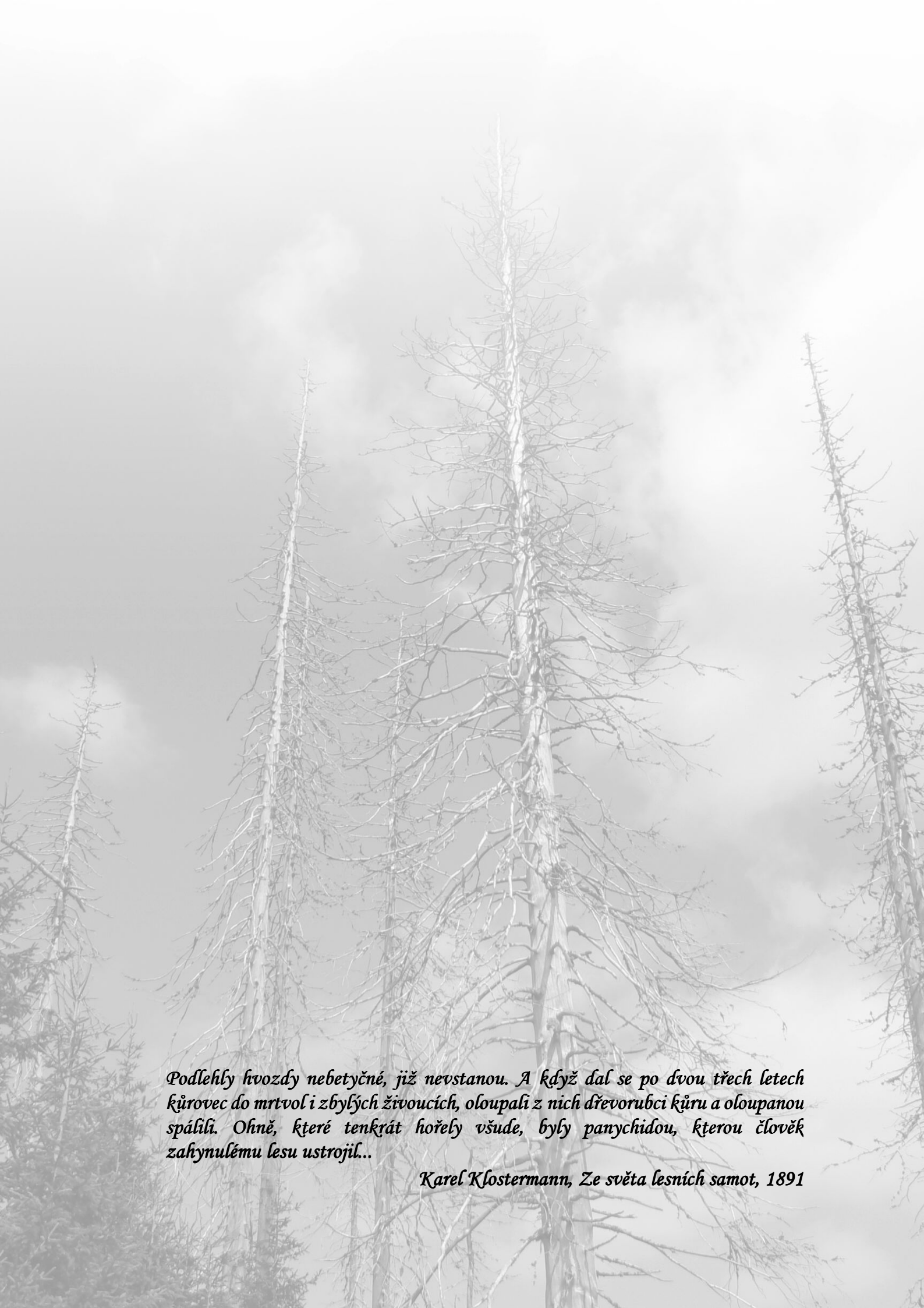
Jan MIŠUREC

Vedoucí práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jan Hanuš

září 2010

Praha



*Podlehly hvozdy nebetyčné, již nevstanou. A když dal se po dvou třech letech
kůrovec do mrtvol i zbylých živoucích, oloupali z nich dřevorubci kůru a oloupanou
spálili. Ohně, které tenkrát hořely všude, byly panychidou, kterou člověk
zahynulému lesu ustrojil...*

Karel Klostermann, Ze světa lesních samot, 1891

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s využitím uvedených pramenů a literatury, na něž odkazuji. 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. Souhlasím se zapůjčováním této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 19.8. 2010

Jan Mišurec

.....

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval několika lidem, kteří mi během zpracování této práce poskytli pomoc a podporu, bez níž by tato práce nemohla vzniknout. Jmenovitě děkuji Ing. Janu Hanušovi za odborný dohled nad zpracováním diplomové práce, Ing. Petru Lukešovi za konzultace v oblasti dálkového průzkumu vegetace, Mgr. Věroslavu Kaplanovi za cenné rady v oblasti aplikace modelů radiativního transferu a v neposlední řadě Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D. za odborné vedení má diplomové práce.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na využití kvantitativních metod obrazové spektrometrie pro výpočet obsahu chlorofylu (C_{ab}) v korunách stromů. Práce demonstruje možnosti využití modelů radiativního transferu pro získání obsahu chlorofylu z hyperspektrálních obrazových dat. V praktické části je pak demonstrována aplikace metodiky modelů radiativního transferu v kombinaci s exponenciální regresní funkcí pro výpočet obsahu chlorofylu v korunách smrkových porostů Národního parku Šumava. Podkladem této praktické části jsou dvě sady leteckých hyperspektrálních snímků, pořízených pomocí senzorů AISA Eagle a AISA Dual v srpnu a září roku 2009 v lokalitách Černá Hora a Smrčina. Výsledkem práce jsou rastrové vrstvy zobrazující obsah chlorofylu v korunách dospělých a mladých smrků. Tato data pak byla zpracována do formy mapových výstupů v měřítku 1: 5000.

Klíčová slova:

smrk ztepilý (*Picea Abies*), lýkožrout smrkový (*Ips typographus*), modely radiativního transferu, DART, PROSPECT, umělé neuronové sítě, chlorofyl, index ANMB₆₅₀₋₇₂₅

ABSTRACT

The main scope of submitted master thesis is the use of quantitative methods of imaging spectroscopy data for retrieval of chlorophyll content of forest canopies. It demonstrates the potentials of radiative transfer models in combination with exponential regression model for retrieval of chlorophyll content from imaging spectroscopy data. Estimation of Norway spruce chlorophyll content is based on two datasets acquired in August and September 2009 by airborne very high spatial resolution sensors AISA Eagle and AISA Dual over Černa Hora and Smrcina sites. Obtained chlorophyll content data were finally used for creation of high scaled (1: 5000) map outcomes.

Keywords:

Norway spruce (*Picea Abies*), Eight-toothed spruce beetle (*Ips typographus*), DART, PROSPECT, artificial neural networks, chlorophyll, ANMB₆₅₀₋₇₂₅ index

OBSAH

Seznam obrázků a tabulek.....	7
Seznam zkratk	8
1 Úvod do problematiky hyperspektrálních obrazových dat.....	9
1.1 Úvod	9
1.2 Cíle práce	10
1.3 Základní principy hyperspektrálních dat	11
1.4 Možnosti využití hyperspektrálních obrazových dat.....	13
1.5 Přehled současných hyperspektrálních obrazových senzorů.....	14
1.6 Hyperspektrální obrazový spektrometr AISA Dual.....	16
2 Určování obsahu chlorofylu z hyperspektrálních obrazových dat	18
2.1 Chlorofyly a jejich spektrální vlastnosti	18
2.2 Optické vlastnosti listové rostlin a jejich měření.....	18
2.3 Teorie modelů radiativního transferu	20
2.4 PROSPECT: model radiativního transferu na úrovni listu	21
2.5 DART: model radiativního transferu na úrovni korun.....	23
2.6 Optické indexy používané pro studium obsahu chlorofylu	27
3 Zpracování obrazových dat pomocí neuronových sítí.....	29
3.1 Úvod do teorie neuronových sítí	29
3.2 Od biologického k umělému neuronu.....	29
3.3 Klasifikace dat pomocí umělých neuronových sítí	31
4 Data a metody.....	33
4.1 Postup práce	33
4.2 Popis zkoumaných lokalit.....	35
4.3 Pořízení leteckých hyperspektrálních obrazových dat.....	36
4.4 Pozemní podpůrná kampaň	37
4.5 Atmosférické korekce obrazových dat	38
4.6 Geometrická korekce obrazových dat.....	42
4.7 Klasifikace obrazových dat a tvorba masek korun smrkových porostů	43
4.8 Úprava a klasifikace masek DART	46
4.9 Výpočet obsahu chlorofylu pomocí regresního modelu	47
5 Výsledky.....	53
5.1 Souhrn získaných výsledků.....	51
5.2 Vliv napadení stromů lýkožroutem smrkovým na obsah chlorofylu	51
5.3 Diskuse.....	52
6 Závěr.....	57
7 Seznam použitých pramenů a literatury	59
8 Seznam příloh.....	62

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázky:

- obr. 1.1: Lýkožrout smrkový
- obr. 1.2: Kůrovcová kalamita
- obr. 1.3: Spektrální křivka AISA Dual
- obr. 1.4: Simulace spektrální křivky Landsat ETM+
- obr. 1.5: Hyperspektrální systém AISA Dual
- obr. 2.1: Integrační sféra
- obr. 2.2: Interakce fotonu s listem
- obr. 2.3: Bi-direkcionální reflektanční distribuční funkce
- obr. 2.4: Princip modelu PROSPECT
- obr. 2.5: Přímé a inverzní využití modelu PROSPECT
- obr. 2.6: Typy buněk modelu DART
- obr. 2.7: Model DART – základní princip
- obr. 2.8: Geometrické parametry modelovaných stromů
- obr. 2.9: Tvorba chlorofylové mapy pomocí modelu DART
- obr. 2.10: Triangular Vegetation Index (TVI)
- obr. 3.1: Neuron
- obr. 3.2: Aktivační funkce
- obr. 3.3: Feedforward ANN
- obr. 4.1: Tvorba chlorofylové mapy – postup práce
- obr. 4.2: Zkoumané lokality
- obr. 4.3: Vliv oblačnosti na data ze senzoru FODIS
- obr. 4.4: Reflektanční křivky kalibračních terčů z dat AISA Eagle
- obr. 4.5: Reflektanční křivky kalibračních terčů z dat AISA Dual
- obr. 4.6: Mozaikování dílčích linií obrazových dat
- obr. 4.7: Síťový filtr
- obr. 4.8: Příklad vzhledu stromů v různém stádiu napadení kůrovcem
- obr. 4.9: Ukázka simulací modelu DART
- obr. 4.10: Continuum removal
- obr. 4.11: Index $ANMB_{650-725}$
- obr. 4.12: Exponenciální regresní model vztahu indexu $ANMB_{650-725}$ a obsahu chlorofylu (C_{ab}) – dospělé stromy
- obr. 4.13: Exponenciální regresní model vztahu indexu $ANMB_{650-725}$ a obsahu chlorofylu (C_{ab}) – mladé stromy
- obr. 5.1: Chlorofylová mapa

Tabulky:

- tabulka 1.1: Přehled současných hyperspektrálních obrazových senzorů
- tabulka 1.2: Technické specifikace spektrometru AISA – Dual
- tabulka 3.1: Funkčnost umělého neuronu TLU
- tabulka 4.1: Parametry používaných obrazových dat
- tabulka 4.2: Průměrná hodnota odchylky spektra FODIS od referenčního spektra FieldSpec
- tabulka 4.3: Hodnocení přesnosti klasifikace
- tabulka 4.4a: Vztah indexu $ANMB_{650-725}$ a obsahu chlorofylu (C_{ab}) – dospělé smrky
- tabulka 4.4b: Vztah indexu $ANMB_{650-725}$ a obsahu chlorofylu (C_{ab}) – mladé smrky
- tabulka 5.1: Hodnoty obsahu chlorofylu ve zkoumaných stromech

SEZNAM ZKRATEK

AISA	<i>Airborne Imaging Spectrometer for Applications</i>
ANMB ₆₅₀₋₇₂₅	<i>Area under curve normalized by maximal band dept between 650-725 nm</i>
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
AOT	<i>Aerosol Optical Thickness</i>
ARES	<i>Airborne Reflective and Emissive Spectrometer</i>
AV ČR v.v.i.	<i>Akademie věd České republiky, vědecko – výzkumná instituce</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
AVIRIS	<i>Airborne Visable and Infrared Imaging Spectrometer</i>
BDRF	<i>Bidirectional reflectance distribution function</i>
DART	<i>Discrete Anisotropic Radiative Transfer</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt</i>
DN	<i>Digital number</i>
ETM	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
FODIS	<i>Fiber Optic Downwelling Irradiance Sensor</i>
FOV	<i>Field Of View</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
CHRIS	<i>Compact High Resolution Imaging Spectrometer</i>
IFOV	<i>Instantaneous Fild Of View</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
IRR	<i>irradiance</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
KEBR	<i>Katedra experimentální biologie rostlin</i>
LAD	<i>Leaf Angle Distribution</i>
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
MERIS	<i>Medium Resolution Imaging Spectrometer</i>
mNDVI ₇₀₅	<i>Modified Red Edge Normalized Vegetation Index</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MSG	<i>Meteosat Second Generation</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NIR	<i>Near Infrared</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OSAVI	<i>Optimized Soil Adjusted Vegetation Index</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SEVIRI	<i>Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SWIR	<i>Short Wave Infrared</i>
RAD	<i>radiance (zář)</i>
REF	<i>reflektance (odrazivost)</i>
REP	<i>Red Edge Position Index</i>
TAI	<i>Twig Area Index</i>
TAD	<i>Twig Angle Distribution</i>
TCARI	<i>Transformed Chlorophyll Absorption Ration Index</i>
TIR	<i>Thermal Infrared</i>
TLU	<i>Threshold Logic Unit</i>
TOC	<i>Top Of Canopy</i>
TVI	<i>Triangular Vegeation Index</i>
ÚSBE	<i>Ústav systémové biologie a ekologie</i>
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
VAI	<i>Void Area Index</i>
VIS	<i>Visible</i>
VNIR	<i>Visible and Near Infrared</i>
WGS	<i>World Geodetic System</i>
ZABAGED	<i>Základní báze geografických dat</i>

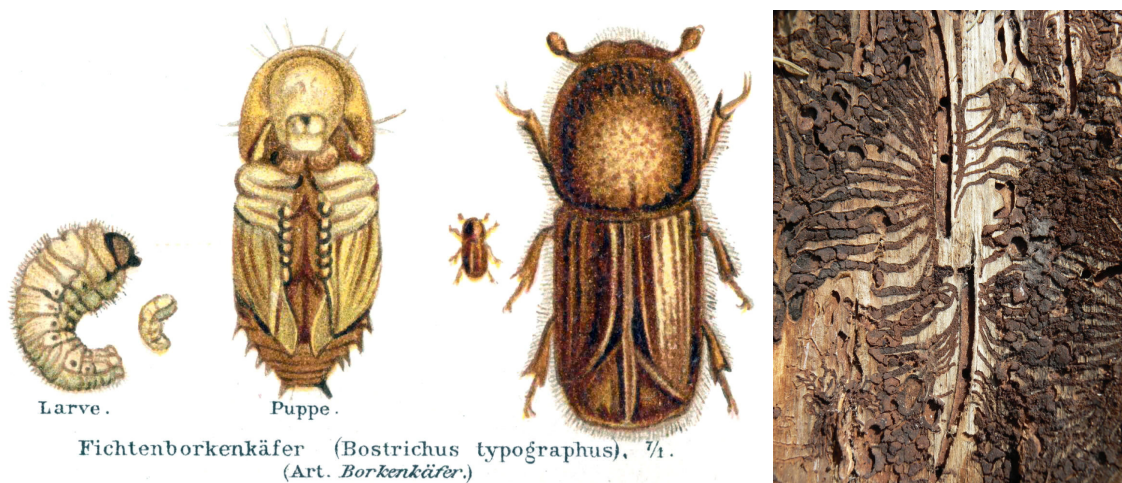
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY HYPERSPEKTRÁLNÍCH OBRAZOVÝCH DAT

1.1 Úvod

Nadměrný výskyt lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*) v lesních porostech Národního parku Šumava způsobuje značné poškození horských smrčín na poměrně velkých plochách. K přijetí správných opatření zabráňujícím dalšímu šíření tohoto škůdce je nutné znát potenciální směry jeho postupu. Jednou z možností je využití metod dálkového průzkumu Země. Aplikací metod obrazové spektroskopie, je možné sledovat vybrané biochemické, biofyzikální a strukturální¹ indikátory mající vztah ke zdravotnímu stavu jednotlivých stromů či společenstev. Díky tomu je pak možné vymezit porosty s horším zdravotním stavem, které jsou k napadení kůrovcem náchylnější než zdravé porosty.

Přemnožení kůrovců – v případě šumavských lesů jde zejména o lýkožrouta smrkového (viz obr. 1.1) – ve smrkových monokulturních porostech Národního parku Šumava je v současné době často diskutovanou tématikou. Dlouhodobým dilematem je především otázka, jak se k této kalamitě postavit – zda stromy napadené kůrovcem kácet a z lesů odstranit, nebo nechat oblast přirozenému vývoji. Výskyt kůrovců je chápán jako proces podílející se na přirozené obnově lesa, neboť za normálních okolností napadají brouci pouze staré a oslabené stromy, zatímco zdravé stromy se jim dokáží aktivně ubránit (při napadení zdravého stromu je brouk zalit pryskyřicí a tím zahuben). Problém nastává v případě přemnožení kůrovců, kdy je strom napadán řádově tisícičkami škůdců, čemuž se již ani zdravý strom ubránit nemůže [PŘÍRODA.CZ].

Hlavní příčinou přemnožení kůrovců je v případě Šumavy především druhová skladba lesů, v níž v současné době výrazně převládá smrk ztepilý (*Picea abies*). Změna druhové skladby lesů je výsledkem dlouhodobé kolonizace této lokality člověkem. K největšímu tlaku na místní lesy došlo přibližně v polovině 18. století spolu s rozvojem sklářství, které mělo velké nároky na spotřebu dřeva, a dřevařského průmyslu. Odlesňování dosáhlo v té době takových rozměrů, že již na začátku 19. století bylo nutné zahájit program obnovy lesů. Namísto původních druhů (tj. v tomto případě buku a jedle) byly upřednostňovány rychleji rostoucí smrky, které měly navíc mnohem vyšší výnosy dřeva (většina lesních ploch měla v této době



obr. 1.1: Lýkožrout smrkový

Lýkožrout smrkový (*Ips typographus*), Meyers Konversationslexikon, 1888, vol. 16, s. 352 (vlevo)
Typický požerek lýkožrouta smrkového; foto: autor (vpravo)

¹ například index listové plochy – LAI (Leaf Area Index)

na rozdíl ode dneška funkci hospodářských lesů) [SKUHRAVÝ, 2001]. V současnosti tak má smrk v druhové skladbě šumavských lesů cca 80% většinu [VACEK, PODRÁZSKÝ, 2003]. Další podrobnosti týkající se kůrovcové kalamity na Šumavě jsou uvedeny v příloze 1.

Cílem obou názorových skupin (tj. zastánců i odpůrců kácení napadených stromů) je přeměna současných nepůvodních a uměle vysazených smrkových lesů zpět na původní skladbu, rozdíl je však v tom, jak toho dosáhnout. Pro asanaci napadených lokalit hovoří především skutečnost, že likvidací napadeného dřeva bude zároveň zlikvidován i zdroj škůdců, kteří již nebudou moci napadat další stromy. Změna skladby lesa by tedy podle tohoto přístupu měla být založena na cíleném lesnickém managementu využívajícím živého, byť nepůvodního smrkového lesa. Proti tomuto přístupu však na druhou stranu hovoří fakt, že takovýto typ zásahu je zcela v rozporu s hlavní ideou národních parků, tj. vymezení cenných ekosystémů, které budou považovány za intaktní (bezzásahové). V případě bezzásahového přístupu hrozí neustálý nárůst počtu škůdců, a tím i rozsah napadených ploch. Je ovšem otázkou, zda ponechání hospodářských smrkových lesů k totální záhubě kůrovcem je správné řešení. Jak totiž upozorňuje ve svém otevřeném dopise akademická obec LDF MZLU (17. února 2004), je nutné si uvědomit, že na místě kůrovcem zničených lesů původní smíšený les rozhodně nevznikne – nově vzniklý les bude opět z velké části smrkový a přirozené skladby dosáhne postupnou sukcesí až za několik staletí.



obr. 1.2: Kůrovcová kalamita

Smrkový monokulturní les postižený kůrovcovou kalamitou. Fotografie byla pořízena autorem v lokalitě Březník – Lusen 5.8. 2009

1.2 Cíle práce

Předkládaná diplomová práce je dílčí součástí projektu „Ohodnocení fyziologického stavu smrkových lesních porostů šumavského národního parku napadených hmyzím škůdcem lýkožroutem smrkovým pomocí metod obrazové spektrometrie a radiativního transferu“ zpracovávaného Ústavem systémové biologie a ekologie AV ČR v.v.i.

Hlavním cílem práce je ověření a vyhodnocení spolehlivosti metodiky určování obsahu chlorofylu z hyperspektrálních obrazových dat a její optimalizace pro konkrétní data pořízená v rámci výše uvedeného projektu, a to ve vztahu k působení lýkožrouta smrkového na smrkové porosty v zájmových lokalitách. Díky tomuto stresovému faktoru je očekáván chlorofylový gradient, pomocí kterého je možné ověřit robustnost výpočetních algoritmů na široké škále stromů v různé fázi napadení kůrovcem. Výpočet obsahu chlorofylu bude realizován kombinací modelu radiativního transferu PROSPECT [JACQUEMOUD, BARET, 1990] na úrovni listu s 3D modelem DART [GASTELLU-ETCHEGORRY, MARTIN, GASCON, 2004] na úrovni korun

smrku ztepilého a jejich inverze oproti datům velmi vysokého prostorového rozlišení za pomoci nelineárního regresního modelu. Praktickou aplikací výše uvedené metodiky bude vytvořena mapa celkového množství C_{ab} . Tato mapa pak může sloužit jako podklad při studiu rizika a ranných stádií napadení lesních porostů kůrovcem.

Pro reprezentativní parametrizaci modelů budou použita měření optických vlastností a strukturálních parametrů smrku ztepilého. Validace výsledné chlorofylové mapy bude provedena přímým srovnáním s laboratorně zjištěným obsahem chlorofylů ve vzorcích odebraných v průběhu pozemní podpůrné kampaně.

Primárním podkladem pro zpracování tohoto úkolu jsou hyperspektrální letecké snímky, pořízené v průběhu vegetační sezóny roku 2009, během níž byly realizovány dvě kampaně sběru dat. Obrazová data byla při 1. kampani (2.8. 2009) pořízena leteckým hyperspektrálním spektrometrem AISA Eagle, při 2. kampani (1.9. 2009) byla data pořízena pomocí spektrometru AISA Dual. Snímány byly tři zájmové lokality v NP Šumava – Březník, Černá Hora a Smrčina (viz příloha 2). Kromě vlastních leteckých snímků byla při zpracování práce použita i data získaná během pozemních kampaní, které probíhaly souběžně s leteckým snímáním.

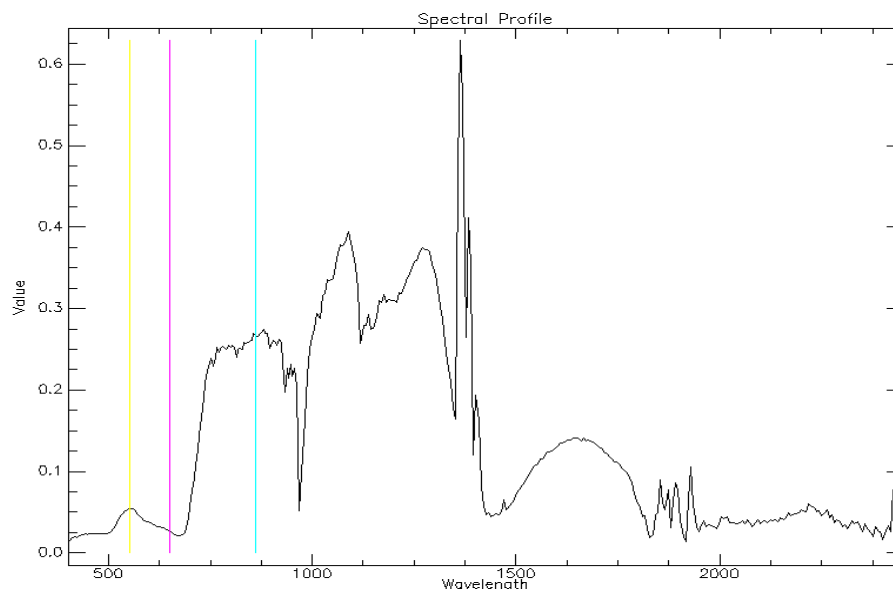
1.3 Základní principy hyperspektrálních dat

Dálkový průzkum Země je moderní metodou získávání informace o objektech na zemském povrchu bez přímého fyzického kontaktu s pozorovaným objektem. Informaci o daném objektu získáváme registrací elektromagnetického záření, které daný objekt buď sám vyzařuje, nebo jej odráží². Metody dálkového průzkumu Země mohou být pasivní (tzn. registrujeme množství sluneční energie objektem odražené – např. optické senzory, případně objektem emitované – termální senzory, pasivní florescence), nebo aktivní (kdy zkoumáme interakci senzorem aktivně vyslaného signálu a jeho chování po odrazu od zkoumaného předmětu – např. radar, lidar). V každém případě nese dané záření určitý „otisk“ objektu s nímž interagovalo (tj. který jej odrazil nebo jej vyzářil). Sledováním intenzity odrazu záření ve více vlnových délkách pak můžeme stanovit spektrální charakteristiky pozorovaného tělesa, které nám udávají, jak se dané těleso v dané vlnové délce chová (tj. například kolik záření vyzařuje nebo jak velkou část záření odráží). Ze znalosti spektrálních charakteristik jsme pak schopni navzájem rozlišovat jednotlivé objekty (případně je zařazovat do tříd podle podobností spektrálních charakteristik) nebo můžeme určovat jejich kvantitativní parametry (např. teplotu, obsah vody, obsah chlorofylu apod.). Pozorováním v různých okamžicích pak můžeme rovněž zjišťovat, jak se spektrální charakteristiky povrchu mění v čase.

V předchozím odstavci jsme hovořili o tom, že pro získání spektrálních vlastností tělesa na zemském povrchu využíváme registraci záření různých vlnových délek. Na tomto principu je postaven tzv. multispektrální dálkový průzkum Země. Multispektrální snímek je tvořen několika tzv. spektrálními kanály, z nichž každý obsahuje určitou informaci o tom, kolik záření dané vlnové délky bylo snímačem přijato. Ve skutečnosti však jednotlivé spektrální kanály nemají nulovou šířku. Nejedná se o informaci o množství záření na jedné jediné konkrétní vlnové délce, ale o jakousi souhrnnou hodnotu, zahrnující sumu záření z určitého (poměrně širokého) intervalu vlnových délek. Uvedme několik příkladů. Spektrální kanál č. 2 senzoru ETM+, který je

² V drtivé většině případů však dochází k oběma jevům zároveň, přičemž jeden z nich převládá. Záleží zde především na teplotě daného tělesa, která je určujícím parametrem pro to, jaká vlnová délka záření je daným tělesem nejvíce vyzařována. Čím vyšší má dané těleso teplotu, tím se maximum vyzařování přesouvá do kratších vlnových délek (Wiennův posunovací zákon). Například Slunce, jehož povrchová teplota dosahuje hodnoty přibližně 6000 K má maximum vyzařování na vlnové délce přibližně 550 nm (tedy ve žlutozelené oblasti oboru viditelného záření – proto je lidské oko na záření této vlnové délky nejcitlivější). Naopak Země s průměrnou povrchovou teplotou okolo 300 K vyzařuje nejvíce záření o vlnové délce kolem 10 000 nm (tedy v oblasti tepelného infračerveného záření).

umístěn na družici Landsat 7, obsahuje informaci o množství záření z intervalu 525 – 605 nm. Šířka tohoto pásma je tedy 80 nm. Kanál č. 2 senzoru AVHRR, který je umístěn na družicích NOAA, však registruje záření z intervalu 725 – 1000 nm. Jeho šířka tedy činí 275 nm. Nelze však přitom říci, že na všechny vlnové délky tohoto intervalu je daný sensor stejně citlivý. Právě naopak – sensor je nejcitlivější (většinou) na záření o vlnové délce, jenž leží uprostřed tohoto intervalu, a naopak na vlnové délky ležící dále od středu intervalu je již citlivý méně³.



obr. 1.3: Spektrální křivka AISA Dual

Spektrální křivka získaná na základě dat pořízených hyperspektrálním skenerem AISA Dual 1.9. 2009 na území NP

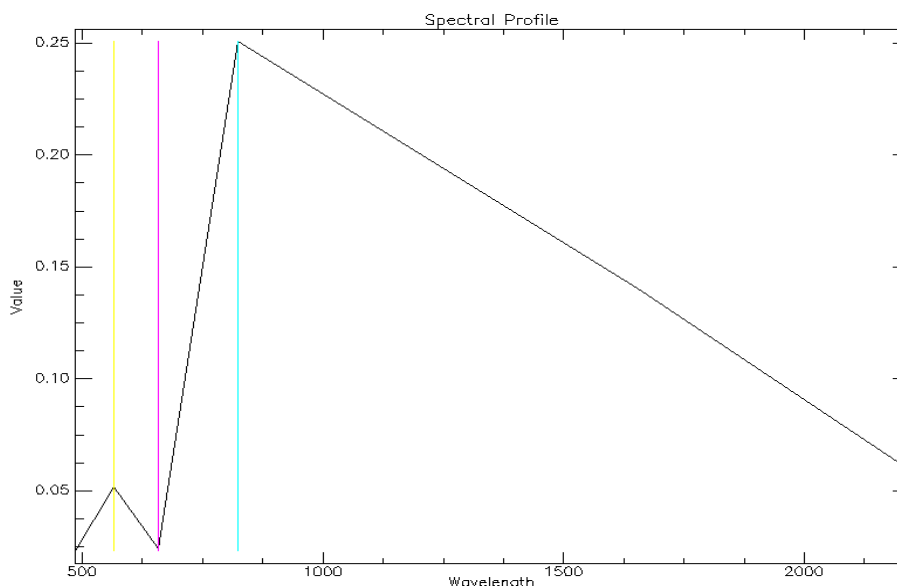
Počty spektrálních kanálů se u jednotlivých typů senzorů liší. U většiny z nich však dosahuje jednotek maximálně desítek. Jako několik příkladů jmenujme senzory: NOAA/AVHRR (6 kanálů), Landsat/ETM+ (8 kanálů), MSG/SEVIRI (12 kanálů). Při takto malém počtu kanálů tedy můžeme studovat spektrální chování zemského povrchu pouze nespojitě – v těch částech elektromagnetického spektra, které jsou pokryty spektrálními kanály použitého přístroje. Pro detailnější studium spektrálních vlastností povrchu je pak navíc nevýhodou i poměrně velká šířka jednotlivých spektrálních kanálů. Řešením obou těchto nevýhod je radikální zvýšení množství spektrálních kanálů – na řádově stovky. A právě v tom tkví podstata tzv. hyperspektrálních senzorů. Stejný interval elektromagnetického záření, který je multispektrálním senzorem rozdělen mezi např. 8 kanálů, je senzorem hyperspektrálním rozdělen na např. 220 kanálů. Šířka jednotlivých kanálů je pak mnohem menší než v případě multispektrálních senzorů. Šířka kanálů hyperspektrálních senzorů je závislá na počtu kanálů, nicméně v nejlepších případech se pohybuje i okolo 3 nm. Díky tomu můžeme studovat spektrální vlastnosti povrchu (na rozdíl od multispektrálních dat) „téměř“ spojitě. Zatímco u multispektrálních snímků jsme informaci získávali (a zpracovávali) odděleně kanál po kanálu, v případě hyperspektrálních dat naopak využíváme toho, že máme možnost sledovat spektrální chování povrchu kontinuálně v celém intervalu vlnových délek, který nás zajímá (např. od fialové části viditelného oboru až po obor středního infračerveného záření). Hovoříme zde pak o tzv. spektru, které si můžeme představit jako jakýsi průřez přes všechny hodnoty (ve všech spektrálních kanálech) pro každý pixel obrazu. Toto spektrum je pak možné vyjádřit graficky jako více či méně spojitou křivku (podle šířky a návaznosti jednotlivých kanálů) vyjadřující spektrální chování objektu (pixelu) v různých vlnových délkách. Tento zásadní rozdíl mezi multi- a hyperspektrálními snímky pak názorně dokládají obr. 1.3 a 1.4.

³ tuto vlastnost popisuje parametr označovaný jako „spectral response function“

Poněkud jiným případem jsou družicové senzory Envisat/MERIS (15 kanálů) a Terra/MODIS (36 kanálů). Počet kanálů těchto senzorů je sice nižší než v případě pravých hyperspektrálních spektrometrů, jednotlivé kanály jsou ale umístěny v přesně definovaných vlnových délkách a i jejich šířka se hyperspektrálním senzorům blíží. Senzory MERIS a MODIS tak tvoří jakýsi přechod mezi multi- a hyperspektrálními senzory.

SHIPPERT [2003] naopak dokonce uvádí, že pouhý počet spektrálních kanálů nedělá senzor automaticky hyperspektrálním – jde zejména o šířku jednotlivých pásem a spojitost pořízeného spektra. Udává zde příklad: „senzor, který pořizuje data ve 20 spektrálních kanálech o šířce 10 nm je možné považovat za hyperspektrální, naopak senzor pořizující data ve 20 kanálech o šířce 100 nm již za hyperspektrální považovat nelze.“ V praxi však zpravidla platí, že hyperspektrální senzory mají větší počet spektrálních kanálů, protože v opačném případě by byla (díky malé šířce jednotlivých kanálů) pokryta jen velmi malá část elektromagnetického spektra.

Na závěr ještě dodejme, že současným potřebám již pomalu přestávají stačit i možnosti hyperspektrálních senzorů, díky čemuž začíná pomalu nastupovat ještě novější technologie označovaná jako „full spectral imaging“, která umožní sledovat spektrální vlastnosti povrchu prakticky již zcela spojitě [BOLTON, 2003].



obr. 1.4: Simulace spektrální křivky Landsat ETM+
Simulace vzhledu spektrální křivky stejného povrchu jako na obr. 1.3 v případě použití senzoru Landsat/ETM+.

1.4 Možnosti využití hyperspektrálních obrazových dat

Hyperspektrální obrazová data je možné s úspěchem nasadit všude tam, kde je zapotřebí pracovat se spektrálním chováním jednotlivých typů zemského povrchu na velmi podrobné úrovni. Jednou z prvních (a i v současné době hlavních) aplikací, kde hyperspektrální data našla bohatého využití, jsou geologické aplikace – např. při studiu výskytu různých druhů hornin a minerálů, vyhledávání ložisek nerostných surovin, studiu vlastností půdy apod. Druhou velkou skupinou, kde hyperspektrální data našla uplatnění, jsou biologické aplikace zabývající se sledováním vegetace (výskyt a zastoupení jednotlivých druhů, obsah důležitých látek v těle rostlin, zdravotní stav vegetace, monitoring kvality vody apod.). Využití našla hyperspektrální obrazová data rovněž ve vojenských aplikacích (např. detekce nebezpečných chemických látek apod.).

1.5 Přehled současných hyperspektrálních obrazových senzorů

Hyperspektrální senzory, jinak označované též jako zobrazující spektrometry, vznikly na základě kombinace technologií spektrometrie a dálkového průzkumu Země. Ze samotné podstaty hyperspektrálních dat se jedná o zařízení schopná snímat zemský povrch ve velkém množství velmi úzkých spektrálních kanálů. Na rozdíl od mnoha klasických leteckých kamer mají obrazové spektrometry charakter skenerů. Obraz území tedy není pořízen najednou jako matice pixelů, ale vzniká postupně pořizováním jednotlivých řádek obrazu v průběhu pohybu platformy, na níž je přístroj usazen. Touto platformou je zpravidla buď letadlo nebo družice na oběžné dráze Země. Spektrometry tak můžeme rozdělit na letecké a družicové. Kromě toho však existují také spektrometry pozemní, které jsou používány zpravidla v průběhu pozemních kampaní, během nichž jsou pořizována referenční data pro zpracování snímků z leteckých (příp. družicových) senzorů (tyto spektrometry však nepořizují obrazová data).

První letecký hyperspektrální senzor byl vyvinut v laboratořích JPL (Jet Propulsion Laboratory – Laboratoř pro výzkum tryskového pohonu) v roce 1982. Tento přístroj byl označován AIS (Airborne Imaging Spectrometer). Jeho nástupcem, kterému se dostalo mnohem širšího využití, se stal v roce 1987 senzor AVIRIS. Přístroj se skládal ve skutečnosti ze čtveřice spektrometrů, které byly dohromady schopny pořizovat obrazová data povrchu Země v intervalu 380 – 2500 nm v 224 spektrálních kanálech o šířce 10 nm. Senzor AVIRIS byl užíván zejména v kombinaci s letounem NASA ER-2, což byla modifikovaná a zmodernizovaná verze známého špionážního letounu U-2 používaného za studené války. Prvním družicovým hyperspektrálním senzorem se stal v roce 2000 senzor Hyperion, umístěný na pokusné družici EO-1 (Earth Observing - 1)

Přehled nejčastěji používaných hyperspektrálních senzorů současnosti podává tab. 1.1.

Tabulka 1.1: Přehled současných hyperspektrálních obrazových senzorů							
	spektrální rozsah	počet kanálů	šířka kanálu	bit. hloubka	šířka řádku	FOV	IFOV
letecké skenery:							
AVIRIS	380-2500 nm	224	10 nm	12 bit	614 pix	30°	0,057°
AISA – Dual	400-2450 nm	256 ¹ 254 ²	2,3 nm ¹ 5,8 nm ²	12 bit ¹ 14 bit ²	1024 pix ¹ 320 pix ²	37,7° ¹ 24° ²	0,037° ¹ 0,075° ²
HyMap	450-2500 nm	128	15 nm	12 bit	512 pix	61,3°	0,11°
ARES	470-2420 nm 8100-12 100 nm	150	15 nm ³ 122 nm ⁴	12 bit	813 pix	65°	0,11°
družicové skenery:							
Hyperion	357-2576 nm	242	10 nm	12 bit	256 pix	0,624°	0,00248°
CHRIS	410-1050 nm	63	1,3 – 12 nm	12 bit	744 pix	1,289°	0,00313°
¹ Eagle (VNIR) ² Hawk (SWIR) ³ v intervalu 470 – 2420 nm ⁴ v intervalu 8100 – 12 100 nm Údaje převzaty z: AVIRIS Instrument; AISA Dual hyperspectral sensor; HyMap – Airborne hyperspectral sensors - overview; ARES – Airborne Reflective Emissive Spectrometer; Earth Observing 1 - Hyperion; Proba							

AVIRIS:

Senzor AVIRIS, vyvinutý v laboratořích JPL, se stal jedním z prvních hyperspektrálních senzorů, kterému se dostalo širšího využití pro vědecké i komerční účely. Poprvé byl použit v roce 1987, jako nástupce staršího senzoru AIS. Senzor je používán buď v kombinaci s letouny ER-2 (let se realizuje ve výšce cca 20 km nad povrchem, díky čemuž mají výsledná data

geometrické rozlišení cca 20 m/pix) nebo Twin Otter Turboprop (let se realizuje ve výšce zhruba 4 km; výsledná data pak mají geometrické rozlišení cca 4 m/pix).

[AVIRIS Instrument]

AISA-Dual

AISA Dual je kompaktní hyperspektrální senzor určený k provozu především na menších letadlech. Přístroj obsahuje ve skutečnosti dvě samostatné jednotky označované jako AISA Eagle (pro snímání v oboru viditelného a blízkého infračerveného záření v intervalu 400 – 970 nm) a AISA Hawk (pro snímání záření v oboru blízkého infračerveného záření až k hranici středního infračerveného záření 970 – 2450 nm). Obě jednotky však mohou být provozovány i samostatně. Zařízení je vyráběno společností Spectral Imaging (Finsko). Obrazová data, zpracovávaná v rámci řešení této diplomové práce byla pořízena právě tímto zařízením. Z tohoto důvodu bude spektrometr AISA Dual později popsán podrobněji.

[AISA Dual hyperspectral sensor]

HyMap

Senzor HyMap byl uveden do operačního provozu v roce 1996. Jeho vývoj a výroba byly realizovány společností Integrated Spectronics (Austrálie). Přístroj byl navržen jako hyperspektrální senzor se širokým zorným polem, určeným primárně pro použití v geologických aplikacích. Široké zorné pole však na druhou stranu způsobuje, že je data nutné pořizovat s vyšší výškou, čímž je sice možné najednou nasnímat širší pás území avšak sníží se tím prostorové rozlišení pořízených dat (v případě současných verzí senzoru HyMap cca 5 m/pix).

[HyMap – Airborne hyperspectral sensors - overview]

ARES

ARES je příkladem v současné době připravovaného hyperspektrálního senzoru, který ještě není operativně nasazen (v současné době je testován zkušební senzor APEX). Senzor ARES byl navržen v roce 2003 jako hyperspektrální letecký spektrometr se širokým zorným polem, pokrývající pomocí 4 senzorů interval viditelného a blízkého infračerveného záření (470 – 2420 nm) ve 120 spektrálních kanálech o šířce cca 15 nm. Kromě toho však přístroj obsahuje i pátý senzor registrující termální infračervené záření v intervalu vlnových délek 8100 – 12 100 nm do 30 spektrálních kanálů. Šířkou intervalu pokrytých vlnových délek (VIS-NIR-SWIR-TIR) se bude jednat o zcela unikátní přístroj, který v současné době nemá obdoby. Vývoj senzoru ARES je realizován společností Integrated Spectronics (Austrálie).

[ARES – Airborne Reflective Emissive Spectrometer]

Hyperion

Hyperion je prvním družicovým hyperspektrálním senzorem. Přístroj je umístěn na družici EO-1, která byla vypuštěna na oběžnou dráhu Země ze základny Vandenberg 21.11. 2000. Vlastníkem družice je americký Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (National Aeronautics and Space Administration - NASA). Podle původních záměrů se mělo jednat jen o pokusný jednorocní projekt, ale vzhledem k velkému zájmu vědecké veřejnosti byla činnost družice prodloužena, přičemž funguje dodnes. Satelit se pohybuje na polární heliocentrické dráze ve výšce 705 km nad povrchem (dráha družice EO-1 se shoduje s dráhou satelitu Landsat 7. Obě družice letí za sebou jen v malém časovém odstupu, takže je možné data z obou satelitů vzájemně kombinovat). Senzor Hyperion snímá povrch v intervalu 357 – 2576 nm, který je rozdělen na 242 spektrálních kanálů. Data jsou snímána v pásech o šířce 7,7 km při prostorovém rozlišení 30 m. Nevýhodou senzoru Hyperion je nízký odstup signálu od šumu. SNR dosahuje podle [Kruse et al., 2003] v případě senzoru Hyperion hodnoty 1:50, zatímco například v případě senzoru AVIRIS činí SNR 1:500.

[Earth Observing 1 - Hyperion]

CHRIS

Druhým družicovým hyperspektrálním senzorem, který je v současné době provozován, je přístroj CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) umístěný na evropské družici Proba (Project for on-board autonomy), jenž byla vynesena na oběžnou dráhu 22.10. 2001 prostřednictvím Indické kosmické agentury. Družice se pohybuje na polární dráze přibližně ve výšce 556-688 km nad povrchem Země. Stejně tak jako v případě satelitu EO-1 se počítalo s tím, že mise družice Proba bude mít spíše charakter zkušebního letu. Přesto se však stala velmi zajímavou demonstrací nových prvků, které byly při její misi použity (např. možnost multiúhlového snímání povrchu). Senzor CHRIS může pořizovat obrazová data zemského povrchu v celkem 5 módech. V základním módu je povrch snímán v 62 spektrálních kanálech v intervalu 773 – 1036 nm s prostorovým rozlišením 34 m. Další 4 zbývající módy poskytují data s vysokou tématickou specializací (mode 2: Water bands, mode 3: Land channels, mode 4: Chlorophyll band set, mode 5: Land channels)

[Proba]

1.6 Hyperspektrální obrazový spektrometr AISA Dual

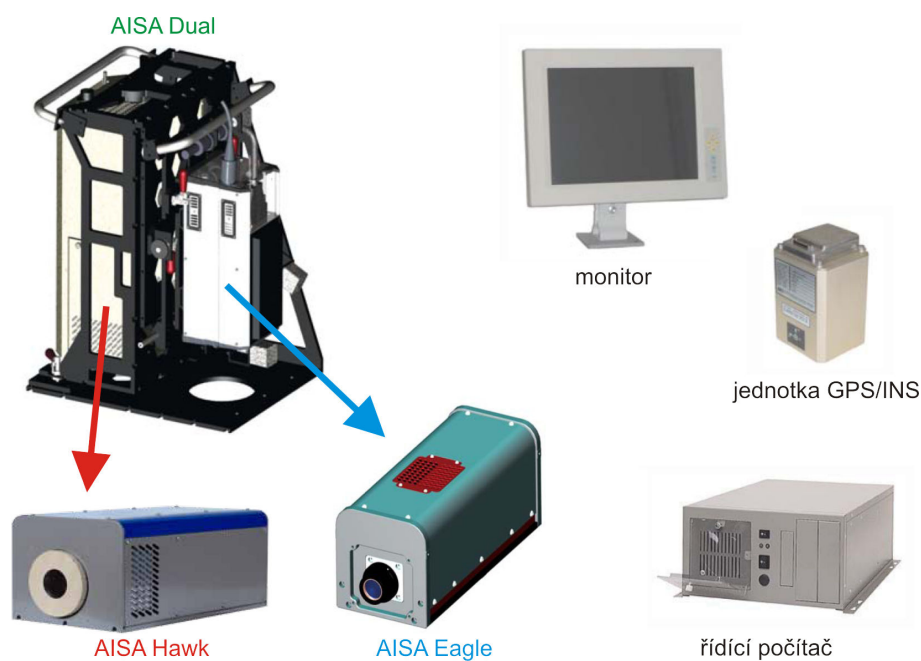
AISA Dual je systém pro simultánní pořizování obrazových dat v oborech viditelného a blízkého infračerveného záření (VNIR) a krátkovlnného až středního infračerveného záření (SWIR). Fyzicky se jedná o dva spektrometry umístěné dohromady na jedné montáži. Spektrometr AISA Eagle je určen pro snímání v intervalu vlnových délek 400 – 970 nm (tedy oblast VNIR), senzor AISA Hawk je pak určen pro snímání v intervalu 970 – 2450 nm (SWIR).

Celý systém se skládá z vlastního spektrometru (resp. dvojice spektrometrů), jednotky GPS/INS (sloužící k přesnému měření prostorové orientace platformy, na níž je zařízení instalováno) a řídicího počítače. Počítač obsahuje software k ovládání snímací jednotky, sledování činnosti jednotky GPS/INS. Nasnímaná data jsou ukládána v binární podobě do formátu kompatibilního se software ENVI. K fyzickému ukládání dat v průběhu snímání slouží zabudovaný pevný disk o kapacitě 200 GB, což stačí na cca 4 hodiny nepřetržitého snímání.

Senzor AISA Dual může pracovat ve dvou režimech – podle toho, zda je využíván jen jeden řídicí počítač nebo jsou k dispozici dva nezávislé řídicí počítače. V prvním případě, kdy je k dispozici jen jeden počítač, mají data z obou senzorů (Eagle i Hawk) stejnou šířku nasnímaného pásu (320 pixelů). Senzor Eagle však ve skutečnosti dokáže produkovat řádky o šířce 1024 pixelů. V tomto režimu je tedy velikost pixelu senzoru Eagle přizpůsobena velikosti pixelu senzoru Hawk (data jsou pořizována tak, aby si jednotlivé pixely, pořízené oběma senzory prostorově navzájem odpovídaly). Data z obou senzorů jsou pak spojena a uložena jako jeden snímek. V případě, že jsou používány dva řídicí počítače, je možné současně snímat pomocí senzoru Eagle s šířkou řádku 1024 pixelů a senzorem Hawk se šířkou řádku 320 pixelů. Data z obou senzorů jsou pak ukládána odděleně. [AISA Dual Hyperspectral Sensor].

Podrobnější technické specifikace senzoru AISA Dual jsou uvedeny v tabulce 1.2.

Tabulka 1.2: Technické specifikace spektrometru AISA-Dual						
	AISA Eagle (VNIR)			AISA Hawk (SWIR)		
spektrální rozsah	400-970 nm			970-2450 nm		
spektrální rozlišení	2,9 nm			8,5 nm		
binning	1x	2x	4x	1x	2x	4x
počet kanálů	244	122	60	254	127	63
spektrální vzorkování	2,3 nm	4,6 nm	9,2 nm	5,8 nm	11,6 nm	23,2 nm
bitová hloubka	12 bit			14 bit		
SNR	1:350			1:800		
mód 1						
šířka řádku	320 pix			320 pix		
FOV	24°			24°		
IFOV	0,075°			0,075°		
šířka snímaného území	0,43 x h			0,43 x h		
geometrické rozlišení	0,0013 x h			0,0013 x h		
mód 2						
šířka řádku	1024 pix			320 pix		
FOV	37,7°			35,5°		
IFOV	0,037°			0,111°		
šířka snímaného území	0,68 x h			0,64 x h		
geometrické rozlišení	0,00065 x h			0,0019 x h		
zdroj: AISA Dual hyperspectral sensor, Spectral Imaging Ltd.						



obr. 1.5: hyperspektrální systém AISA-Dual
 Hyperspektrální obrazový skener AISA Dual s příslušenstvím.
 Převzato z: AISA Systems, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland

2 URČOVÁNÍ OBSAHU CHLOROFYLU Z HYPERSPEKTRÁLNÍCH OBRAZOVÝCH DAT

2.1 Chlorofyly a jejich spektrálních vlastnosti

Fotosyntéza je z hlediska existence života na Zemi pokládána za jeden z nejdůležitějších biochemických procesů. Zcela zásadní roli při ní hrají listová barviva, zejména pak chlorofyly (chlorofyl a – C_a a chlorofyl b – C_b). Dalšími skupinami listových barviv jsou pak karotenoidy (karoteny a xyntofyly) a anthokyaniny. Podle [FERET et al., 2008] se tato barviva vyskytují v listové rostlin v různých vzájemných poměrech (závislých například na stáří listu), avšak existují situace, které mohou způsobit zastavení tvorby některých barviv, což má za následek, že se jejich vzájemný poměr oproti normálnímu stavu výrazně změní. Jako příklad je zde uveden vliv abiotických stresů působících na rostlinu – například vysoké koncentrace přízemního ozónu, oxidu siřičitého či těžkých kovů, nedostatek vody nebo virové nákazy. V případě problematiky studované v rámci této práce je tímto stresem lýkožrout. Změna poměru jednotlivých barviv však kromě vlivu různých stresorů nastává i z přirozených příčin – příkladem může být například podzimní senescence listnatých stromů, při které dochází k rozpadu chlorofylu a nástupu jiných barviv (xyntofylů a karotenoidů), což má za následek charakteristické „barvení listů“.

Obsah jednotlivých barviv v listové je možné využít jako indikátor zdravotního stavu vegetace, přičemž podle [FERET et al., 2008] koncentrace chlorofylu popisuje celkovou fotosyntetickou funkčnost rostliny. Změna poměru zastoupení jednotlivých barviv má pak za následek změnu spektrálních vlastností listové. V oboru tzv. fotosynteticky aktivního záření (v intervalu 400 – 700 nm) vykazuje chlorofyl díky silné absorpci záření nízkou odrazivost, přičemž oba typy chlorofylu C_a a C_b mají poměrně specifické absorpční vrcholky. Podle [USTIN et al. 2009] jde o vlnové délky 430 a 662 nm v případě C_a a 453 a 642 nm v případě C_b . Z tohoto důvodu je k výpočtu obsahu chlorofylu v rostlinách využíváno okolí těchto vlnových délek.

Reflektance vegetace je naopak velmi vysoká v oboru blízkého infračerveného záření (tj. v tzv. oblasti buněčné struktury).

Podle [MOORTHY et al., 2003] je možná vymezení dva základní přístupy k výpočtu obsahu chlorofylu. První přístup je založen na výpočtu statistické závislosti (korelace) mezi odrazivostí a koncentrací listových barviv. Tento přístup je sice technicky jednodušší, avšak jeho použití na vícero druhů rostlin současně není možné (u každého druhu je závislost mezi odrazivostí a koncentrací listových barviv odlišná), stejně tak je nemožné aplikovat jeden model na různé scény (v nichž panovaly jiné podmínky). Druhou možností je aplikace fyzikálních modelů popisujících šíření záření při interakci s povrchem vegetace o známých optických vlastnostech. Tyto modely jsou označovány jako modely radiativního transferu.

2.2 Optické vlastnosti listové rostlin a jejich měření

Optické vlastnosti listové rostlin mají naprosto zásadní vliv na šíření záření. Při interakci fotonu záření s povrchem listu mohou podle [MALENOVSKÝ et al. 2008] nastat dvě alternativy: a) záření je od povrchu listu odraženo. V tomto případě jde o zrcadlový odraz při kterém se úhel dopadu záření rovná úhlu odrazu záření. b) foton pronikne do nitra listu, kde je postupně odražen jednotlivými buňkami. Foton pak může být z listu opět uvolněn nebo absorbován. V případě absorpce je energie fotonu využita na excitaci atomů biochemických látek uvnitř listu. Foton je pak opět vyzářen, avšak protože část jeho energie byla spotřebována na výše zmíněnou excitaci, je vlnová délka tohoto záření delší. V tomto případě se jedná zejména o tepelné záření emitované rostlinami. Pokud není foton záření ani odražen ani absorbován,

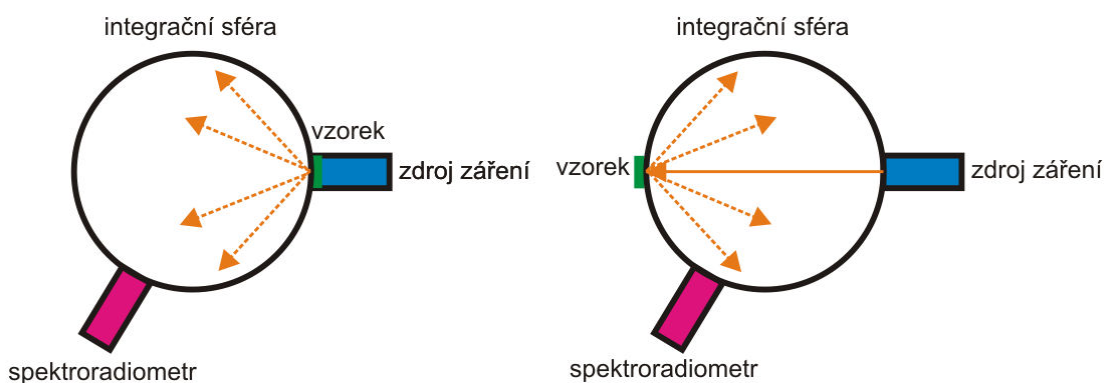
prochází skrz list beze změny – pak hovoříme o propuštěném záření. Podle zákona o zachování energie musí platit, že suma energií odraženého, absorbovaného a propuštěného záření musí být rovna energii záření dopadajícího, neboli musí platit vztah:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

kde: ρ = reflektance (podíl odraženého záření ku záření dopadajícímu); α = absorpce (podíl absorbovaného záření ku záření dopadajícímu); τ = transmitance (podíl propuštěného záření ku záření dopadajícímu).

Reflektance (odrazivost, ρ), absorpce (pohltivost, α) a transmitance (propustnost, τ) jsou tak třemi základními parametry, které v případě zkoumání optických vlastností listoví sledujeme.

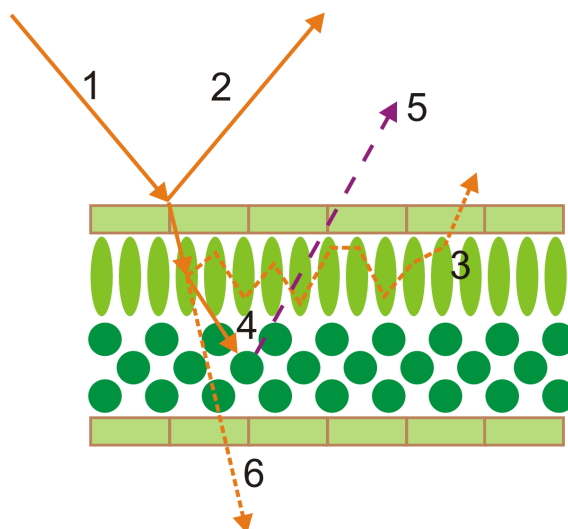
Optické parametry listoví je možné zjistit přímo (z odebraných vzorků) pomocí spektrometru a integrační sféry (integruje záření z celého povrchu sféry). Funkčnost tohoto zařízení je znázorněna na obrázku 2.1. Výsledkem těchto měření je získání křivky reflektance a transmitance. Plocha mezi těmito křivkami pak odpovídá absorpci (z hodnot ρ a τ , zjištěných pomocí měření spektrometrem, je pak možné absorpci jednoduše dopočítat jako $\alpha = 1 - \rho - \tau$).



obr. 2.1: Integrační sféra:

Integrační sféra slouží k integraci záření ze všech směrů při laboratorním měření optických vlastností listoví rostlin – vlevo při měření transmitance (τ), vpravo při měření reflektance (ρ).

Z výsledků publikovaných v [MALENOVSKÝ et al., 2006a] vyplývá, že obsah biochemických komponent a struktura (a tím pádem i optické vlastnosti) závisí na prostředí, v němž se listy nacházejí. Jedná se zde zejména o věkovou třídu, a dále pak o polohu listu v koruně stromu. V případě smrku ztepilého je v tomto článku demonstrován rozdíl mezi jehlicemi z nejvyšší, střední a spodní části koruny. Nejvyšší část koruny je osvětlena sluncem prakticky po celý den. Střední část koruny je osvětlena jen část dne a po zbytek času je zastíněna. Spodní část koruny je pak zastíněna trvale. V případě optický parametrů jehlic je pak možné sledovat celkový posun křivek reflektance a transmitance, kdy se transmitance jehlic spodní části koruny (oproti trvale osvětleným jehlicím v horní části koruny) zvyšuje, zatímco reflektance se snižuje. Absorpce (tedy plocha mezi křivkami reflektance a transmitance) však zůstává stále stejná. Podle autorů je tato skutečnost způsobena změnou vnitřní struktury jehlic (mezofylu), která ovlivňuje právě transmitanci a reflektanci. Naopak koncentrace listových barviv (která ovlivňuje absorpci) je ve všech částech koruny přibližně stejná. Tyto skutečnosti jsou pak velmi důležité při odběru vzorků jehlic pro potřeby parametrizace modelů radiativního transferu a interpretace získaných výsledků.



obr. 2.2: Interakce fotonu s listem podle [MALENOVSKÝ, 2008]:
dopadající sluneční záření (1), záření odražené povrchem listu (2) – zrcadlový odraz, záření které vstoupilo do nitra listu a posléze bylo opět vyzářeno (3) – rozptýlené záření, záření pohlcené rostlinnými barvivy (4) – část energie tohoto záření je spotřebována na excitaci atomů molekul těchto látek – záření je pak opět emitováno, nyní již s nižší energií a tudíž i delší vlnovou délkou (5). Propuštěné záření (6).

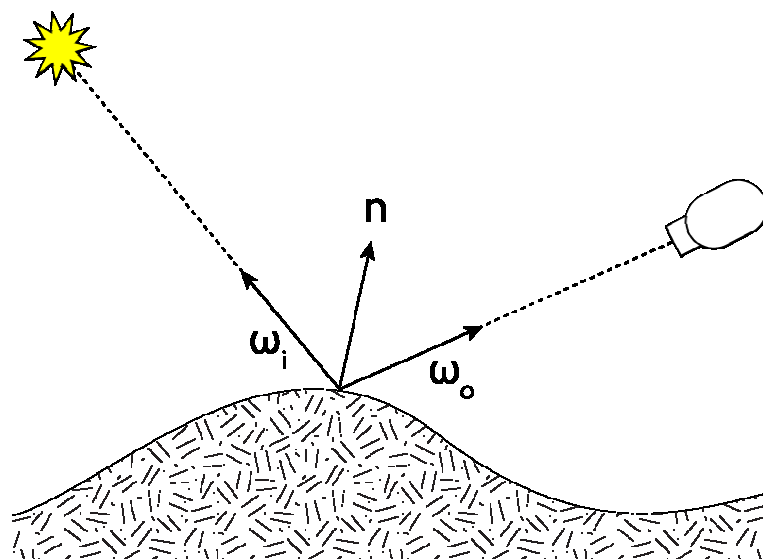
2.3 Teorie modelů radiativního transferu

Teorie modelů radiativního transferu řeší šíření slunečního záření od okamžiku jeho vstupu do zemské atmosféry přes interakci s jejími částicemi a následně se zemským povrchem až po detekci tohoto záření senzorem. Šíření záření na základě teorie radiativního transferu může být podle [MALENOVSKÝ et al., 2007] úspěšně vyřešeno pouze za předpokladu, že známe podmínky na spodní i horní hranici takového modelu. Nejjednodušším typem modelů radiativního transferu je situace, kdy bereme v úvahu pouze vztah atmosféry a zemského povrchu. Zmíněnou spodní hranicí je v tomto případě zemský povrch (odrážející záření v souladu s teorií bi-direkcionální reflektanční distribuční funkce), horní hranicí pak je svrchní okraj zemské atmosféry.

Dvousměrová (bi-direkcionální) reflektanční distribuční funkce (BDRF) popisuje odraz záření na matném neprůsvitném povrchu. Obsahuje celkem 2 parametry: směr přicházejícího záření (ω_i), směr odcházejícího záření (ω_o) – oba tyto směry jsou vztaženy vůči kolmici k povrchu, přičemž jsou definovány na základě azimutu (A) a zenitového úhlu (z). Výstupem funkce je pak podíl intenzity záření odraženého ve směru ω_o ku intenzitě dopadajícího záření ze směru ω_i (viz. obr. 3). Povrchy, pro které je hodnota BDRF ve všech směrech ω_o stejná (tzv. že povrch odráží záření do všech směrů stejně) pak označujeme jako lambertovské. BDRF byla poprvé definována Edwardem Nicodemusem [NICODEMUS, 1965], přičemž v matematickém vyjádření je možné ji zapsat jako:

$$f_r(\omega_i, \omega_o) = \frac{dL_r(\omega_o)}{dE_i(\omega_i)} = \frac{dL_r(\omega_o)}{L_i(\omega_i) \cos \theta d\omega_i}$$

Kde $L_r(\omega_o)$...zář ve směru ω_o ; $E_i(\omega_i)$...intenzita dopadajícího záření ze směru ω_i , $L_i(\omega_i)$...zář ve směru ω_i , θ_i ...úhel mezi směry ω_i a normálou v místě dopadu záření n



obr. 2.3: Bi-direkcionální reflektanční distribuční funkce
Schématické znázornění odrazu záření na matném povrchu podle teorie bi-direkcionální reflektanční distribuční funkce.

Modely, předpokládající povrch jako horizontálně homogenní, neohraničené, avšak vertikálně nehomogenní a ohraničené plochy, jsou označovány jako jednodimenzionální (1D) [MALENOVSKÝ et al., 2007]. Podle [MALENOVSKÝ et al., 2007], však tento přístup není možné použít v případě vertikálně heterogenních a nesouvislých lesních porostů. Z tohoto důvodu byly vyvinuty třidimenzionální modely radiativního transferu, které již s vertikální heterogenitou zemského povrchu počítají. Oba typy modelů přitom počítají s reflektancí určenou na úrovni korun stromů (TOC – Top Of Canopy). Abychom ji však získali, je nejprve nutné odstranit vliv atmosféry, což je opět možné pomocí modelů radiativního transferu – tentokrát atmosféry (tyto modely řeší charakteristiku částic aerosolů a plynů, způsobujících absorpci a rozptyl záření v atmosféře).

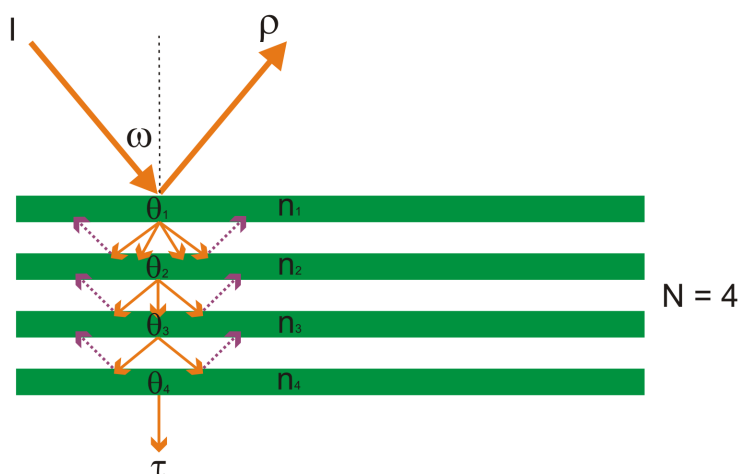
Modely radiativního transferu mohou být aplikovány v několika prostorových úrovních. V případě studia vegetace jsou v praxi využívány dvě základní úrovně – přenos záření na úrovni listů (u jehličnatých stromů jehlic) a přenos záření na úrovni celých korun stromů. Optické vlastnosti vegetace mohou být podle [ZARCO-TEJADA, 2001] nejprve simulovány na úrovni jednotlivých listů, a pak převedeny na úroveň celých stromů. V rámci zpracování této práce bude použit model radiativního transferu na úrovni listu PROSPECT spolu s 3D modelem DART na úrovni korun smrku ztepilého.

Modely radiativního transferu je možné použít pro přímé modelování (forward modelling) reflektance simulované scény (ze znalosti vstupního záření, optických a strukturálních charakteristik povrchu). Tato aplikace má uplatnění při teoretických studiích chování simulovaných objektů. Druhou možností je provést inverzi jejich výsledných simulací oproti reálně pozorovaným reflektancím. V tomto případě se snažíme najít odpovídající vstupní parametry modelu (např. již zmiňované množství chlorofylu a+b apod.)

2.4 PROSPECT: model radiativního transferu na úrovni listu

PROSPECT je model radiativního transferu založený na tzv. plošném modelu (plate model) simulujícího optické vlastnosti listové rostliny v intervalu vlnových délek 400 – 2500 nm. Plošný model, který byl poprvé publikován v [ALLEN et al., 1969]. Pracuje s listy rostlin jako s kompaktními homogenními plochami. Vnitřní struktura listů nebyla uvažována. V původní podobě byl model parametrizován pouhými třemi parametry: efektivním indexem lomu n , úhlem

dopadu záření ω a koeficientem propustnosti θ . Později byl model rozšířen o popis vnitřní struktury listu, jenž byl nyní považován za plochu skládající se z N homogenních vrstev, mezi nimiž se nachází $N-1$ „prázdných“ prostorů. Vnitřní struktura listu byla popsána na pomoci indexu VAI (Void Area Index), kde: $VAI = N - 1$. Dále bylo demonstrováno, že pro jednoděložné rostliny je $VAI = 0$, tj. jejich listy lze považovat za kompaktní plochy tvořené jednou vrstvou, zatímco pro dvouděložné rostliny to již možné není. Po úpravě popsané v [JACQUEMOUD, BARET, 1990] pracuje model se čtyřmi vnitřními parametry: úhlem dopadu záření ω , indexem lomu n , koeficientem propustnosti θ a ukazatelem struktury listu N .



obr. 2.4: princip modelu PROSPECT podle [JACQUEMOUD, BARET 1990 a JACQUEMOUD, USTIN 2001]:
 Model PROSPECT vychází ze staršího plošného modelu popsaného W. Allaniem v roce 1969. Narozdíl od něj však uvažuje list jako soustavu N homogenních vrstev, z nichž každá je definována svým indexem lomu n a indexem propustnosti. Zároveň je sledován úhel, po kterém záření dopadá na první vrstvu (úhel dopadu - ω). Záření šířící se uvnitř listu (tj. po průchodu první vrstvou) je považováno za difúzní a izotropní. Část záření je pak odrážena přímo na povrchu listu (ρ) podle zákona zrcadlového odrazu (tj. úhel dopadu ω je roven úhlu odrazu ω'). τ označuje propuštěné záření.

Model PROSPECT verze 3.0.1 umožňuje výpočet na základě čtyř vstupních parametrů: N , koncentrace chlorofylu C_{ab} , obsahu vody C_w a obsahu sušiny C_m . Zadání hodnot těchto parametrů (zjištěných laboratorně) je pak základem parametrizace modelu. V rámci modelu PROSPECT je určován spektrální koeficient absorpce $k_0(\lambda)$, který je definován jako:

$$k_0(\lambda) = k_e(\lambda) + \left(\frac{C_{ab} \cdot k_{ab}(\lambda) + C_w \cdot k_w(\lambda) + C_m \cdot k_m(\lambda)}{N} \right)$$

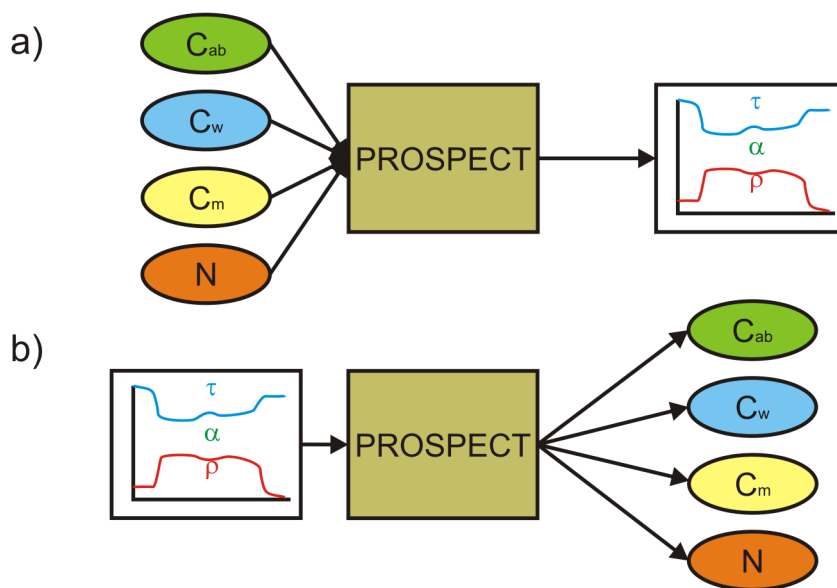
kde: $k_{ab}(\lambda)$...spektrální koeficient absorpce chlorofylů (v intervalu 400-750 nm), $k_w(\lambda)$...spektrální koeficient absorpce vody (v intervalu 950-2500 nm), $k_m(\lambda)$...spektrální koeficient absorpce sušiny (v intervalu 400-2500 nm – tedy v plné šířce spektra), $k_e(\lambda)$...spektrální koeficient absorpce listové zbarveného listových barviv.

Modely odvozené z Allenova plošného modelu však mohou být podle [MOORTHY et al., 2003] použity pouze v případě listnatých stromů. Pro jehličnaté stromy je však aplikace těchto modelů vyloučená z důvodu komplexnější struktury jehlic jehličnatých porostů. Specificky pro jehličnaté stromy byl vyvinut například LIBERTY, popsáný v [MOORTHY, et al., 2003]. Toto tvrzení je v souladu s [MALENOVSKÝ et al., 2006a], nicméně autoři v tomto případě navrhuje a zároveň prakticky prověřují možnost modifikace a recalibrace modelu PROSPECT tak, aby byla možná jeho aplikace i na jehličnaté stromy (konkrétně na smrk ztepilý). Tato verze je označována jako PROSPECT 3.01 S. Jedním z důvodů úpravy modelu PROSPECT pro jehličnaté (smrkové) porosty je jeho relativní jednoduchost vyplývající z malého množství

vstupních parametrů a jeho snadná inverze. Zmíněný model LIBERTY, určený pro aplikaci na jehličnaté porosty totiž obsahuje výrazně vyšší počet vstupních parametrů (celkem 9 – viz [MOORTHY et al., 2003]). Zjištění všech těchto vstupních parametrů během jedné pozemní kampaně (realizované simultánně s pořizováním leteckých dat) je velmi problematické.

Model PROSPECT je možné použít buď pro přímé modelování – tj. pro vstupní parametry C_{ab} , C_w , C_m a N je simulována výsledná transmitance a reflektance, nebo je možné provést jeho inverzi. V tomto případě jsou z reflektance určeny hodnoty vstupních parametrů C_{ab} , C_w , C_m a N . Takto je však možné pracovat pouze na úrovni jednotlivých jehlic. V případě inverze hyperspektrálních obrazových dat však pozorujeme reflektanci na úrovni korun stromů (TOC), která je výsledkem komplexní struktury vegetace – obzvláště jehličnatých porostů. Z tohoto důvodu je nutná kombinace modelu PROSPECT s modelem radiativního transferu na úrovni celých korun – v našem případě 3D modelu radiativního transferu DART (viz dále.)

Na závěr dodejme, že v současné době jsou již v praxi aplikovány modely PROSPECT verzí 4 a 5, představené v [FERET et al., 2008]. Změnou je zde především dílčí přepracování vstupních parametrů (resp. způsobů jejich určení). V případě modelu PROSPECT 4 (stejně jako v předchozích verzích modelu) nebyly vzájemně odlišovány vlivy chlorofylů a karotenoidů, které se v určité části spektra vzájemně překrývají. Ve nejnovější verzi PROSPECT 5 již jsou vlivy obou druhů barviv odlišeny přidáním parametru C_{xc} (koncentrace karotenoidů) do výpočtu. Autoři však sami připouštějí, že přesnost určení obsahu karotenoidů pomocí inverze tohoto modelu je oproti určení koncentrace chlorofylů nižší.



obr. 2.5: Přímé a inverzní použití modelu PROSPECT:

a) přímé použití modelu PROSPECT: ze vstupních parametrů C_{ab} , C_w , C_m a N získáváme optické vlastnosti (α , ρ , τ) listové pro vlnové délky v intervalu 400 – 2500 nm.

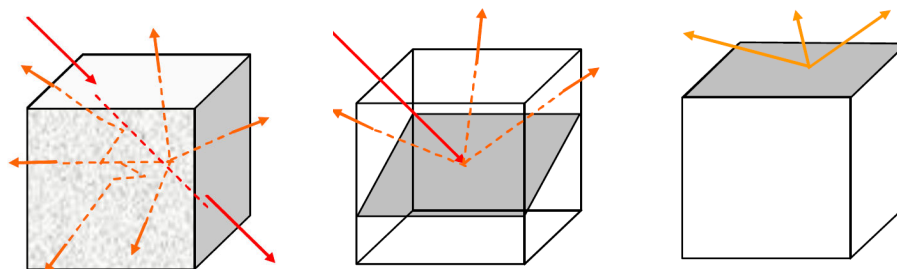
b) inverzní použití modelu PROSPECT: z optických vlastností listové v intervalu 400 – 2500 nm získáváme biochemické a biofyzikální parametry C_{ab} , C_w , C_m a N .

2.5 DART: model radiativního transferu na úrovni korun

DART (Discrete Anisotropic Radiative Transfer) je třídímní model radiativního transferu určený ke studiu šíření záření v přírodních i antropogenních scénách. Současná verze pak umožňuje modelovat i šíření záření delších vlnových délek (300 – 15 000 nm) [GASTELLU-ETCHEGORY, MARTIN, GASCON, 2004]. Model pracuje ve dvou odlišných módech: R pro kratší vlnové délky (simuluje odrazivost zemského povrchu) a T pro obor termálního infračerveného záření (simulujeme tepelnou emisivitu povrchu) [CESBIO, 2009].

Základními stavebními jednotkami modelu DART jsou pravoúhlé buňky různých velikostí. Z těchto buněk se pak skládá celá modelovaná scéna. Vzhledem k heterogenitě povrchu se v modelu vyskytují buňky různých druhů. Každý druh buněk je pak popsán určitými atributy, které definují chování buňky vůči přichozímu záření. Z tohoto pohledu je pak možné rozlišit dvě základní rodiny buněk a to buňky:

- **průsvitné, rozptylující záření** (vzduch, koruny stromů aj.)
- **neprůsvitné** (půda, budovy aj.)



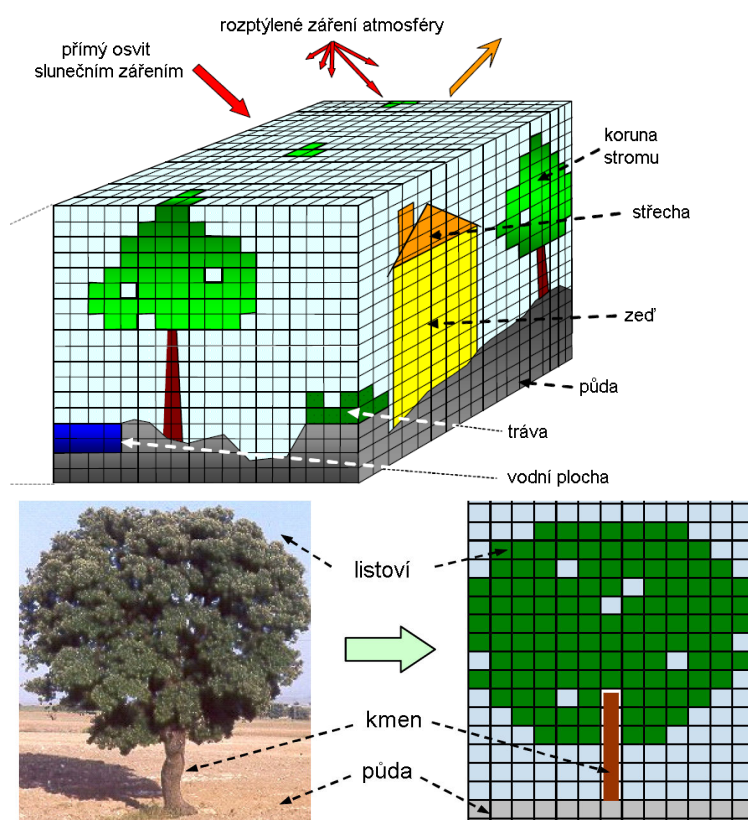
obr. 2.6: typy buněk modelu DART (převzato z CESBIO, 2009):
Model DART rozlišuje dva základní typy buněk: a) buňky průsvitné (vlevo); b) neprůsvitné (uprostřed a vpravo).

Kromě toho je pak možné jednotlivé buňky rozdělit na základě jejich příslušnosti k různým typům zemského povrchu. Z tohoto pohledu se v modelu DART vyskytuje 5 základních skupin buněk a to:

- **vzduch**
- **půda**
- **vegetace**
- **stavby**
- **vodní plochy**

Záření se v rámci modelu může šířit pouze v konečném počtu směrů (Ω_i) pod prostorovým úhlem $\Delta\Omega_i$. Množinu N směrů Ω_i označme jako Ω_N . V bodě o poloze r pak definovat tzv. zdrojový vektor $W(r, \Omega_i)$. Model pak pro všechny směry Ω_i (tj. pro množinu Ω_N) vyhledává buňky, kterými prochází jakýkoliv zdrojový vektor, mající počátek v centru buňky nebo ve středu její jakékoliv stěny.

Po dopadu záření na nejnižší vrstvu buněk je pak modelem řešen postup záření mezi jednotlivými buňkami, kdy záření vystupující z jedné buňky je zároveň vstupem pro buňku sousedící



obr. 2.7: model DART – základní princip (převzato z CESBIO, 2009):
Model radiativního transferu DART reprezentuje modelovanou scénu jako soustavu pravoúhlých (krychlových) buněk o zadaných parametrech. Simulace základních prvků krajiny (nahore). Simulace stromu pomocí modelu DART.

v daném směru. Model přitom počítá i s postupem a dílčím rozptylem záření uvnitř jednotlivých buněk. Tímto způsobem je pak ve výsledku možné simulovat charakteristiky odrazivosti celé scény.

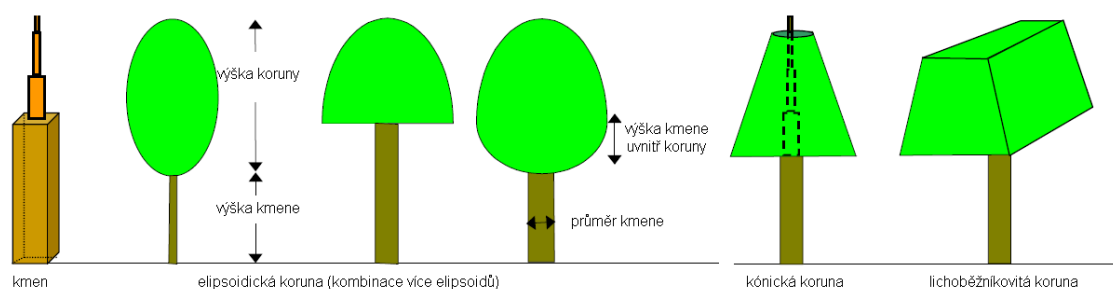
Jednotlivé buňky pak tvoří dohromady určité skupiny, které již odpovídají reálným objektům našeho světa. Příkladem takových objektů může být například strom (viz obr. 2.7). Ten se v modelu DART skládá z buněk několika typů (zpravidla typy „kmen“, „větve“, „koruna“). Vzhledem k tématu této práce rozebereme podrobněji způsob, jakým jsou v modelu DART modelovány právě lesní porosty.

Modelování lesních porostů se skládá ze dvou dílčích částí. První z nich je popis struktury stromů, druhou částí je pak definice jejich prostorového rozmístění v rámci simulované scény. Jak již bylo zmíněno výše, strom mohou reprezentovat buňky několika typů, např.: kmen, větve, drobné větvičky, listoví a prázdné prostory. Typ stromu, který se následně bude v modelu vyskytovat, je pak popsán celou řadou parametrů:

- **tvar koruny:** elipsoidická, část elipsoidu, kuželovitá, lichoběžníková aj. zadávána je i výška koruny
- **počet úrovní koruny:** počet úrovní vertikálního členění koruny
- **hustota listoví:** odvozeno z indexů LAI (Leaf Area Index) a LAD (Leaf Angle Distribution)
- **rozložení listoví:** odvozeno z horizontálního a dvojice vertikálních profilů hustoty listoví
- **optické parametry listoví:** zadává se reflektance, absorpce a transmitance (listoví je považováno za průsvitné prostředí)
- **množství prázdných prostor:** procentuální zastoupení prázdných prostor v koruně
- **přítomnost drobných větviček:** určujeme, zda budeme uvažovat přítomnost drobných větviček nebo nikoliv. V případě přítomnosti drobných větviček zadáváme jejich další specifikaci (indexy TAI – Twig Area Index a TAD – Twig Angle Distribution, optické parametry větviček – odrazivost ρ a propustnost τ)
- **přítomnost větví:** obdobně jako v případě drobných větviček. V případě přítomnosti větví je definována jejich struktura
- **odrazivost větví a kmene:** zadává se reflektance a absorpce
- **geometrické charakteristiky kmene:** řešeny fyzické parametry kmene jako např. obvod, výška apod.

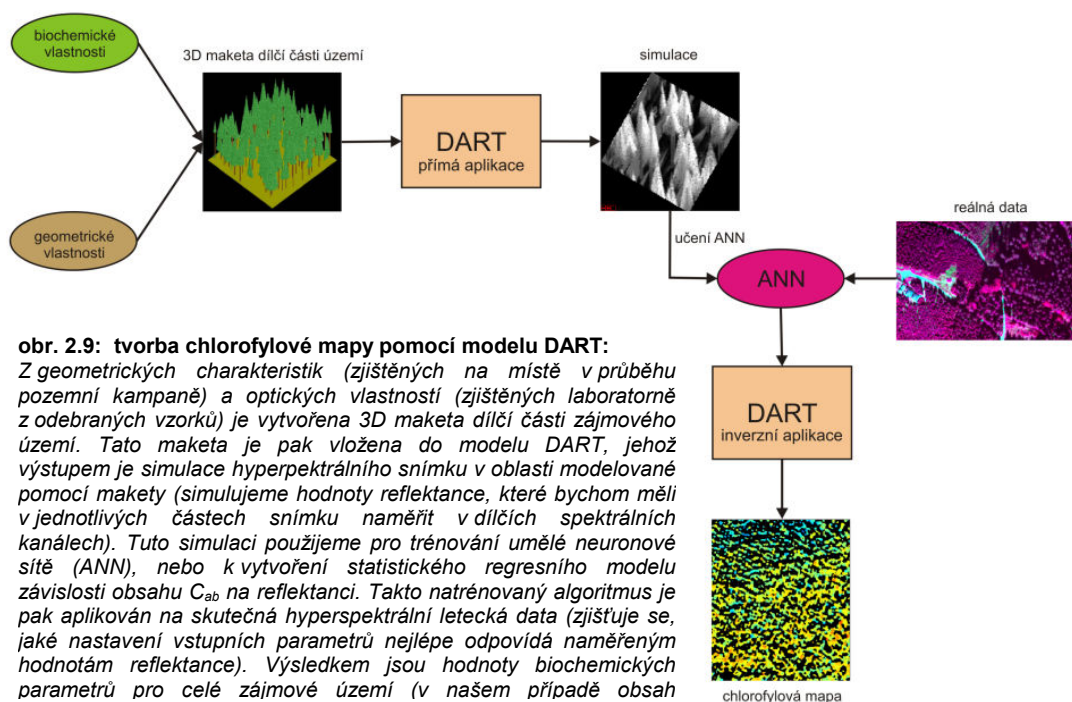
Druhou částí modelování lesních porostů je pak definice prostorového rozložení jednotlivých stromů v modelované scéně. V tomto případě mohou nastat tři případy v závislosti na našich znalostech prostorového rozložení stromů a jejich fyziologického popisu:

- **neznámá poloha, neznámý popis:** v tomto případě známe základní typ stromů, avšak neznáme hodnoty jednotlivých fyziologických parametrů ani přesné umístění (x,y) stromů ve scéně. Hodnoty fyziologických atributů jsou proto zvoleny náhodně. Náhodné je i rozmístění stromů v modelu scény.
- **známá poloha, neznámý popis:** je známa poloha každého stromu, ale nejsou známy fyziologické parametry – ty jsou voleny náhodně.
- **známá poloha, známý popis:** poloha každého stromu je známa, známy jsou také parametry, popisující fyziologickou stavbu stromů.



obr. 2.8: geometrické parametry modelovaných stromů (převzato z CESBIO, 2009):
 Základní typy korun stromů používané při modelování v modelu DART.

Princip použití modelu DART spočívá v tom, že nejprve jsou vytvořeny tzv. makety lesního porostu (jakýsi virtuální 3D model porostu). Makety lesního porostu simulované pomocí modelu DART jsou parametrizovány za pomoci pozemních měření optických vlastností (reflektance a transmitance) korun několika reprezentativních jedinců (v tomto případě smrku ztepilého). Jejich strukturální parametry (prostorové rozmístění biomasy, tvar koruny apod.) jsou získávány z dat pozemního laserového snímání (LIDAR) a přímého (destruktivního) měření. Model je spuštěn iterativně pro sadu volných vstupních parametrů, přičemž jsou simulovány veškeré jejich možné kombinace. Výsledkem simulací jsou obrazová data TOC reflektancí parametrizovaného porostu v daných simulovaných spektrálních pásmech. Hodnoty reflektance osvětlených korun simulovaných scén jsou spolu s jejich vstupními parametry uloženy do databáze. Pro tuto databázi simulovaných hodnot je následně provedena inverze oproti reálně nasnímaným hyperspektrálním datům (kalibrovaným na reflektanci), např. s využitím metody umělých neuronových sítí (ANN) nebo za pomoci regresního modelu, kdy jsou hodnoty simulované modelem DART použity jako trénovací množiny (viz. obr. 2.9).



obr. 2.9: tvorba chlorofylové mapy pomocí modelu DART:
 Z geometrických charakteristik (zjištěných na místě v průběhu pozemní kampaně) a optických vlastností (zjištěných laboratorně z odebraných vzorků) je vytvořena 3D maketa dílčí části zájmového území. Tato maketa je pak vložena do modelu DART, jehož výstupem je simulace hyperpektrálního snímku v oblasti modelované pomocí makety (simulujeme hodnoty reflektance, které bychom měli v jednotlivých částech snímku naměřit v dílčích spektrálních kanálech). Tuto simulaci použijeme pro trénování umělé neuronové sítě (ANN), nebo k vytvoření statistického regresního modelu závislosti obsahu C_{ab} na reflektanci. Takto natrénovaný algoritmus je pak aplikován na skutečná hyperspektrální letecká data (zjišťuje se, jaké nastavení vstupních parametrů nejlépe odpovídá naměřeným hodnotám reflektance). Výsledkem jsou hodnoty biochemických parametrů pro celé zájmové území (v našem případě obsah

2.6 Optické indexy používané pro studium obsahu chlorofylu

V případě získávání kvantitativních ukazatelů prostřednictvím dat dálkového průzkumu Země se snažíme nalézt jednoznačný funkční vztah mezi naměřenou hodnotou reflektance a zkoumaným parametrem (v našem případě obsah C_{ab}). Tento funkční vztah je možné řešit buď přímo, tj. hledáním závislosti mezi zkoumaným ukazatelem a reflektancí (s využitím různých transformací – např. continuum removal), nebo nepřímo prostřednictvím optického indexu. Optický index by měl podle [LIANG, 2004] vykazovat silnou funkční závislost ke zkoumanému parametru, avšak zároveň by měl být co možná nejméně citlivý na ostatní vlivy, které se zkoumaným jevem nesouvisí (např. vliv půdy, geometrie snímání, směr nasvícení sluncem aj.).

Jedním z prvních vegetačních indexů, používaných pro studium vegetace, byl index NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*):

$$NDVI = \frac{VIS_R - NIR}{VIS_R + NIR} \text{ [ROUSE et al., 1973]}$$

Podle [LIANG, 2004] vykazuje index NDVI silnou korelaci s množstvím zelených rostlin, obsahem chlorofylu a vody ve vegetaci. Nevýhodou je však silná závislost tohoto indexu na hustotě vegetace. V případě, že je vegetace příliš řídká, se značně silně uplatňovat vliv pozadí (např. půdy), což může výslednou hodnotu indexu silně zkreslit. Naopak v případě, že je vegetace příliš hustá, dochází k saturaci v oblasti VIS_R (reflektance se v tomto oboru při dalším nárůstu hustoty vegetace již nezvyšuje), avšak reflektance v oboru NIR dále roste. Index NDVI navíc počítá s velkou šířkou spektrálních kanálů obrazových dat, což je pro potřeby výpočtu kvantitativních ukazatelů nevhodné.

Z tohoto důvodu byl z indexu NDVI odvozen index $mNDVI_{705}$ (*Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index*) určený pro aplikaci nad daty s velmi vysokým spektrálním rozlišením (hyperspektrální data):

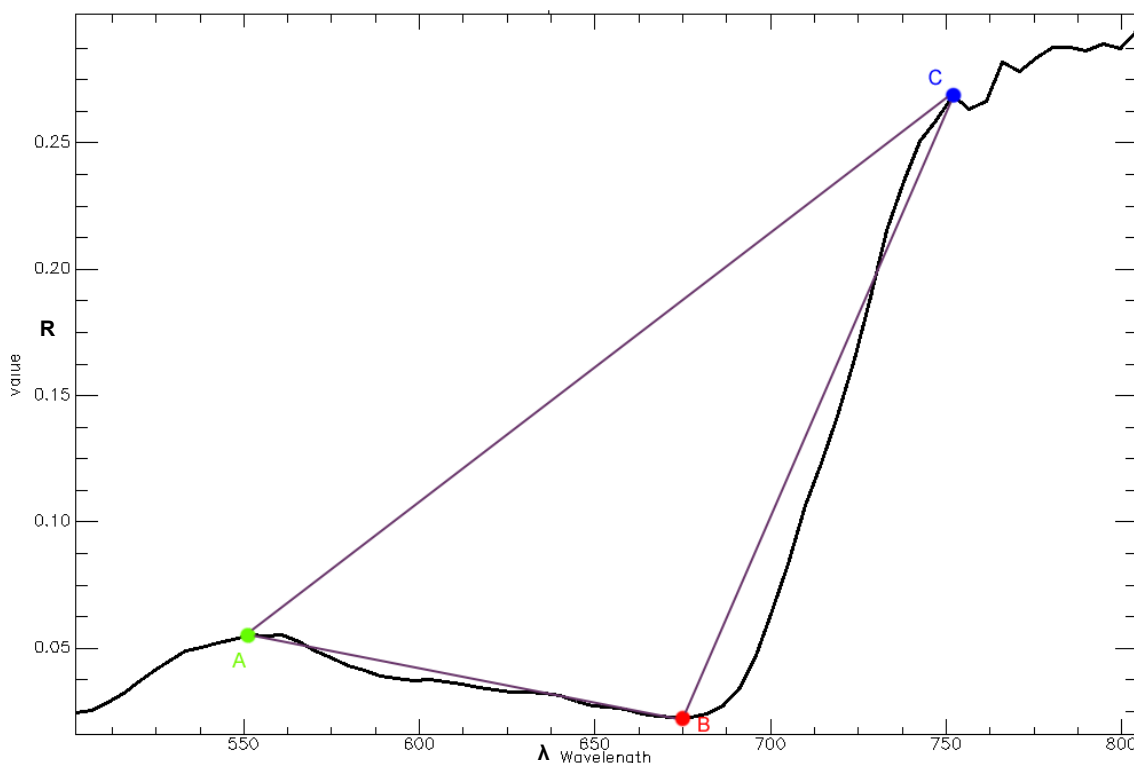
$$mNDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705}} \text{ [DATT, 1999]}$$

Zelená vegetace vykazuje typický spektrální útvar v oblasti VIS_G , VIS_R a NIR. V oboru VIS_G se nachází typické lokální maximum reflektance způsobené vysokou odrazivostí chlorofylu, který je následován typickou spektrální prohlubní v oboru VIS_R , jenž je naopak způsobena silnou absorpcí záření chlorofylem. Následně dochází k prudkému nárůstu reflektance způsobenému mnohonásobnými odrazy záření od buněk listové vegetace. Broge a Leblanc (2000) v tomto případě navrhují index TVI (*Triangular Vegetation Index*) založený na sledování reflektance ve třech vlnových délkách – v oblasti maxima reflektance chlorofylu (550 nm), v oblasti nevyšší absorpce záření chlorofylem (670 nm) a v oblasti vysoké odrazivosti buněčné struktury (750 nm). Tyto tři body vymezují v grafu reflektance trojúhelník (viz obr. 2.10), jehož plocha se mění právě v závislosti na obsahu chlorofylu.

$$TVI = \frac{120 \cdot (\rho_{NIR} - \rho_g) - 200 \cdot (\rho_r - \rho_g)}{2} \text{ [BROGE, LEBLANC, 2000]}$$

Stav vegetace se silně projevuje zejména v oblasti elektromagnetického záření na rozhraní červené části viditelného záření a blízkého infračerveného záření (tzv. red-edge oblast). Podle [LIANG, 2004] je možné sledovat souvislost stavu vegetace (obsahu chlorofylu) a

polohy inflexního bodu reflektanční křivky v oblasti red edge (tj. v oblasti prudkého nárůstu reflektance vegetace mezi cca 670 – 750 nm). Růst obsahu zelených barviv pak způsobuje podle [LIANG, 2004] posun inflexního bodu reflektanční křivky směrem k delším vlnovým délkám, úbytek naopak způsobuje jeho posun do oblasti kratších vlnových délek. Poloha inflexního bodu křivky reflektance v oblasti red-edge je pak označována jako *Red Edge Position Index* (REP).



obr. 2.10: Triangular Vegetation Index (TVI)

Triangular Vegetation Index je založen na výpočtu obsahu trojúhelníka vymezeného maximální odrazivostí chlorofylu (A), maximální absorpcí chlorofylu (B) a vysokou odrazivostí buněčné struktury vegetace (C).

V některých případech je využívána kombinace více indexů, sloužící zejména k potlačení vlivu pozadí a dále pak k redukci vlivu struktury vegetace. Příkladem může být kombinace (podíl) indexů TCARI (*Transformed Chlorophyll Absorption Ratio Index*) OSAVI (*Optimized Soil Adjusted Vegetation Index*) popisovaná v [HABOUDANE et al., 2002].

$$TCARI = 3 \cdot \left[(\rho_{700} - \rho_{670}) - 0,2 \cdot (\rho_{700} - \rho_{550}) \cdot \left(\frac{\rho_{700}}{\rho_{670}} \right) \right] \text{ [HABOUDANE et al., 2002]}$$

$$OSAVI = \frac{1,16 \cdot (\rho_{800} - \rho_{670})}{\rho_{800} + \rho_{670} + 0,16} \text{ [HABOUDANE et al., 2002]}$$

Pro potřeby této práce bude pro modelování vztahu obsahu chlorofylu a zjištěné reflektance použit index ANMB₆₅₀₋₇₂₅ publikovaný v [MALENOVSKÝ et al. 2006b] (viz dále).

3 ZPRACOVÁNÍ OBRAZOVÝCH DAT POMOCÍ NEURONOVÝCH SÍTÍ

3.1 Úvod do teorie neuronových sítí

Umělé neuronové sítě je možné označit za nový – alternativní přístup ke zpracování dat. Je možné je definovat jako výpočetní model určený k distribuovanému paralelnímu zpracování dat. Struktura a chování jednotlivých prvků umělých neuronových sítí přitom vychází z biologického nervového systému. Gurney ve své knize „An Introduction to Neural Networks“ definuje umělé neuronové sítě jako:

„Systém navzájem propojených elementů, jejichž činnost přibližně odpovídá činnosti biologických neuronů. Schopnost zpracovávat data je přitom dána „sílou“ jednotlivých spojů (v případě umělých neuronových sítí reprezentována váhou), která je získávána v průběhu procesu „učení sítě“ na základě množiny trénovacích dat.“

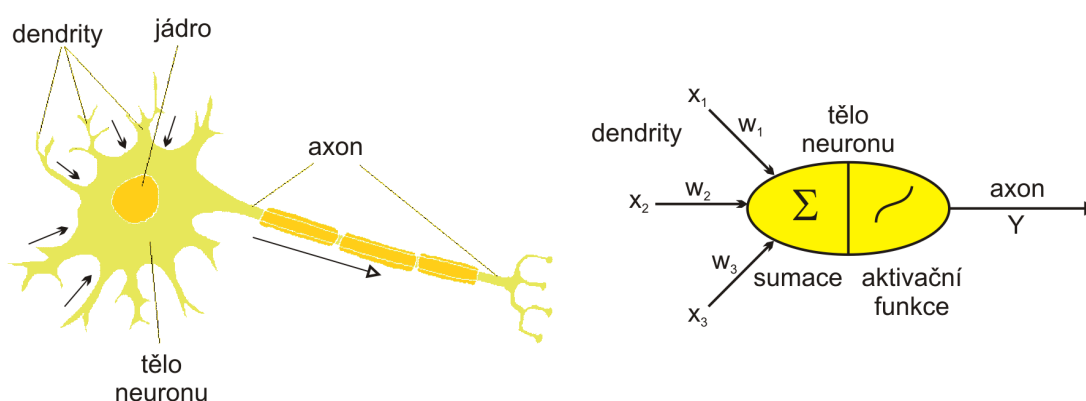
[GURNEY, 1997]

Aplikace umělých neuronových sítí se svým přístupem poněkud liší od klasického zpracování dat používaného běžně v počítačové technice. Klasické algoritmické zpracování dat je založeno na tom, že počítač postupně prochází „seznam“ instrukcí, které vykonává, čímž dojde k řešení problému. Tento přístup je tedy možné použít jedině tehdy, pokud je postup řešení (autorovi programu) znám. Pokud ovšem postup vedoucí k vyřešení daného problému znám není, tento přístup selhává. A zde je podle [STERGIOU, SIGANOS, 1996?] prostor pro nasazení umělých neuronových sítí, které do značné míry dokáží samy najít způsob jak se dobrat výsledku. Nevýhodou je podle stejných autorů ale skutečnost, že v případě neuronových sítí je do značné míry nemožné odhadnout výsledek, který použitím neuronové sítě získáme (u klasických algoritmů tvoří postup jednotlivé instrukce obsažené v programu, tj. je dopředu velmi dobře možné odhadnout, jaký výsledek získáme).

V rámci této práce jsou neuronové sítě použity ke klasifikaci hyperspektrálních snímků.

3.2 Od biologického k umělému neuronu

Jak bylo naznačeno výše, základními prvky umělých neuronových sítí jsou tzv. umělé neurony, které jsou vytvořeny tak, aby řešily určité problémy. Předobrazem těchto umělých



obr. 3.1: neuron: schéma biologického neuronu (vlevo), schéma umělého neuronu podle McCulloch-Pittsova modelu (vpravo)

neuronů jsou pak neurony „živé“ nacházející se v biologických nervových soustavách. Biologické neurony jsou navzájem propojeny výběžky, které jsou označovány jako dendrity

na jejichž koncích se nacházejí vlastní zápoje synapse. K přenosu informace dochází prostřednictvím elektrických signálů, jenž se mezi jednotlivými neurony šíří právě těmito zápoji. Dendrity tedy přivádějí signál do vlastního neuronu (tvoří tak jakýsi vstup). Výstup z neuronu naopak tvoří dlouhé vlákno – axon. Důležitou skutečností je přitom to, že zatímco dendritů (tedy „vstupních cest“) obsahuje jeden neuron řádově několik tisíc, axon („výstupní cesta“) je pouze jediný.

Také umělý neuron je charakteristický několika vstupy a jedním výstupem, přičemž vlastní „tělo“ neuronu tvoří přenosová funkce, která vstupy transformuje na výstup. Vlastnosti dendritických zápoju, přivádějících do vlastního neuronu vstupní signál, jsou v případě umělých neuronů reprezentovány jednotlivými váhami (jenž jsou odvozovány z důležitosti jednotlivých vstupů). Každý vstup je tedy nejprve touto tzv. synaptickou váhou vynásoben, a teprve potom přenesen do vlastního těla neuronu. Zde jsou všechny vážené vstupy nejprve sumovány. Tato sumace je pak vstupem tzv. aktivační funkce neuronu [GURNEY, 1997]. Vlastní neuron je totiž aktivován až tehdy, pokud tato suma překročí určitý předem nastavený práh. V opačném případě (pokud je takto vypočtená suma příliš malá, tj. do neuronu přicházejí jen „nedůležité“ vstupy) se neuron nezapojí a zůstane v neaktivním stavu [GURNEY, 1997].

V současné době je popsána celá řada modelů umělého neuronu – nejčastěji je pak používán McCulloch – Pittsův model (popsaný Warranem McCullochem a Bradem Pittsem již v roce 1943) [STERGIOU, SIGANOS, 1996?]. Tělo neuronu je v tomto případě popsáno vztahem:

$$Y = S\left(\sum_{i=1}^N (w_i x_i) - \Theta\right)$$

kde:

S...přenosová funkce

w_i ...synaptická váha

x_i ...vstup neuronu

Θ ...aktivační práh

Y...výstup neuronu

Nejjednodušším příkladem umělého neuronu je situace, kdy je přenosovou funkcí S skoková funkce (vracející hodnotu 1 v případě, že byl překročen stanovený práh a hodnotu 0 v případě, že tohoto práhu nebylo dosaženo). Příkladem takového neuronu může být například tzv. Threshold Logic Unit (TLU), zmiňovaná v [GURNEY, 1997]. Tato funkce zpracovává vstupy $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$, které jsou tvořeny pouze logickými hodnotami (tj. 0 x 1), přičemž pro výstupní hodnotu Y platí:

$$\alpha \geq \Theta \Rightarrow Y = 1$$

$$\alpha < \Theta \Rightarrow Y = 0$$

přitom:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n w_i x_i$$

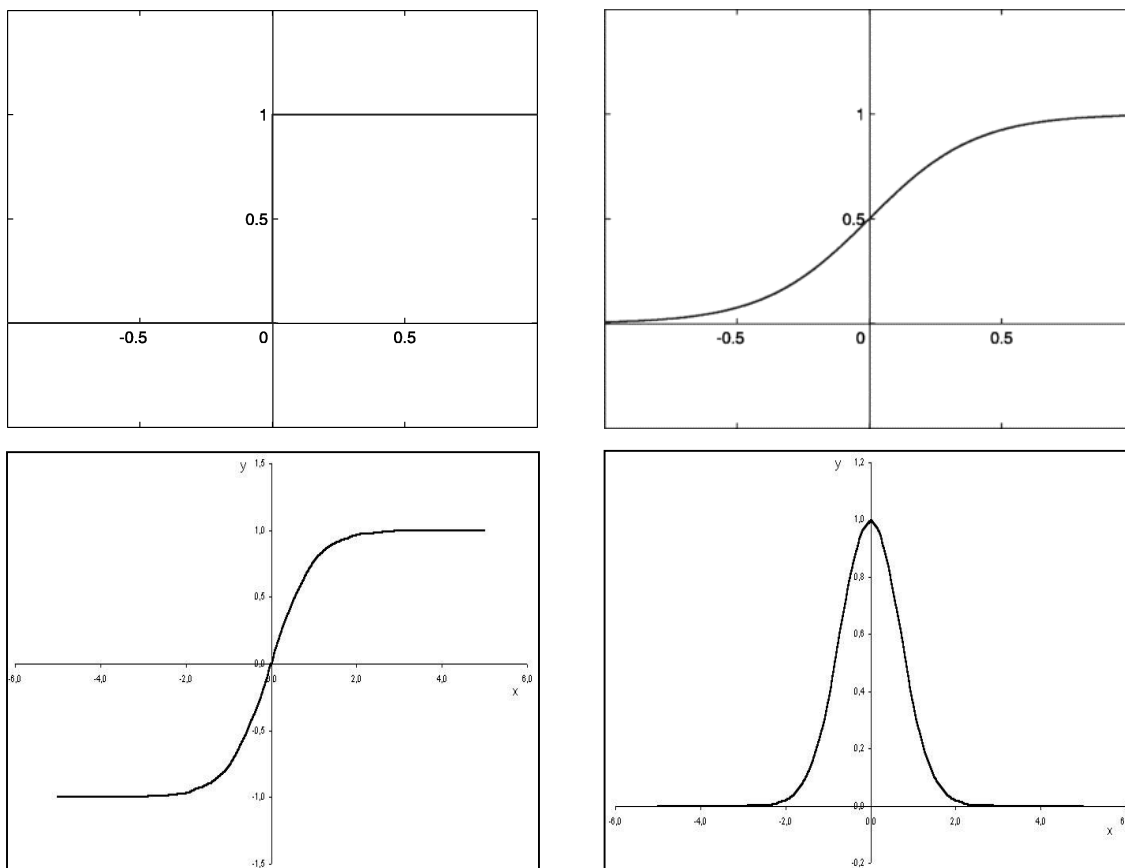
Příklad uvedený v tabulce 3.1 demonstruje funkčnost tohoto modelu neuronu v případě dvou vstupů x_1 , x_2 se synaptickými váhami 0,2 a 0,8 a aktivačním prahem 0,5

Tabulka 3.1: funkčnost umělého neuronu TLU při $\Theta=0,5$			
x_1 ($w_1=0,2$)	x_2 ($w_2=0,8$)	α	Y
0	0	0	0
1	0	0,2	0
0	1	0,8	1
1	1	1,0	1

zdroj: GURNEY, 1997

V praxi jsou pak používány často složitější aktivační funkce, z nichž vůbec nejčastěji například sigmoidální funkce [1], funkce hyperbolické tangenty [2] či funkce radiální báze [3] [GURNEY, 1997]:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-kx}} [1]; f(x) = \frac{2}{1 + e^{-kx}} [2]; f(x) = e^{-kx^2} [3]$$



obr. 3.2: aktivační funkce: grafy nejčastěji používaných aktivačních funkcí: skoková funkce (vlevo nahoře), sigmoidální funkce (vpravo nahoře), funkce hyperbolické tangenty (vlevo dole), funkce radiální báze (vpravo dole).

3.3 Klasifikace dat pomocí umělých neuronových sítí:

Neuronové sítě nacházejí v současné době uplatnění v mnoha oborech. Podle povahy zpracovávaných dat, typu neuronů a jejich propojení existuje velké množství různých architektur neuronových sítí, přičemž každý typ neuronové sítě je optimalizován na řešení určitých druhů úkolů. Z hlediska architektury neuronových sítí je možné podle [STERGIOU, SIGANOS, 1996?]

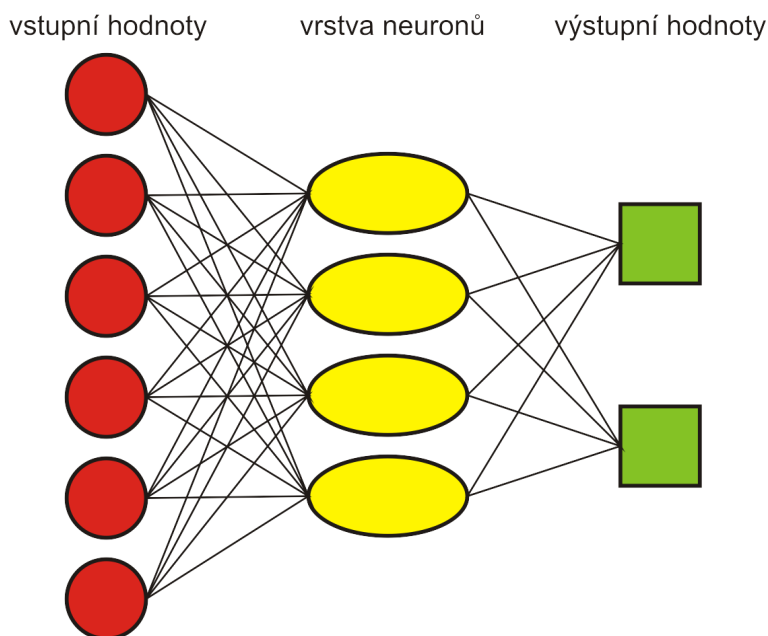
vymežit dvě základní skupiny: feedback (též recurrent) a feedforward. V případě architektury feedforward se signál šíří sítí pouze jedním směrem. V případě architektury feedback sítí obsahuje i různé smyčky, takže se signál může pohybovat vpřed i zpětně. Oproti sítím postaveným na feedforward architektuře jsou feedback sítě podle [STERGIOU, SIGANOS, 1996?] mnohem robustnějším nástrojem, avšak jejich naprogramování a příprava je výrazně složitější.

Největšího uplatnění našla technologie neuronových sítí například v rozpoznávání textur a vzorů, identifikaci rukopisu, předpovědi vývoje složitých systémů a v neposlední řadě při klasifikaci dat. Právě klasifikace obrazových dat pomocí neuronových sítí je pro tuto práci nejpodstatnější.

Jedním z nejdůležitějších typů neuronových sítí určených ke klasifikaci (obrazových) dat je síť označovaná jako perceptron. Obsahuje jednoduché neurony založené na McCulloch-Pittsově modelu, přičemž je založena na architektuře feedforward. Síť je charakteristická vrstevnatým uspořádáním. Na počátku leží vrstva vstupních hodnot, která je následována tzv. skrytou vrstvou vlastních neuronů. Na konci pak leží vrstva výstupů, kdy každé třídě, do níž data klasifikujeme, odpovídá jeden uzel. Při každém průchodu signálu sítí je všem výstupním uzlům přiřazena určitá hodnota, přičemž klasifikovaný pixel je přiřazen k uzlu (třídě), u kterého je tato hodnota největší (viz obr. 3.3).

Před zahájením vlastní klasifikace je však nejprve nutné provést nastavení sítě, jehož cílem je především zjištění synaptických vah w_i jednotlivých vstupů. K tomu je nutná množina trénovacích dat – tj. v případě obrazových dat pixelů, u nichž zařazení ke klasifikovaným třídám známe. Z tohoto důvodu můžeme klasifikaci obrazových dat pomocí neuronových sítí řadit k metodám řízené klasifikace.

Při procesu učení neuronové sítě je „trénovací“ pixel nejprve klasifikován neuronovou sítí a výsledek je pak porovnán se skutečností (tj. do které třídy pixel podle operátora skutečně patří). Pro každý výstupní uzel (třídou) se pak spočítá chyba klasifikace (Δ). Pixely, u nichž se klasifikace neuronovou sítí lišila od skutečnosti se vrací zpět na začátek procesu, přičemž vypočtená chyba Δ slouží k úpravě synaptických vah jednotlivých vstupů tak, aby se v další iteraci blížila klasifikace sítí více skutečnosti. Tomuto procesu se říká back-propagation. Celý proces učení sítě běží tak dlouho dokud počet chyb neklesne pod předem zadaný práh nebo není dosaženo maximálního počtu iterací.



obr. 3.3: feedforward ANN: schéma jednoduché feedforward neuronové sítě

4 DATA A METODY

4.1 Postup práce

letecká + pozemní kampaň

- pořízení leteckých hyperspektrálních obrazových dat
- GPS zaměření kontrolních bodů (kontrola polohové přesnosti pořízených obrazových dat)
- rozmístění kalibračních terčů (ještě před samotným pořízením obrazových dat) pro potřeby atmosférické korekce a kalibrace obrazových dat. Proměření spektrálních vlastností kalibračních terčů pomocí pozemního spektrometru.
- sledování stavu atmosféry v průměru pořizování obrazových dat (zejména obsah vodní páry a aerosolů) pomocí slunečního fotometru.
- odběr vzorků jehlic pro potřeby parametrizace modelů radiativního transferu a validace získaných výsledků.
- měření geometrických vlastností korun stromů a příprava podkladů pro tvorbu maket lesního porostu.

modely radiativního transferu:

- parametrizace modelů radiativního transferu z podkladů získaných během pozemní kampaně (a laboratorního zpracování odebraných vzorků).
- tvorba maket lesního porostu v modelu DART.
- tvorba simulovaných snímků pomocí vytvořených maket

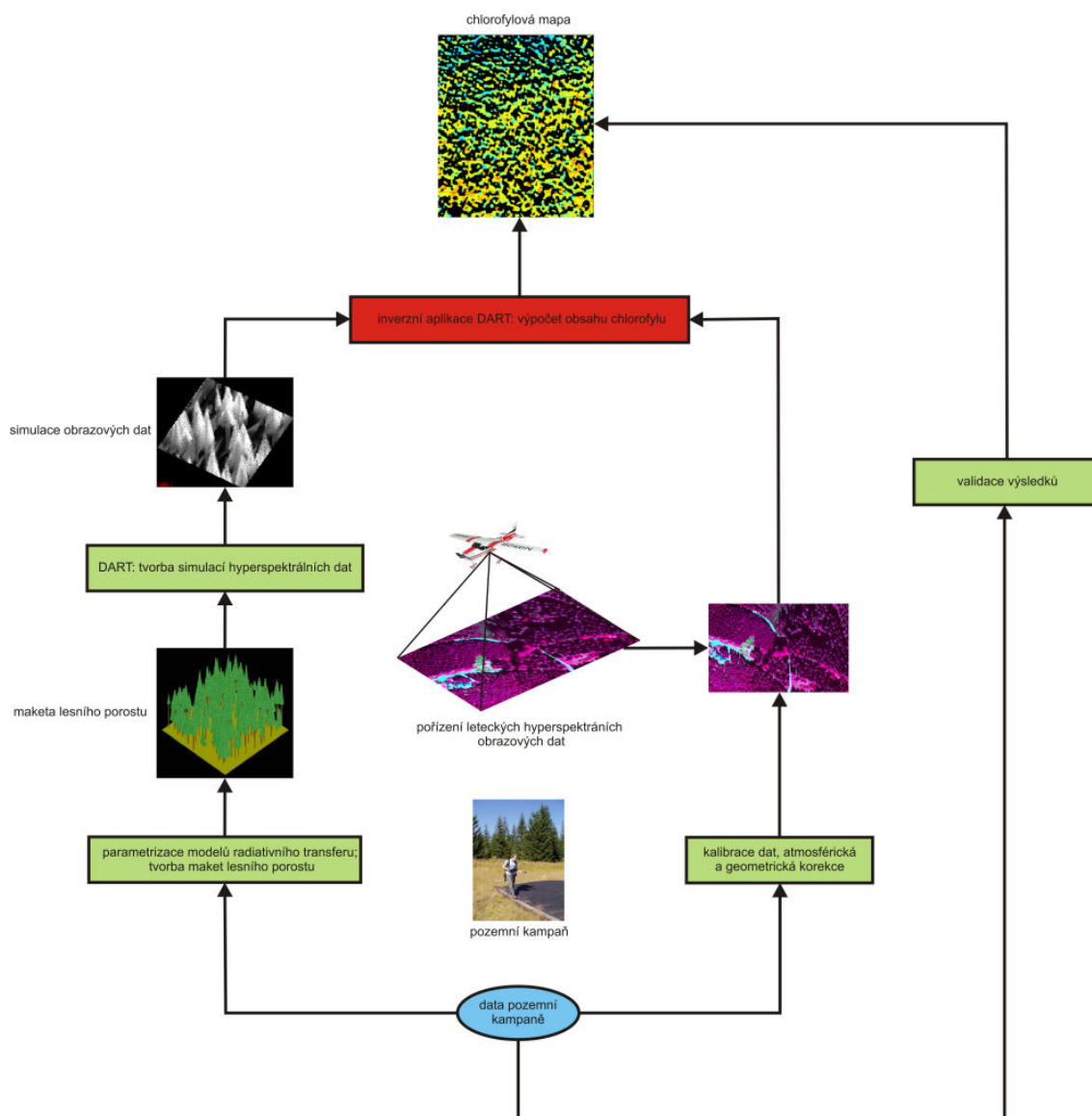
výpočet obsahu chlorofylu:

- inverzní aplikace modelů radiativního transferu - aplikace algoritmu určujícího obsah chlorofylu. Tento výpočet může být realizován buď pomocí umělé neuronové sítě (nelineárně) nebo může být založen na empiricky zjištěném statistické vztahu mezi obsahem chlorofylu a indexem (jehož hodnota má k obsahu chlorofylu funkční vztah).
- trénování neuronové sítě na simulacích vytvořených pomocí maket přímým použitím modelu DART (v případě použití indexu je pomocí těchto simulací hledán výše uvedený vztah mezi hodnotou indexu a obsahem chlorofylu).
- aplikace „natrénovaného“ algoritmu na skutečná obrazová data
- získání mapy obsahu chlorofylu

ověření výsledků:

- porovnání výsledků získaných prostřednictvím inverzního použití modelů radiativního transferu se skutečným obsahem chlorofylu (který byl laboratorně zjištěn z odebraných vzorků)

Celý postup je graficky vyjádřen diagramem na obr. 4.1.

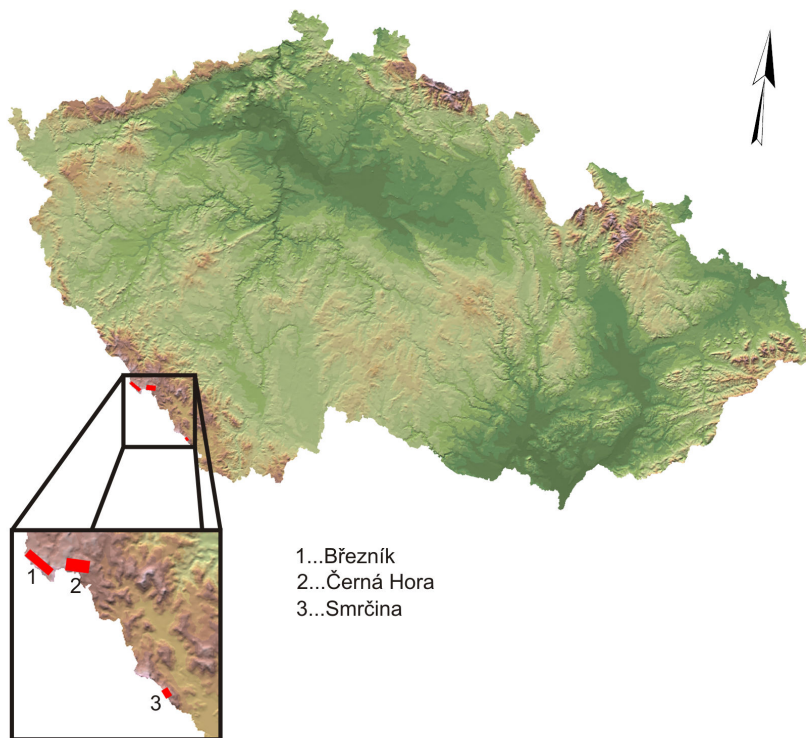


obr. 4.1: tvorba chlorofylové mapy – postup práce

Tvorba chlorofylové mapy na podkladě leteckých hyperspektrálních obrazových dat s využitím modelů radiativního transferu.

4.2 Popis zkoumaných lokalit

Objektem zájmu projektu, jehož součástí je i předkládaná diplomové práce, je trojice horských lokalit národního parku Šumava – Smrčina, Černá hora a Březník (viz obr. 4.2). Přehledové mapky všech lokalit jsou přiloženy v příloze 4.



obr. 4.2: zkoumané lokality

Smrčina:

- **poloha:** 48° 44' 14" s.š.; 13° 55' 19" v.d. (vrchol Smrčina)
- **minimální výška:** 993 m n. m. (výtok potoka Rasovka)
- **maximální výška:** 1338 m n. m. (Smrčina - vrchol)
- **rozloha území:** 1,7 x 2,6 km
- **popis:** Lokalita Smrčina se nachází v jižní části národního parku Šumava v prostoru stejnojmenného vrcholu (cca 6 km jižně od obce Nová Pec). Vrchol Smrčina (1338 m n. m.) je součástí tzv. Trojmezensko-Plešského masivu, který tvoří nejvyšší část hlavního hřebene Šumavy, přičemž je třetím nejvyšším vrcholem české části Šumavy vůbec. Lokalita je pokrytá hustým lesním porostem, ve kterém dominuje smrk ztepilý (*Picea abies* L. Karst), avšak na rozdíl od jiných míst je zde výrazně vyšší zastoupení listnatých stromů jako např. buk lesní (*Fagus sylvatica*) či jeřáb ptačí (*Sorbus aucuparia*). V době pořízení dat byla lokalita zasažena lýkožroutem smrkovým jen málo, díky čemuž je zde možné studovat především ranná stádia zasažení lesního porostu tímto škůdcem. V budoucnosti se však tato lokalita může potenciálně stát jedním z dalších ohnisek šíření lýkožrouta.

Černá hora:

- **poloha:** 48° 58' 44" s.š.; 13° 33' 03" v.d. (vrchol Černá hora)
- **minimální výška:** 1018 m n. m. (ústí potoka Olšinka do Teplé Vltavy)
- **maximální výška:** 1315 m n. m. (Černá hora - vrchol)
- **rozloha území:** 3 x 5,6 km

- **popis:** Lokalita Černá hora se nachází v centrální části národního parku Šumava přibližně 6 km jihovýchodně od obce Kvilda. Území je vymezeno na západě masivem Černé hory, dále zahrnuje oblast pramene Vltavy, hřeben Siebensteinkopf – Stráž – Holý vrch až po Stolovou horu a oblast Bučiny. Rostlinný pokryv lokality tvoří horské smrčiny s převažujícími dospělými stromy (+ 80 let), velmi silně poznamenané činností lýkožrouta smrkového (výskyt velkých ploch mrtvých stromů a holin vzniklých asanací napadených porostů).

Březník:

- **poloha:** 48° 59' 10" s.š.; 13° 25' 52" v.d. (Roklanská hájovna)
- **minimální výška:** 1128 m n. m. (výtok Modravského potoka z území)
- **maximální výška:** 1342 m n. m. (severní úbočí Blatného vrchu)
- **rozloha území:** 2 x 7,7 km
- **poloha:** Lokalita Březník se nachází v centrální části národního parku Šumava asi 6 km jižně od obce Modrava v okolí stejnojmenné hájovny. Území ohraničuje prostor mezi Medvědí horou a Luzenským údolím (zahrnuje oblast Novohuťských močálů, okolí Roklanské hájovny a hraničního hřebene Blatný vrch – Špičník – Hraniční hora). Složení lesního porostu zcela dominoval smrk ztepilý ve formě monokultury. V době pořízení dat se lesní porost v této lokalitě nacházel ve stavu celkového rozkladu, kdy v celém území téměř nebylo možné nalézt kůrovcem nenapadený strom. Díky tomu je zde možné studovat závěrečné stádium napadení horské smrčiny lýkožroutem a iniciální stádia její postupné regenerace.

Vzhledem ke stavu lesního porostu v lokalitě Březník (téměř úplná absence nenapadených stromů, pro něž by bylo možné získat obsah chlorofylu) bylo rozhodnuto, že data z této lokality nebudou v rámci předkládané práce zpracovávána.

4.3 Pořízení leteckých hyperspektrálních obrazových dat

Hyperspektrální obrazová data, na jejichž zpracování je založena tato diplomová práce, byla získána v průběhu dvou leteckých kampaní, které se uskutečnily nad zájmovými plochami NP Šumava. Podle původního plánu byl časový harmonogram jednotlivých kampaní uspořádán tak, aby získaná data zachycovala zkoumané oblasti v závislosti na šíření lýkožrouta smrkového. 1. nálet měl být realizován v první polovině června 2009, kdy měl být zachycen stav před prvním sezónním rojením lýkožrouta. 2. nálet měl být uskutečněn ve vrcholné sezóně kůrovce v první polovině července 2009. Plánován byl rovněž i 3. nálet, při kterém se však již neměla pořizovat hyperspektrální data. Zájmové lokality měly být nasnímkovány digitální leteckou kamerou Vexcel UltraCam X, přičemž tyto snímky měly sloužit ke kontrole stavu smrkových porostů na konci sezóny lýkožrouta smrkového¹. Realizace 3. náletu byla plánována na období 15.9. – 15.10. 2009.

Uskutečnění hyperspektrální kampaně je však silně závislé na počasí. Pro potřeby získání kvantitativních parametrů z pořízených obrazových dat je zapotřebí výborných meteorologických podmínek (jasná obloha bez oblačnosti, stabilní sluneční svit nad všemi lokalitami). Dále je zapotřebí, aby bylo počasí několik dní před vlastním náletem beze srážek (díky absorpci vody by docházelo ke zkreslení hodnot vypočtených kvantitativních ukazatelů). Protože tyto podmínky nebyly splněny, nebylo možné nálety uskutečnit v plánovaných termínech². Z tohoto důvodu byl tedy 1. nálet uskutečněn až 2.8. 2009³, 2. nálet byl pak

¹ srovnáním mělo být zjištěno, které z oslabených stromů byly nakonec kůrovcem skutečně napadeny.

² červen a červenec 2009 se vyznačoval téměř permanentní silnou oblačností a velkými úhrny dešťových srážek.

realizován až 1.9. 2009. Vzhledem k výraznému zpoždění 2. hyperspektrálního náletu bylo rozhodnuto o odložení 3. náletu (z důvodu získání většího časového odstupu mezi jednotlivými řadami snímků). Později již ležel v zájmových lokalitách sníh, a proto nakonec uskutečnění 3. náletu nebylo do konce roku 2009 možné.

1. nálet byl prakticky realizován firmou Argus Geo Systém (ČR, Hradec Králové). Obrazová data byla pořízena pomocí hyperpektrálního senzoru AISA Eagle. 2. nálet byl uskutečněn firmou EnviroSense Hungary (Maďarsko, Debrecen) pomocí senzoru AISA Dual. Technické parametry získaných hyperspektrálních dat jsou uvedeny v tabulce 5.1:

	1. nálet	2. nálet	3. nálet⁴
datum pořízení	2.8. 2009	1.9. 2009	
senzor	AISA Eagle	AISA Dual	Vexcel Ultracam X
počet kanálů	65	359	4
spektrální rozsah	399,50 – 990,24 nm	400,83 – 2450,83 nm	
spektrální vzorkování	9 nm	5 nm (VNIR) 6 nm (SWIR)	
geometrické rozlišení	0,80 m (CH, SM) ⁵ 0,40 m (BR)	0,80 m	0,20 m
pořizovatel	Argus Geo Systém	EnviroSense Hungary	Argus Geo Systém

4.4 Pozemní podpůrná kampaň

Souběžně s oběma nálety byla provedena i pozemní kampaň zaměřená na získání dat pro reprezentativní parametrizaci modelu radiativního transferu DART, atmosférickou korekci obrazových dat, zhodnocení geometrické přesnosti dat a ke kontrole výsledných produktů. Vlastní pozemní kampaň se skládala z následujících částí:

Terénní práce⁶:

- a) **kalibrace obrazových dat:** Rozmístění kalibračních terčů v terénu (lokalita Březník) a zjištění jejich odrazivosti pomocí pozemního spektrometru ASD FieldSpec-3. Jako kalibrační plochy byly zvoleny povrchy, jejichž charakteristika se blíží lambertiánskému povrchu (tj. povrchu, který má ve všech směrech stejnou odrazivost). Použity byly jednak umělé kalibrační plochy (kalibrační panely NEXTEL, PVC, textilie aj.) a jednak i povrchy přirozené (např. asfaltové plochy apod.). Měření spektrometrem FieldSpec bylo na každé kalibrační ploše provedeno opakovaně (cca 10x). Série měření odrazivosti všech kalibračních ploch byla po určitém časovém odstupu opakována. V průběhu 1. náletu (2.8. 2009) bylo celkem proměřeno 13 referenčních ploch, v průběhu 2. náletu (1.9. 2009) bylo proměřeno 12 referenčních ploch. Měření bylo provedeno týmem Ústavu systémové biologie a ekologie AV ČR v.v.i. za osobní účasti autora práce.

³ ani v tento termín však nebyly povětrnostní podmínky ideální – díky tomu jsou data postižena vlivem oblačnosti a obecně nehomogennou atmosférických podmínek v jednotlivých lokalitách.

⁴ do odevzdání práce nerealizován

⁵ BR...Březník, CH...Černá Hora, SM...Smrčina

⁶ V případě 1. náletu bylo provedeno pouze měření odrazivosti kalibračních ploch pomocí spektrometru FieldSpec a odběry vzorků jehlic.

- b) **určení polohy kontrolních bodů:** Pomocí DGPS stanice Topcon GB-500 byla určena poloha bodů, které byly později použity ke kontrole geometrické přesnosti obrazových dat. Jako kontrolní body byly vybírány jasně identifikovatelné přirozené objekty, a dále pak i objekty umělé (roky kalibračních panelů apod.). Měření bylo provedeno týmem Ústavu systémové biologie a ekologie AV ČR v.v.i.
- c) **určování okamžitého stavu atmosféry:** Pomocí přístroje SunPhotometer Microtops II byl v intervalu 5 minut zjišťován obsah aerosolů a vodní páry v atmosféře. Tato data jsou využita pro potřeby atmosférické korekce obrazových dat. Měření bylo provedeno týmem Ústavu systémové biologie a ekologie AV ČR v.v.i. za osobní účasti autora práce.
- d) **odběr vzorků jehlic:** Z 16 vybraných stromů v lokalitě Černá hora byly odebírány vzorky jehlic pro potřeby měření optických vlastností a k laboratornímu zjištění obsahu chlorofylu pro potřeby validace získaných výsledků. Poloha vzorníkových stromů (a stromů v nejbližším okolí) byla zaměřena pomocí GPS a lesnického mapovacího systému FieldMap. Měření bylo provedeno týmem Ústavu systémové biologie a ekologie v.v.i.
- e) **měření indexu listové plochy (LAI):** Pro potřeby parametrizace modelu radiativního transferu DART a pro validaci produktu LAI z dat AISA Dual byl na vybraných stromech v lokalitě Černá hora určován index listové plochy (LAI). Měření bylo realizováno pomocí přístrojů PCA LAI-2000 (Li-Cor, USA) a hemisférických fotografií pořízených DSLR Canon EOS 450D s objektivem Sigma Circular Fisheye 4,5 mm. Poloha zkoumaných stromů byla určena pomocí GPS a systému FieldMap. Měření bylo provedeno týmem Ústavu systémové biologie a ekologie AV ČR v.v.i.

Laboratorní práce:

- a) **určování biofyzikálních a biochemických parametrů odebraných jehlic smrku ztepilého (ÚSBE/KEBR PŘF UK):** Určování obsahu chlorofylů a, b ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$), množství sušiny (mg/cm^2) a vody (cm) v odebraných vzorcích jehlic. Zjištěné hodnoty byly použity při závěrečném hodnocení výsledků. Laboratorní práce byly provedeny Ústavem systémové biologie a ekologie AV ČR v.v.i. a katedrou experimentální biologie rostlin PŘF UK.
- b) **určování optických vlastností jehlic:** pomocí integrační sféry a spektrometru FieldSpec byly měřeny optické vlastnosti jehlic pro vzorníkové stromy podle odběrového schématu. Měření bylo provedeno Ústavem systémové biologie a ekologie AV ČR v.v.i.

4.5 Atmosférické korekce obrazových dat

Obrazová data pořízená AISA Eagle/AISA Dual byla nejprve radiometricky kalibrována z DN (digital number) hodnot pixelu na fyzikální hodnoty radiance registrované senzorem.

$$\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}}$$

Hodnoty radiance však k dalším analýzám nelze použít, protože jsou zkresleny vlivem zemské atmosféry. Zemská atmosféra (Rayleighův rozptyl atmosférických plynů a Mieův rozptyl aerosolových částic) způsobuje rozptyl a absorpci záření. Oba jevy mají navíc tu vlastnost, že se pro různé vlnové délky záření uplatňují různě intenzivně. Další skutečností, kterou je nutné brát v potaz a kterou získané hodnoty radiance nezohledňují, je to, že na zemský povrch

nedopadají všechny vlnové délky záření se stejnou intenzitou⁷. Navíc ani nevíme, jak velký díl tvoří pozorovaná radiance vůči množství dopadajícího záření (irradiance). Cílem radiometrické korekce je tedy konverze spektrální radiance na hodnoty reflektance (odrazivosti), která vlastně vyjadřuje podíl odraženého záření (které my pozorujeme jako radianci) na záření dopadajícím.

Atmosférické korekce mohou být provedeny např.

- a) **inverzí simulací atmosférického modelu:** korekce je založena na využití teoretického modelu přenosu záření v zemské atmosféře. Některé parametry atmosféry (např. optická tloušťka aerosolů – AOT, viditelnost, obsah vodní páry apod.) nutné pro reprezentativní parametrizaci modelu mohou být měřeny v průběhu pozemní podpůrné kampaně. Příkladem atmosférického modelu radiativního transferu je model MODTRAN, jehož inverzi využívá např. software pro atmosférické korekce leteckých hyperspektrálních dat ATCOR-4.
- b) **metodou empirical line:** empiricky odvozený vztah mezi radiancí a reflektancí pro známé objekty na snímku je aplikován pixel po pixelu na zbývající obrazová data. Odrazivost těchto referenčních ploch je zaměřována pomocí pozemního spektrometru (např. ASD FieldSpec 3).
- c) **FODIS:** FODIS (Fiber Optic Downwelling Irradiance Sensor) je senzor zaznamenávající množství záření přicházejícího z horní hemisféry v průběhu snímování. Pro každou linii obrazu, pořízeného senzorem AISA, tak máme k dispozici hodnoty irradiance ve všech snímaných vlnových délkách. Díky znalosti irradiance na úrovni letadla (tzn. po průchod atmosférou) je pak možné transformovat hodnoty radiance na reflektanci.

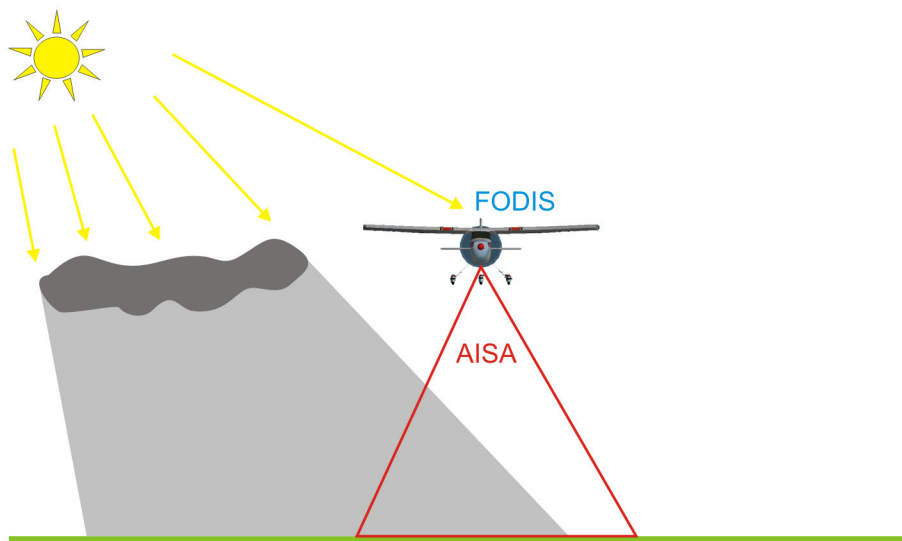
Při zpracování této práce bylo zamýšleno využít buď metodu empirical line, nebo využít data ze senzoru FODIS. Pro aplikaci metody empirical line je nezbytně nutné, aby byly atmosférické podmínky v celém snímaném území konstantní, neboť empirický vztah radiance a reflektance zjišťujeme bodově. Tato podmínka je splněna v případě dat z 1.9. 2009, ale naopak není splněna v případě dat z 2.8. 2009, kdy se atmosférické podmínky v různých částech snímaného území velmi podstatně liší, a to zejména díky vlivu oblačnosti. Poměr radiance/reflektance zjištěný bodově na kalibračním terči přímo ozářeným sluncem již nebude platit pro místa zastíněná (např. ve stínu oblačnosti). Navíc oblačnost, skrze kterou muselo záření procházet, byla v každé oblasti jiná – v případě lokality Smrčina se jednalo o poměrně dobře ohraničené oblaky druhu cumulus, zatímco v případě Černé Hory šlo o vysokou oblačnost druhu cirrus a cirrostratus. Z tohoto důvodu bylo nakonec rozhodnuto použít data ze senzoru FODIS, který určuje poměr dopadajícího a naměřeného odraženého záření pro každou náletovou linii zvlášť, podle aktuálních podmínek, které v daném místě panovaly. Nevýhodou je naopak to, že použitím senzoru FODIS není korigován vliv vrstvy atmosféry mezi letadlem a zemským povrchem. Vzhledem k nízké výšce letu je ovšem vliv atmosféry na snímaný signál v tomto případě minimální. Vlastní transformace obrazových dat je pak provedena pomocí vztahu:

$$REF = \frac{RAD}{IRR}$$

kde: REF...reflektance, RAD...radiance (z obrazových dat AISA), IRR...irradiance (snímaná senzorem FODIS)

⁷ to je částečně způsobeno vlivem atmosféry, kdy je záření některých vlnových délek pohlcováno a rozptylováno více než záření jiné vlnové délky, a dále pak tím, že ani Slunce (jako zdroj sledovaného záření) nevyzařuje všechny vlnové délky stejně intenzivně (což vychází z Planckova zákona).

Po provedení atmosférické korekce bylo teoreticky očekáváno, že aplikací dat ze senzoru FODIS bude do značné míry eliminován vržený stínů oblačnosti. Tento předpoklad vycházel z toho, že v místech, která jsou zakryta stíny oblačnosti, je v obrazových datech naměřena nízká hodnota radiance, avšak zároveň je senzorem FODIS naměřena v daném místě i nízká hodnota irradiance. Poměr RAD/IRR by tedy měl být stejný jako v místech přímo osvětlených sluncem. Ve skutečnosti k tomuto nedošlo. Vysvětlení je možné hledat asi v tom, že oblačnost hází své stíny na povrch šikmo – může se tedy stát, že letadlo přelétá oblast, která je na povrchu ve stínu mraku, ale na senzor FODIS v tomto místě dopadá záření přímo (viz obr. 4.3). Proto mohou v těchto místech vycházet nerádné hodnoty reflektance. Pro výsledky práce však výše popsany jev nemá význam, jelikož v případě dat z 2.8. 2009 jsou k analýze vybrána pouze ta místa, jenž jsou sluncem osvětlena přímo.



obr.4.3: Vliv oblačnosti na data ze senzoru FODIS

V případě výskytu oblačnosti se může stát, že senzor AISA snímá území, jenž je zakryto stínem oblaků, avšak na senzor FODIS v té době dopadá sluneční záření přímo. Díky tomu pak při výpočtu poměru AISA/FODIS vycházejí v některých případech nesmyslné hodnoty.

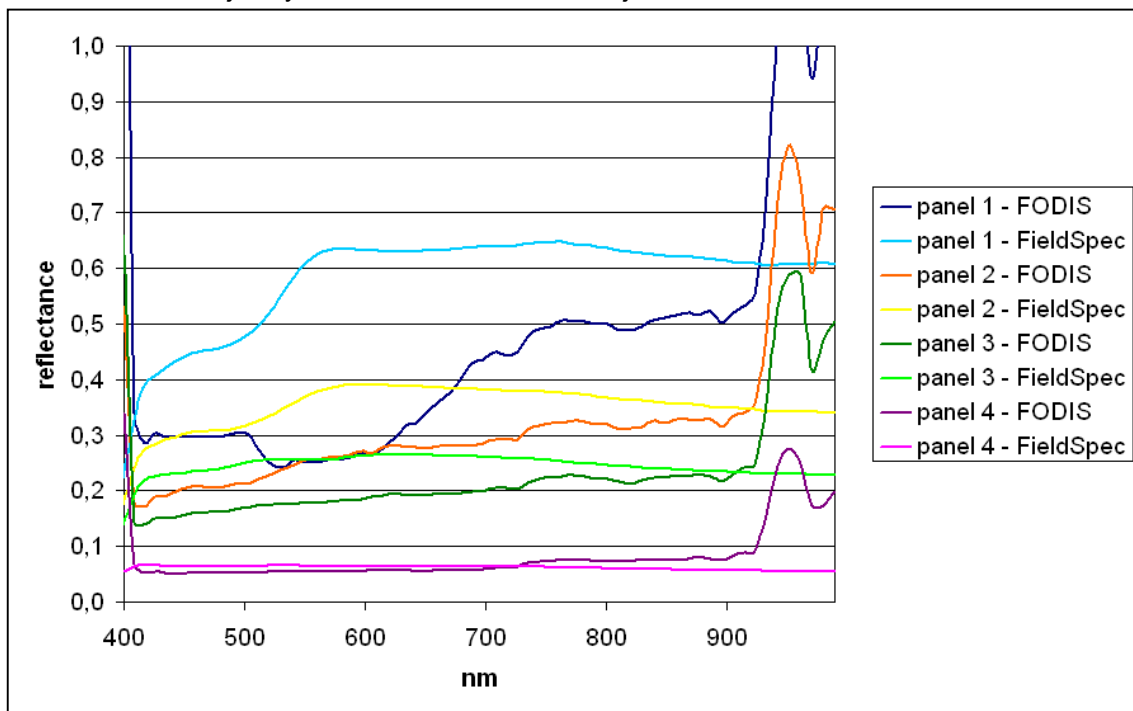
Na závěr byla vyhodnocena přesnost provedených atmosférických korekcí. K tomu byla využita data získaná v průběhu podpůrných pozemních kampaní, realizovaných souběžně s pořízením leteckých obrazových dat. V tomto případě šlo o měření reflektance vybraných objektů pomocí pozemního spektrometru ASD FieldSpec – 3. Tímto přístrojem byla zjišťována reflektance kalibračních terčů v rozsahu vlnových délek 350 – 2500 nm. Měření probíhalo na čtyřech kalibračních terčích natřených barvou NEXTEL. Vlastností těchto barev je že, v intervalu vlnových délek cca 500 – 900 nm mají téměř konstantní všesměrnou odrazivost (v tomto případě šlo o nátěry s nominální odrazivostí 8 %, 25 %, 40 % a 60 %). Z dat naměřených pomocí pozemního spektrometru FieldSpec byl nejprve vybrán interval vlnových délek 400 – 990 nm, a tato data pak byla přímo srovnána s odrazivostí získanou z obrazových dat po atmosférické korekci. Pro potlačení vlivu náhodných chyb během měření, byla odrazivost kalibračních terčů v terénu měřena opakovaně (v případě náletu z 2.8. vždy 4x, v případě náletu z 1.9. 11x). Z těchto měření byl pak vždy pro každý terč spočítán aritmetický průměr, který byl následně porovnáván s odrazivostí získanou z atmosféricky korigovaných obrazových dat. Odrazivost kalibračních terčů zjištěná z obrazových dat byla v případě dat z 2.8. vypočtena jako aritmetický průměr odrazivosti 4 pixelů v centrální části obrazu kalibračního terče. V případě dat z 1.9. již toto vzhledem k nižšímu geometrickému rozlišení

obrazových dat⁸ nebylo možné, a tak byla použita odrazivost zjištěná z centrálního pixelu obrazu kalibračního terče.

Porovnáním spektrálních odrazivostí získaných z atmosféricky korigovaných obrazových dat s daty získanými pomocí pozemního spektrometru FieldSpec bylo zjištěno, že nejlepší shody je dosaženo v případě kalibračního terče s nejnižší (8%) odrazivostí, kde se průměrná odchylka od referenčního spektra (FieldSpec) pohybuje kolem 3 %. U kalibračních terčů s vyšší odrazivostí již rozdíl od referenčního spektra roste, přičemž je vždy vyšší v případě dat z 1. náletu. U terčů s nejvyšší (60%) odrazivostí je odchylka od referenčního spektra již dosti značná u dat ze 2. náletu dosahuje přes 20 %, v případě dat z 1. náletu dokonce přes 25 %. Hodnoty průměrných odchylek od referenčního spektra jsou uvedeny v tabulce 4.2.

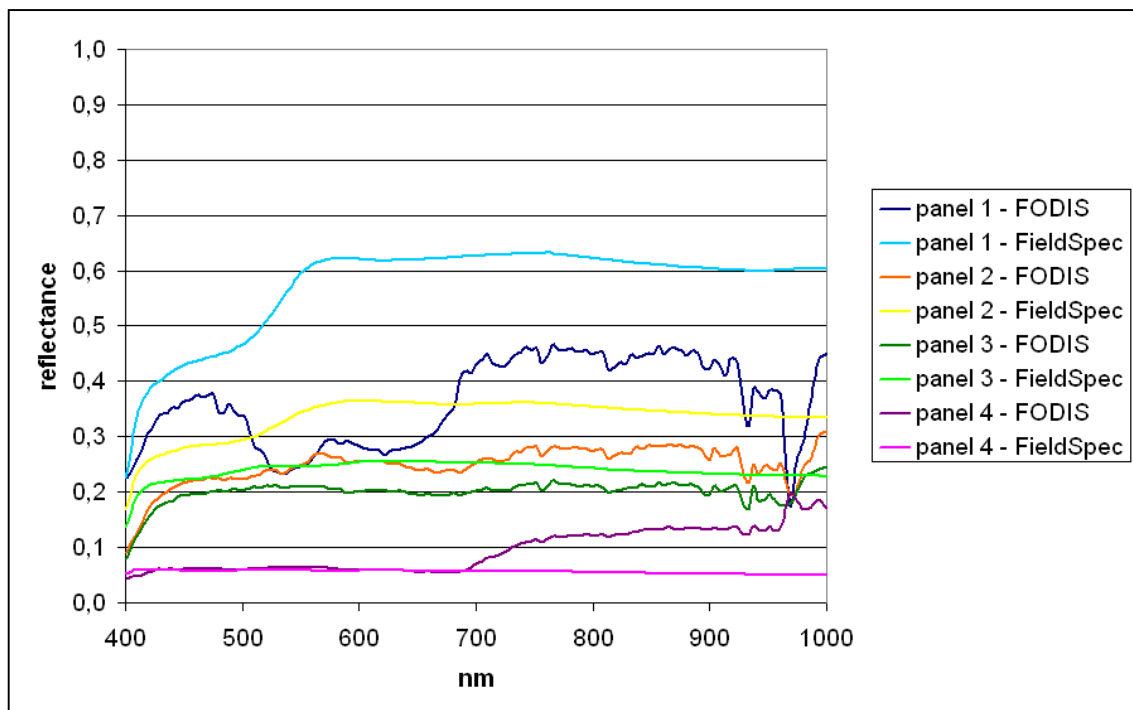
Tabulka 4.2: průměrná odchylka spektra FODIS od referenčního spektra FieldSpec		
terč	AISA Eagle (2.8. 2009)	AISA Dual (1.9. 2009)
Nextel black (8 %)	3,15 %	3,73 %
Nextel gray (25 %)	8,34 %	3,92 %
Nextel pearl (40 %)	11,33 %	8,65 %
Nextel cream (60 %)	25,26 %	20,78 %

Kompletní protokoly týkající se hodnocení kvality atmosférické korekce jsou přiloženy v příloze 5. Důležité je zejména to, že v případě terčů s odrazivostí 8, 25 a 40 % se jedná o systematický posun hodnot, avšak tvar reflektanční křivky spektra získaného z obrazových dat odpovídá velmi dobře tvaru referenční reflektanční křivky (viz. obr. 4.4 a 4.5). V případě terče s 60% odrazivostí však dochází i k významným rozdílům v tvaru reflektanční křivky. Přes zjištěné odchylky je však možné výsledky atmosférické korekce považovat za přijatelné, zejména proto, že v případě výpočtu obsahu chlorofylu nepracujeme s povrchy o vysoké reflektanci, u nichž je chyba atmosférické korekce největší.



obr. 4.4: Reflektanční křivky kalibračních terčů z dat AISA Eagle (2.8. 2009)

⁸ území, na němž byly rozmístěny kalibrační terče, bylo v případě 1. náletu snímáno s rozlišením 0,4 m a v případě 2. náletu s rozlišením 0,8 m.



obr 4.5: Reflektanční křivky kalibračních terčů z dat AISA Dual (1.9. 2009)

4.6 Geometrická korekce obrazových dat

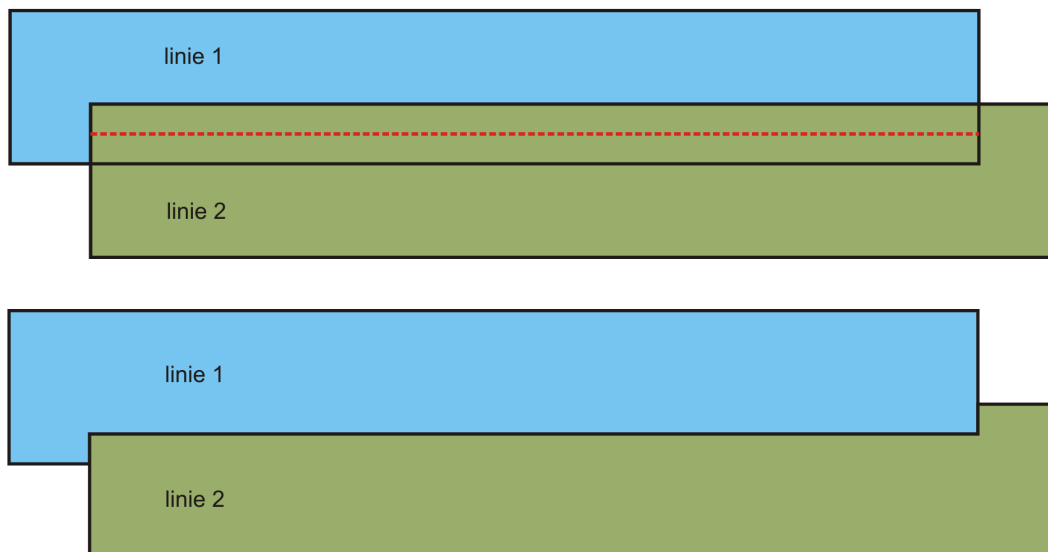
Geometrické korekce (tj. georeference a ortogonalizace) použitých hyperspektrálních obrazových dat byly provedeny pomocí souborů vnitřní geometrie (GLT). Soubory GLT obsahují informaci o poloze každého pixelu obrazu v daném geografickém souřadném systému. V případě této práce byl používán souřadný systém WGS-84 a kartografické zobrazení UTM 33N.

Soubory vnitřní geometrie jsou vytvářeny pomocí software PARGE na základě dat z inerciální navigační jednotky GPS/INS (která je součástí letadla nesoucího použitý spektrometr). Jedná se především o data popisující aktuální polohu letadla vzhledem ke zvolenému souřadnicovému systému, a dále pak o jeho orientaci v prostoru, kdy je sledována je trojice úhlů popisující bočení (yaw), klonění (pitch) a rotaci (roll). K odstranění vlivu nerovnosti terénu byl použit digitální model terénu vygenerovaný na podkladu vrstevnicového modelu terénu ZABAGED. Soubory vnitřní geometrie byly dodány poskytovatelem a pořizovatelem leteckých obrazových dat (tj. Argus Geo Systém a Envirosense Hungary)

Jednotlivé letové linie každého zájmového území byly spojeny v jedinou mozaiku. Mozaikování bylo provedeno v software ENVI 4.6. Mezi sousedícími liniemi byly (většinou) určité překryvy. Proto byly linie před mozaikováním nejprve ořezány tak, aby napojení vedlo přesně středem jejich vzájemného překryvu (viz. obr 4.6).

Na závěr byla provedena kontrola geometrické přesnosti použitých dat. Ke kontrole byla použita sada kontrolních bodů, které byly v terénu zaměřeny pomocí GNSS navigační jednotky Topcon (Topcon GB-500 – base, Topcon HiPER+ – rover). Souřadnice těchto kontrolních bodů (z GPS měření) byly porovnávány se souřadnicemi odečtenými přímo z obrazových dat. V případě dat z 2.8. 2009 bylo použito 47 kontrolních bodů. Výsledná střední kvadratická chyba (RMSE) v ose Y činila 0,645 m (0,806 pix), v ose X pak 0,373 m (0,466 pix). V případě dat z 1.9. 2009 bylo použito 28 kontrolních bodů. Výsledná střední kvadratická chyba ve směru osy Y činila 1,038 m (1,298 pix), ve směru osy X pak 1,192 m (1,490 pix).

Protokoly o kontrole geometrické přesnosti dat jsou uvedeny v příloze 6.



obr. 4.6: Mozaikování dílčích linií obrazových dat
Před mozaikování byly jednotlivé linie ořezány tak, aby napojení vedlo vždy středem jejich vzájemném překryvu.

4.7. Klasifikace obrazových dat a tvorba masek korun smrkových porostů

Prvním krokem v procesu zpracování korigované hyperspektrálních obrazových dat byla klasifikace pořízených snímků. Cílem této klasifikace byla tvorba binární obrazové masky osvětlených korun smrkového porostu pro každou zkoumanou lokalitu. Smrkové porosty byly v této klasifikaci nadále rozděleny do dvou tříd, přičemž první z nich byly dospělé smrky (starší 40-ti let), druhou pak smrky mladé (mladší 40-ti let). Hranice 40 let je zde vybrána z důvodu návaznosti na šíření lýkožrouta smrkového, který napadá právě smrky starší než cca 40-60 let [<http://forrestprot.info>].

V úvodu prací byly na vybraných liniích testovány možnosti různých metod řízení klasifikace. Porovnávány byly zejména klasifikace metodou maximum likelihood s klasifikací pomocí neuronové sítě (integrované v software ENVI 4.6). Z daného pozorování pak vyplynulo, že nejlepších výsledků je dosahováno právě při použití klasifikace pomocí metody neuronových sítí. Lepších výsledků oproti metodě maximum likelihood bylo dosahováno zejména ve schopnosti správně vylíšit tvar korun.

Další otázkou, kterou bylo nutné vyřešit, bylo, zda klasifikovat scénu najednou (tj. klasifikovat mozaiku vytvořenou spojením dílčích letových linií), či zda provést klasifikaci po částech (po jednotlivých liniích). Jako první bylo přistoupeno ke klasifikaci dat AISA Eagle z 2.8. 2009, která jsou v porovnání s daty AISA Dual z 1.9. 2009 výrazně méně kvalitní (zejména kvůli špatným meteorologickým podmínkám v době pořízení dat, z čehož vyplývají rozdíly v hodnotách radiance mezi jednotlivými liniemi). Po prvním pokusu klasifikovat celou mozaiku najednou byly získány zcela nevyhovující výsledky. Problémem byl zejména odlišný vliv oblačnosti na jednotlivé linie (některé linie nebyly oblačností postiženy téměř vůbec, jiné naopak velmi silně a u některých byla postižena jen jejich část). Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že v případě dat AISA Eagle bude klasifikace provedena po částech, což bylo časově výrazně náročnější (pro každou linii bylo nutné definovat trénovací množiny; klasifikační algoritmus musel být aplikován zvlášť pro každou linii a nikoliv jednou pro celou mozaiku). Základním předpokladem bylo, že hodnoty jednotlivých pixelů jsou v rámci jedné linie ovlivněny stejně, tj. např. hodnoty pixelů korun starých smrků jsou v rámci jedné linie přibližně stejné. Naopak hodnoty pixelů korun starých smrků jedné linie, které je oblačností a stíny postiženy silně, se

budou poměrně výrazně lišit od pixelů korun starých smrků linie, jenž není postižena prakticky vůbec. Tento přístup se nakonec ukázal jako výhodnější.

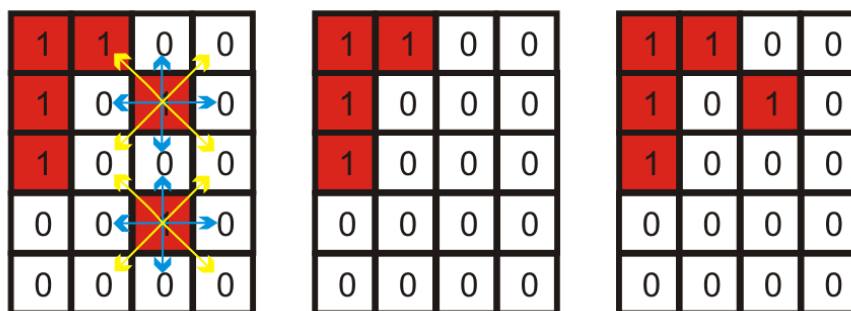
V případě dat AISA Dual z 1.9. 2009 bylo naopak zjištěno, že je možné provést klasifikaci najednou (tj. klasifikovat celou mozaiku). Data byla totiž pořízena za příznivých atmosférických podmínek, kdy bylo osvětlení celé scény konstantní a rovnoměrné. Výsledky klasifikace na těchto datech byly lepší v porovnání s výsledky klasifikace snímků AISA Eagle.

Z počátečních pokusů bylo zjištěno, že lepších výsledků je získáno tehdy, pokud do klasifikace nejsou zahrnuty okrajové kanály spektrometru, které trpí vysokým šumem. Proto byly z klasifikace vyloučeny kanály modré části viditelného záření – tj. u dat AISA Eagle kanály 1 (399,5 nm) – 12 (496,68 nm), u dat AISA Dual pak kanály 1 (400,83 nm) – 23 (497,77 nm). Klasifikace byla tedy na datech AISA Eagle provedena pouze na spektrálních kanálech 13 (505,64) – 65 (990,24 nm); u dat AISA Dual byly použity spektrální kanály 24 (502,24 nm) – 130 (1012,32 nm). V případě dat AISA Dual byly z klasifikace rovněž vyloučeny kanály delších vlnových délek (1018,6 – 2450,82 nm).

Jak již bylo zmíněno výše, byla ke klasifikaci využita metoda umělých neuronových neuronová sítí, která software ENVI 4.6. Tato neuronová síť je založena na architektuře feedforward-backpropagation (informace se neurony šíří pouze vpřed, získaná chyba na výstupu je pak zpětně použita k upravení synaptických vah pro další iteraci trénování sítě). Použitá síť obsahovala jednu vstupní vrstvu, jednu skrytou vrstvu neuronů a jednu výstupní vrstvu. Síť byla nastavena tak, že proces učení probíhá tak dlouho, dokud výstupní chyba klasifikace na výstupu neklesne pod 0,1, maximálně je však provedeno 1000 iterací. K situaci, kdy chyba na výstupu sítě klesne pod zmíněný práh, však v praxi nikdy nedošlo – tj. vždy byl vyčerpán maximální povolený počet iterací učení. Výstupní chyba se v tomto případě pohybovala mezi 0,13 – 0,30, ve valné většině případů pak mezi 0,20-0,25. Pro srovnání – výstupní chyba v případě, kdy byla data AISA Eagle klasifikována najednou jako celá mozaika, dosahovala hodnot 0,40 – 0,70.

V průběhu klasifikace bylo zjištěno, že je nutný určitý minimální počet pixelů trénovacích množin. V případě neuronové sítě ENVI platí pravidlo, že každá třída musí obsahovat trénovací množiny o celkovém počtu minimálně $2n+1$ pixelů (kde n je počet spektrálních kanálů použitých při klasifikaci). V praxi byly pro „důležité třídy“ – tj. zejména pro dospělé smrky – tvořeny trénovací množiny o rozsahu cca $6n$, pro ostatní třídy pak cca $3n$. Legenda provedené klasifikace je uvedena v příloze 7.

Po provedení klasifikace bylo zjištěno, že se v některých případech ve výsledcích nachází určité množství chyb. V případě starých smrků docházelo zejména k záměně za různé druhy podkladů (především v případě, kdy na zemi leželo spadané suché dřevo). V případě mladých smrků byl největší problém se záměnou za listnaté stromy (resp. některé listnaté stromy byly klasifikovány jako mladé smrky). Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že klasifikace bude provedena dvoukolově. Pomocí prahování byla z výsledků prvního kola klasifikace nejprve

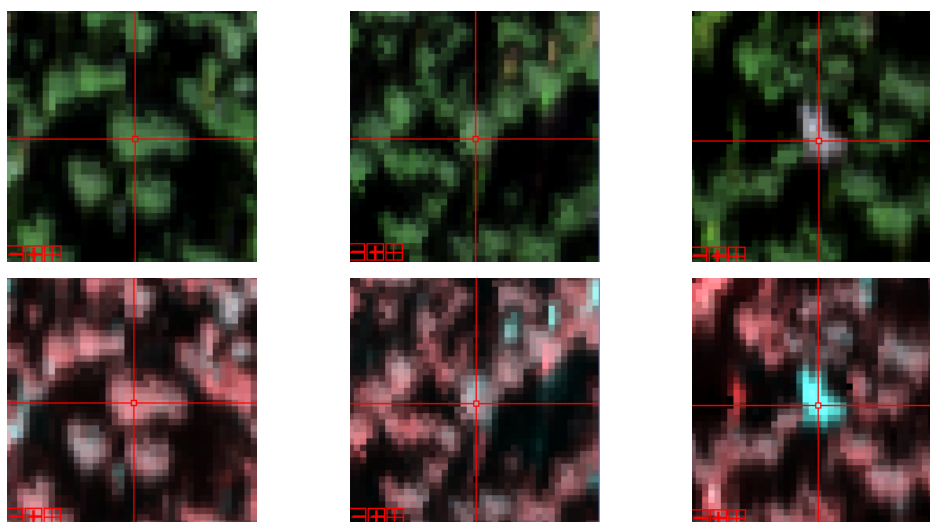


obr. 4.7: Sítový filtr

Ukázka aplikace sítového filtru (sieve filter). Originální data (vlevo), výsledek aplikace sítového filtru v případě sledování hodnot sousedních pixelů ve 4 směrech (uprostřed), výsledek aplikace sítového filtru v případě sledování hodnot sousedních pixelů v 8 směrech.

vybrána místa klasifikovaná jako dospělé smrky. Poté byly vytvořeny nové trénovací množiny – tentokrát jen pro třídy dospělé smrky, mladé smrky, listnaté stromy a podklad. Druhé kolo klasifikace pak proběhlo jen v místech, která byla v prvním kole klasifikována jako dospělé smrky (v software ENVI je možné nastavit masku, které vymezuje místa, kde má být klasifikace provedena). Pomocí prahování pak byly opět vybrány oblasti, které i ve druhém kole klasifikace byly klasifikovány jako smrkové koruny (tj. byl vytvořen binární rastr, který nabýval hodnot 1 pouze v místech, která i ve 2. kole klasifikace byla klasifikována jako koruny dospělých smrků). Shodný postup pak byl použit i pro klasifikaci mladých smrků.

Pro odstranění osamocených pixelů (resp. malých skupin pixelů), byl výsledek druhého kola klasifikace následně vyčištěn tzv. síťovým filtrem (opět v software ENVI). Síťový filtr sleduje, zda daný pixel (skupina pixelů) sousedí s jiným pixelem (skupinou pixelů) stejné třídy, či zda se jedná o pixel (skupinu pixelů), který je zcela obklopen pixely jiných tříd. Zadávány jsou dva parametry. Prvním z nich je maximální velikost skupiny, která z obrazu ještě bude vyloučena. V našem případě byl tento limit nastaven na 4 pixely (tj. skupiny 4 a méně pixelů s hodnotou 1, které jsou zcela obklopeny hodnotami 0, budou odstraněny). Druhým parametrem je počet směrů, v nichž budou hodnoty sousedních pixelů sledovány - například pro jeden pixel je možné sledovat hodnoty sousedních pixelů buď ve 4, nebo v 8 směrech (viz obr. 4.7). V našem případě byl počet sledovaných směrů nastaven na 8. Výhodou síťového filtru je především to, že dokáže z výsledků klasifikace odstranit osamocené pixely a malé skupiny pixelů, avšak zároveň větší skupiny pixelů (nad zadaný limit) vůbec nijak nepostihne (na rozdíl např. od modusového filtru).



obr. 4.8: Příklad vzhledu stromů v různém stádiu napadení kůrovcem:
zdravý strom (vlevo), napadený strom (uprostřed), mrtvý strom (vpravo)

V případě dospělých smrků bylo posléze provedeno ještě další kolo klasifikace, tentokrát podle zdravotního stavu stromů. Šlo zde především o to odlišit od sebe stromy zdravé (či pouze v raném stádiu napadení kůrovcem) od stromů umírajících (v pokročilém stádiu napadení kůrovcem)⁹. Klasifikace byla provedena pod logickou maskou smrkových korun, vytvořenou v předchozím kroku, metodou maximum likelihood. Příklad vzhledu stromů v různém stádiu napadení kůrovcem viz obr. 4.8. Z výsledků klasifikace byla vytvořena logická maska korun dospělých a mladých smrků.

Na závěr pak bylo provedeno zhodnocení přesnosti dosažených výsledků. Sledována byla uživatelská spolehlivost vytvořené klasifikace - tj. jak velká část pixelů klasifikovaných jako koruny smrků jsou skutečně smrkovými korunami. Z pixelů, které byly klasifikovány jako koruny dospělých (resp. mladých) smrků bylo náhodně vybráno 200 bodů, u nichž bylo porovnáním

⁹ zcela suché stromy byly vyloučeny jako samostatná třída již v prvním kole klasifikace.

s originálními daty sledováno, zda se skutečně jedná o koruny stromů či nikoliv. Výsledky tohoto hodnocení jsou uvedeny v tabulce 4.3:

Tabulka 4.3: Hodnocení přesnosti klasifikace			
dospělé smrky		mladé smrky:	
snímek	uživatelská přesnost	snímek	uživatelská přesnost
CH-2009-08-02	92,632 %	CH-2009-08-02	92,965 %
SM-2009-08-02	93,813 %	SM-2009-08-02	88,889 %
CH-2009-09-01	92,500 %	CH-2009-09-01	89,000 %
SM-2009-09-01	93,467 %	SM-2009-09-01	86,000 %

Vytvořené masky smrkových korun byly dále rozděleny podle orientace svahů a sklonu svahu v daném místě. Smyslem této operace je zohlednění vlivu morfologie terénu (jde zejména o postavení terénu vůči slunci) na pozorované hodnoty reflexe při vlastním výpočtu obsahu chlorofylu. Z hlediska orientace svahů byly vymezeny: severní orientace (azimut 316° – 45°), východní + západní orientace¹⁰ (azimut 46° – 135°; 226° – 315°) a jižní orientace (azimut 136° – 225°). Z hlediska sklonu pak bylo území rozděleno na oblasti se sklonem 0 – 15°, a dále pak oblasti se sklonem vyšším než 15°.

4.8 Úprava a klasifikace maket DART

Princip modelování v modelu radiativního transferu DART spočívá v tom, že nejprve jsou vytvořeny tzv. makety lesního porostu. Maketa lesního porostu je virtuální trojrozměrný model lesního porostu parametrizovaný na základě pozemních měření optických a strukturálních vlastností několika reprezentativních stromů. Model je pak iterativně spuštěn pro sadu volných vstupních parametrů, přičemž jsou simulovány všechny jejich možné kombinace. V našem případě byly těmito volnými vstupními parametry:

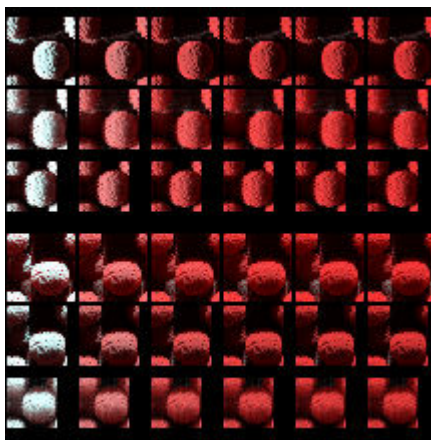
- orientace svahu a jí odpovídající směr nasvícení sluncem
- obsah chlorofylu v listoví (na základě modelu PROSPECT)
- index listové plochy (LAI)
- korunový zápoj (CC)

Celkem model rozlišoval 3 orientace svahu (severní, jižní západní + východní), 6 hodnot obsahu chlorofylu v listoví ($C_{ab} = 10, 25, 40, 55, 70$ a $85 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), 6 hodnot indexu listové plochy ($\text{LAI} = 3, 5, 7, 9, 11$ a 13) a 3 třídy korunového zápoje ($\text{CC} = 60 \%, 75 \%$ a 90%). Výsledkem simulace pak byla sada obrazových dat TOC reflektancí parametrizovaného a modelovaného porostu (makety) v daných spektrálních pásmech. V tomto případě nebyl simulován plný rozsah vlnových délek dat AISA ale pouze kanály citlivé na změny obsahu chlorofylu. Simulovány byly tedy vlnové délky 652, 662, 671, 680, 689, 699, 708, 717 a 726 nm, a to odděleně pro staré a pro mladé stromy.

Z výstupu simulace obrazových dat bylo nejprve nutné vylížit pouze pixely odpovídající osvětleným korunám stromů. K tomuto účelu byla použita klasifikace pomocí neuronové sítě software ENVI, pomocí níž byla získána logická maska osvětlených korun, která pak byla na původní data aplikována. Z těchto vymaskovaných hodnot pak byly vytvořeny tzv. LUT tabulky obsahující vzájemné vztahy jednotlivých parametrů. Ukázka výsledných simulací je uvedena na obrázku 4.9.

¹⁰ západní a východní orientace jsou si postavením vůči slunci rovnocenné

Použité makety a simulace modelu DART byly vytvořeny Ústavem systémové biologie a ekologie AV ČR v.v.i. v Brně. Vlastní výpočet simulací byl proveden prostřednictvím výpočetních kapacit MetaCentra sdružení CESNET.



obr. 4.9: Ukázka simulací modelu DART

Simulace modelu DART byly tvořeny pro 3 různé orientace svahů (severní, jižní, západní+východní), 6 hodnot obsahu chlorofylu v listoví ($C_{ab} = 10, 25, 40, 55, 75, 80 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), a 3 hodnoty korunového zápoje ($CC = 60\%, 75\%$ a 90%)

4.9 Výpočet obsahu chlorofylu pomocí regresního modelu

K vlastnímu výpočtu obsahu chlorofylu byl použit statistický regresní model zohledňující závislost obsahu chlorofylu v listoví a optického indikátoru obsahu chlorofylu. Jako optický indikátor obsahu chlorofylu v listoví byl zvolen index $ANMB_{650-725}$ (*Area under curve normalized to maximal band dept between 650-725 nm*) dle [MALENOVSKÝ et al., 2006b]. Hodnota tohoto indexu je založená na vztahu obsahu chlorofylu a velikosti plochy vymezené křivkou reflektance v oblasti chlorofylové absorpce záření, která je dále normalizovaná.

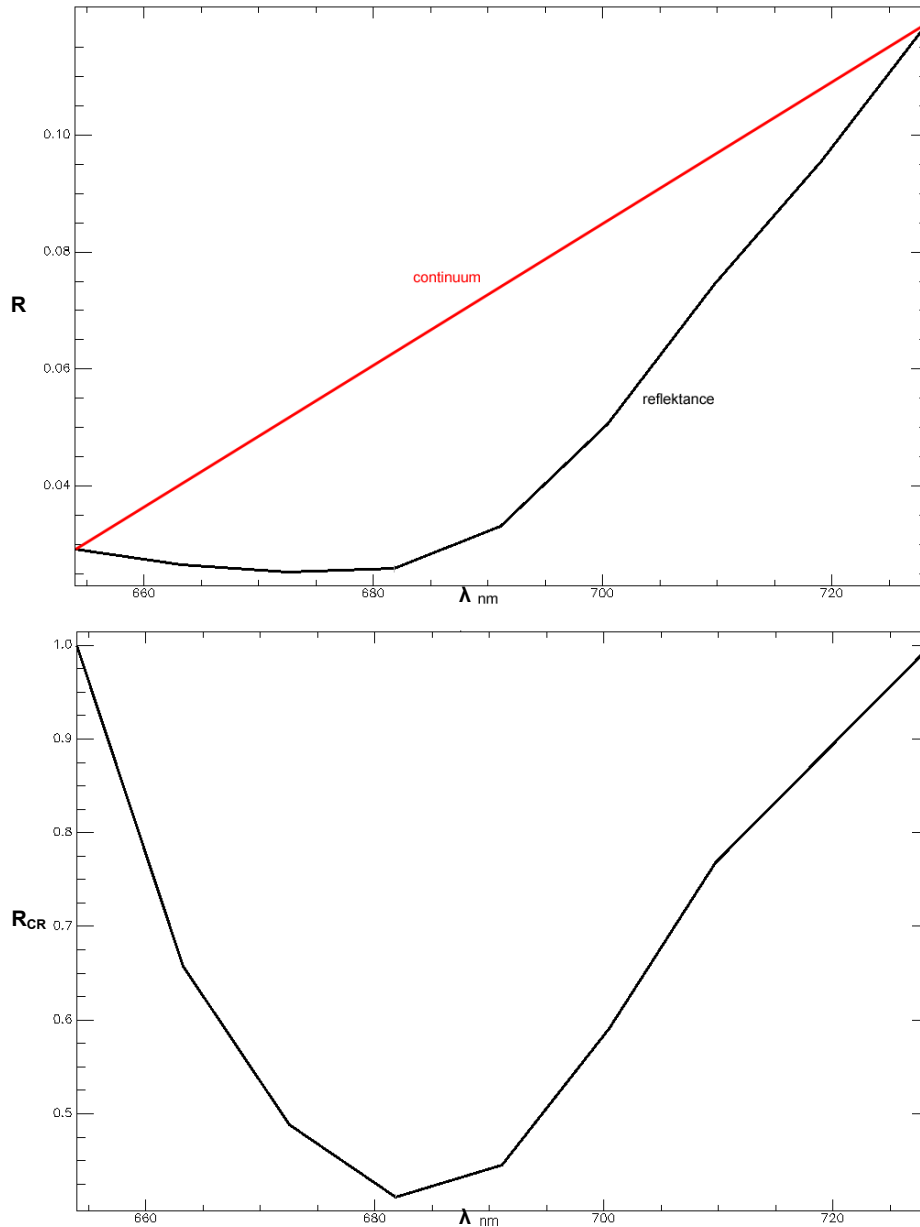
Aby bylo možné sledovat vlastní změny tvaru reflektanční křivky v uvedeném pásmu bez ohledu na absolutní hodnoty reflektance (jenž mohou být ovlivněny různými vlivy, jenž s obsahem chlorofylu přímo nesouvisí), je v tomto případě používána transformace označovaná jako continuum removal (odstranění kontinua). Tato transformace vede k normalizaci hodnot reflektance vůči tzv. kontinuu, což je křivka spojující lokální maxima reflektanční křivky. Výsledná transformovaná hodnota je pak získána jako:

$$R_{CR} = \frac{R}{C}$$

kde: R_{CR} ...hodnota odrazivosti po transformaci continuum removal, R ...hodnota odrazivosti, C ...hodnota kontinua

Princip této transformace pak názorně dokumentuje obrázek 4.10. Transformace continuum removal vede zejména k práci nikoliv s absolutními hodnotami reflektance, ale k práci s tvarem reflektanční křivky. Díky tomu je možné lépe studovat vlastní absorpční charakteristiky v daném intervalu vlnových délek. V našem případě byla transformace continuum removal aplikována na spektrální kanály odpovídající vlnovým délkám 650 – 725 nm.

Jak již bylo uvedeno výše, má změna koncentrace chlorofylu za následek změnu spektrálních vlastností listoví, která se projevívá právě změnou tvaru křivky reflektance po aplikaci transformace continuum removal. Do určité míry zde platí, že čím je obsah chlorofylu vyšší, tím je plocha vymezená touto křivkou větší a zároveň se (díky vyšší absorpci záření chlorofylem)



obr. 4.10 Continuum removal:

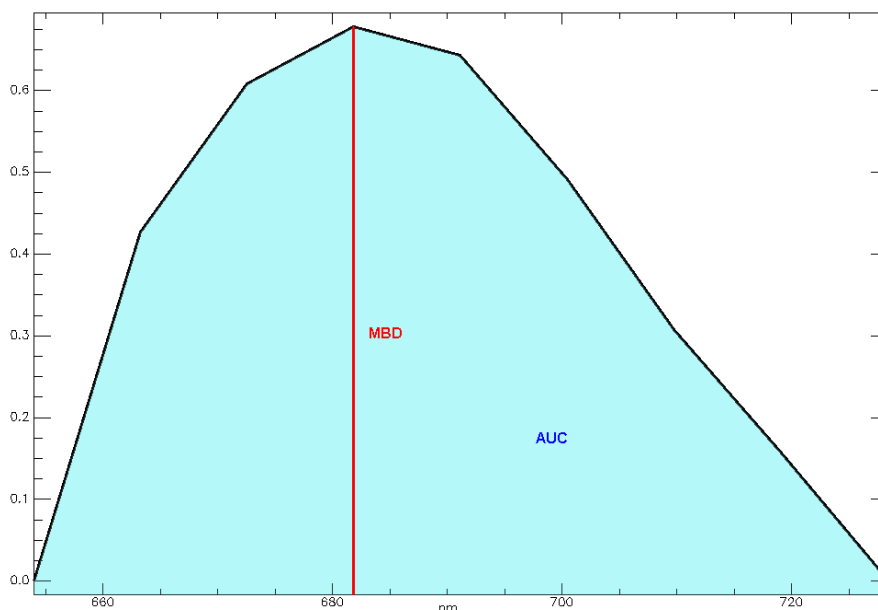
nahore: Transformace continuum removal slouží k relativizaci hodnot reflektance (na obrázku černě) vzhledem ke kontinuu (na obrázku červeně). Výsledná hodnota je získána jako podíl reflektance a kontinua.

dole: křivka reflektance po aplikaci transformace continuum removal

více prohlubuje. Jak je uvedeno v [MALENOVSKÝ et al., 2006b] roste plocha vymezená křivkou reflektance po odstranění kontinua až do hodnoty koncentrace chlorofylu cca $60 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, protože při vyšších hodnotách koncentrace chlorofylu se již křivka dále neprohlubuje a její hloubka naopak začne klesat. Z tohoto důvodu je v případě indexu $ANMB_{650-725}$ plocha vymezená křivkou reflektance normalizována svou vlastní maximální hloubkou. Vlastní hodnota výše uvedeného indexu je pak získána jako:

$$ANMB_{650-725} = \frac{0,5 \cdot \sum (\lambda_{j+1} - \lambda_j) \cdot (R_{j+1} + R_j)}{MBD} ; \text{ [MALENOVSKÝ et al., 2006b]}$$

kde: λ_j ...vlnová délka; R_j ...reflektance po transformaci continuum removal na vlnové délce λ_j , MBD...maximální hloubka křivky reflektance po transformaci continuum removal (viz obr. 4.11).



obr. 4.11: index ANMB₆₅₀₋₇₂₅: Index ANMB₆₅₀₋₇₂₅ je založen na výpočtu plochy vymezené křivkou reflektance v intervalu vlnových délek 650 – 725 nm po aplikaci transformace continuum removal (AUC). Velikost této plochy je následně normalizována maximální hloubkou výše uvedené křivky (MBD). Pro výpočet indexu je nutné aplikovat po transformaci continuum removal modul $1 - R_{CR}$ z důvodu otočení křivky do požadovaného směru (srovnání viz obr. 4.10 dole)

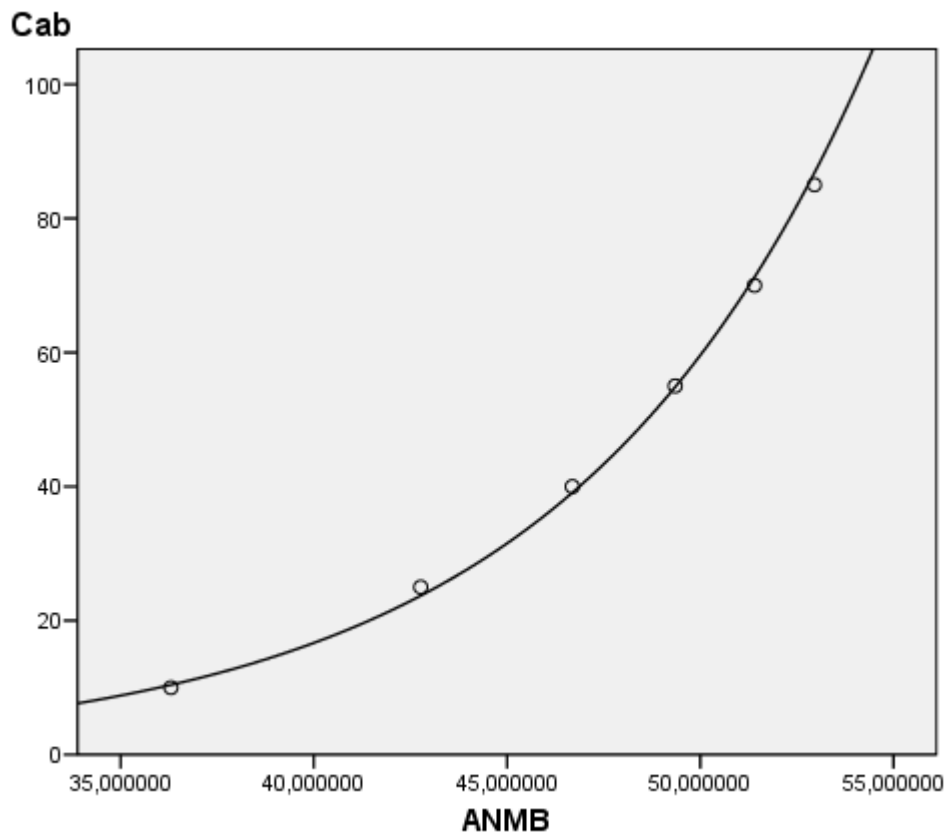
Hodnoty tohoto indexu byly určeny nejprve pro makety simulované pomocí modelu radiativního transferu DART, u nichž byl znám i obsah chlorofylu v listoví. Jak bylo uvedeno dříve, byly makety simulovány pro koncentrace chlorofylu $C_{ab} = 10, 25, 40, 55, 70$ a $80 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Dále byly rozlišovány 3 orientace svahů (sever, jih, západ+východ), 6 hodnot indexu listové plochy LAI (LAI = 3, 5, 7, 9, 11, 13). Pro každou dílčí orientaci pak navíc byly uvažovány 3 hodnoty korunového zápoje (60 %, 75 % a 90 %). Z výsledků publikovaných v [MALENOVSKÝ et al., 2006b] přitom vyplývá, že závislost indexu ANMB₆₅₀₋₇₂₅ na hodnotě indexu listové plochy a velikosti korunového zápoje je velmi malá (prakticky nulová). Stejně tak je velmi nízká závislost tohoto indexu na orientaci svahů. Oba tyto závěry byly během zpracování dat v rámci této práce plně potvrzeny. Závislost hodnoty indexu ANMB₆₅₀₋₇₂₅ ke koncentraci chlorofylu v listoví tak byla vyšetřována tak, že ze simulací byla vždy vypočtena průměrná hodnota pro dané množství chlorofylu přes všechny hodnoty LAI, orientace svahu a korunového zápoje. Zjištěné hodnoty jsou pak uvedeny v tabulce 4.4.

Tabulka 4.4a Vztah hodnot indexu ANMB₆₅₀₋₇₂₅ a obsahu chlorofylu (C_{ab}) – dospělé smrky							
C_{ab} $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	ANMB ₆₅₀₋₇₂₅						průměr
	LAI = 3	LAI = 5	LAI = 7	LAI = 9	LAI = 11	LAI = 13	
10	35,611494	36,423663	35,847452	36,252576	37,129034	36,543810	36,301338
25	41,906387	42,761046	42,726567	42,622806	43,379427	43,195709	42,765324
40	45,861663	46,665527	46,691551	46,670659	47,171833	47,076730	46,689661
55	48,725142	49,404793	49,411384	49,396050	49,810756	X	49,349625
70	50,839026	51,391231	51,384404	51,380267	51,751632	51,675408	51,403661
85	52,495816	52,943788	52,930193	52,931709	53,241621	53,192317	52,955907

Pro vyšetřování vztahu $ANMB_{650-725} - C_{ab}$ byl nejprve uvažován lineární regresní model. Jak ale bylo zjištěno, mnohem lepších výsledků bylo dosaženo při použití exponenciální regrese. Zjištěnými hodnotami $ANMB_{650-725} - C_{ab}$ byla proložena exponenciální křivka pomocí algoritmu CURVEFIT obsaženého v rámci statistického software SPSS (viz obr. 4.12). Pomocí tohoto algoritmu byly odvozeny rovněž parametry výše uvedené křivky ve tvaru:

$$C_{ab} = 0,102 \cdot e^{0,127 \cdot ANMB_{650-725}}$$

Výše uvedeným postupem byl získán statistický model popisující vztah hodnoty indexu $ANMB_{650-725}$ a obsahu chlorofylu (C_{ab}) s velmi vysokou mírou signifikance ($R^2 = 0,9982$). V případě lineárního regresního modelu bylo dosaženo o něco nižší hodnoty ($R^2 = 0,9317$).



obr. 4.12: Exponenciální regresní model vztahu $ANMB_{650-725}$ a obsahu chlorofylu (C_{ab}) – dospělé smrky:
Parametry exponenciální křivky, použité v rámci tohoto modelu, byly určeny pomocí algoritmu CURVEFIT obsaženého v rámci statistického software SPSS. Koefficient determinance $R^2 = 0,9982$

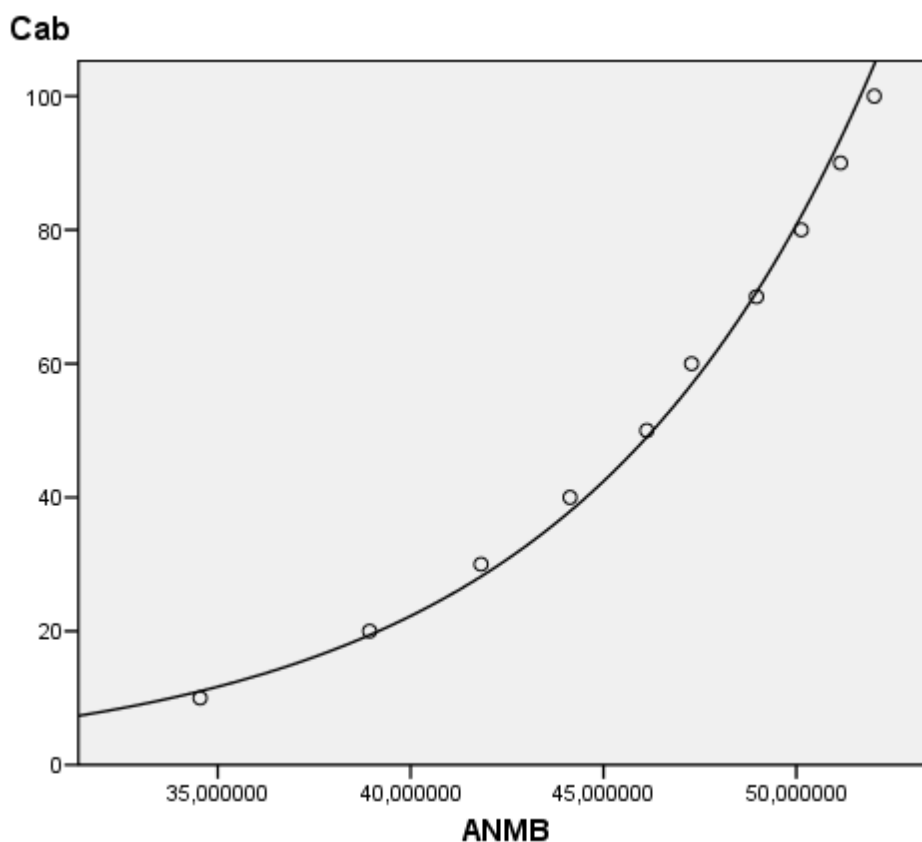
Analogický postup byl aplikován rovněž v případě mladých smrků. Tabulka 4.4b znázorňuje hodnoty indexu $ANMB_{650-725}$ ve vztahu k simulovaným hodnotám obsahu chlorofylu a hodnotě indexu listové plochy LAI pro mladé smrky:

C _{ab} μg/cm ²	ANMB ₆₅₀₋₇₂₅						
	LAI = 3	LAI = 5	LAI = 7	LAI = 9	LAI = 11	LAI = 13	průměr
10	33,255813	34,778924	34,805277	33,871302	35,407771	35,129704	34,541465
20	38,434859	38,826547	38,863728	39,060952	39,291668	39,145544	38,937216
30	41,302826	41,780471	41,818150	41,956966	42,128159	41,961181	41,824626
40	43,619325	44,109901	44,156445	44,268466	44,403987	44,238885	44,132835
50	45,568828	46,029811	46,512112	46,178663	46,296844	46,146311	46,122095
60	47,190469	47,607394	45,621621	47,739479	47,843940	47,707537	47,285073
70	48,601184	48,950298	48,986354	49,068295	49,163253	49,037322	48,967784
80	49,785499	50,118530	50,147205	50,221970	50,309132	50,191658	50,128999
90	50,839047	51,137270	51,159848	51,228968	51,310040	51,200161	51,145889
100	51,756399	52,017070	52,032935	52,095648	52,170335	52,067413	52,023300

Zjištěnými hodnotami byla posléze proložena exponenciální křivka o parametrech (viz. obr. 4.13):

$$C_{ab} = 0,129 \cdot e^{0,129 \cdot ANMB_{650-725}}$$

Také v tomto případě byla získána velmi vysoká hodnota koeficientu determinance $R^2 = 0,9949$. Pro srovnání byla pro dané hodnoty použita i lineární regrese; v tomto případě však byla hodnota koeficientu determinance již nižší ($R^2 = 0,9404$).



obr. 4.13: Exponenciální regresní model vztahu ANMB₆₅₀₋₇₂₅ a obsahu chlorofylu (C_{ab}) – mladé smrky:
 Parametry exponenciální křivky, použité v rámci tohoto modelu, byly určeny pomocí algoritmu CURVEFIT obsaženého v rámci statistického software SPSS. Koeficient determinance $R^2 = 0,9949$

Oba regresní modely byly posléze aplikovány na vlastní hyperspektrální obrazová data, resp. na spektrální kanály ležící v intervalu vlnových délek 650-725 nm, jejichž odrazivost byla předtím transformována metodou continuum removal¹¹. Aplikace zjištěného statistického regresního modelu na obrazová data byla realizována pomocí funkce Band Math v rámci software ENVI 4.6. Výsledkem této operace byly hledané hodnoty obsahu chlorofylu pro jednotlivé pixely obrazu.

¹¹ Posléze bylo ještě nutné provést transformaci dat pomocí modulu 1-R tak, aby bylo možné index $ANMB_{650-725}$ určit výše uvedeným způsobem.

5 VÝSLEDKY

5.1 Souhrn získaných výsledků

V rámci zpracování této práce byly využity dvě sady hyperspektrálních leteckých snímků pro dvojici lokalit NP Šumava (Černá Hora, Smrčina) v různém stádiu napadení porostů smrku ztepilého lýkožroutem smrkovým. Po provedení geometrických a atmosférických korekcí dat byl vytvořen nelineární regresní model popisující vztah indexu $ANMB_{650-720}$ k obsahu chlorofylu v listoví smrkových porostů. Tento regresní model byl vytvořen na podkladě simulací modelu radiativního transferu DART, a to zvláště pro dospělé (nad cca 40 let) a mladé (pod cca 40 let) stromy. Vytvořený regresní model byl pak inverzně aplikován na vlastní hyperspektrální obrazová data, čímž byly získány hodnoty obsahu chlorofylu pro oblasti, které byly předtím klasifikovány jako sluncem osvětlené smrkové korony příslušného stáří (dospělé X mladé).

Získané výsledky byly zpracovány formou mapových výstupů v měřítku 1: 5000. Výsledné mapové výstupy využívají souřadného systému WGS-84 a kartografického zobrazení UTM 33N, jež byly standardem používaným v rámci celého projektu. Ukázka výsledných mapových výstupů je přiložena ve formě mapového listu v příloze této práce.

5.2 Vliv infekce lýkožrouta smrkového na obsah chlorofylu

V rámci hodnocení získaných výsledků bylo provedeno srovnání obsahu chlorofylu u vzorku kůrovcem napadených stromů se vzorkem stromů nenapadených. K vymezení napadených a nenapadených stromů posloužila doplňková klasifikace zdravotního stavu stromů popsaná v rámci oddílu 4.7. Pro každý strom byla spočítána průměrná hodnota obsahu chlorofylu. Tato hodnota byla určena jako průměr ze všech pixelů obrazu tvořících na snímku korunu daného stromu. Test byl proveden na vzorku 15 zdravých a 15 infikovaných stromů. Zjištěné hodnoty obsahu chlorofylu jsou uvedeny v tabulce 5.1:

Tabulka 5.1: Hodnoty obsahu chlorofylu ve zkoumaných stromech					
infikované	C_{ab} [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] srpen 2009	C_{ab} [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] září 2009	zdravé	C_{ab} [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] srpen 2009	C_{ab} [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] září 2009
1	18,98	24,56	1	33,02	37,41
2	15,23	22,64	2	34,89	36,34
3	16,14	23,08	3	33,88	36,82
4	16,12	24,43	4	31,40	36,24
5	18,49	21,18	5	29,02	33,83
6	17,05	25,41	6	29,52	34,90
7	18,62	27,31	7	28,52	32,66
8	17,49	23,00	8	30,69	37,07
9	17,99	20,74	9	30,63	39,04
10	16,73	24,46	10	25,51	31,89
11	15,46	21,81	11	28,85	33,35
12	19,38	26,56	12	31,29	33,51
13	14,19	24,84	13	32,16	38,93
14	17,09	21,50	14	30,27	32,68
15	15,57	23,81	15	29,14	35,70

Na uvedených datech byla testována hypotéza o stejném průměru hodnot obsahu chlorofylu napadených a nenapadených stromů oproti alternativě, že průměry hodnot obsahu chlorofylu v napadených a zdravých stromech stejné nejsou. K tomu byl využit dvouvýběrový t-test:

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S} \cdot \sqrt{\frac{n_X \cdot n_Y}{n_X + n_Y}}; [ZVÁRA, 2004]$$

pro hodnoty ze srpna 2009 platí:

$$t = 18,776; t_{0,99} = 2,650$$

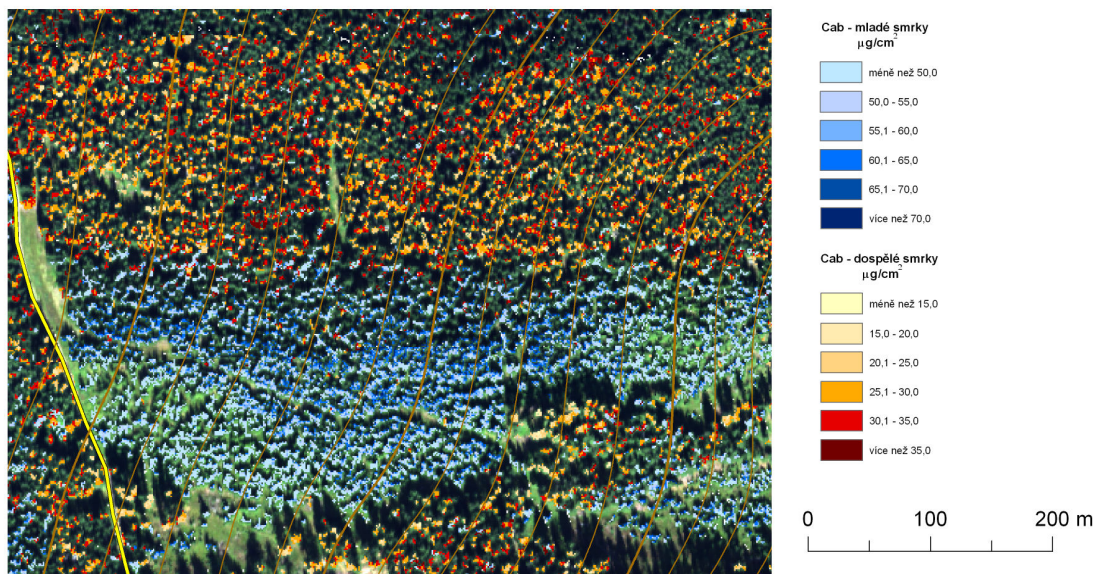
$$t > t_{0,99}$$

pro hodnoty ze září 2009 pak platí

$$t = 15,021; t_{0,99} = 2,650$$

$$t > t_{0,99}$$

Na základě získaného výsledku je tedy v obou případech možné hypotézu o stejných průměrech hodnot obsahu chlorofylu u infikovaných a zdravých stromů zamítnout na 99% intervalu spolehlivosti.



obr. 5.1: Chlorofylová mapa:

Ukázka získaných výsledků – výřez výsledné chlorofylové mapy. Podklad je tvořen RGB syntézou vytvořenou na základě hyperspektrálních dat AISA Dual.

5.3 Diskuse

Aplikací regresního exponenciálního modelu vztahu obsahu chlorofylu a optického indexu $ANMB_{650-725}$ bylo možné vytvořit mapové výstupy znázorňující hodnoty obsahu chlorofylu v korunách smrkových porostů Národního parku Šumava. Vzájemný vztah hodnoty indexu $ANMB_{650-725}$ a obsahu chlorofylu byl zjišťován na podkladě simulací smrkových porostů pomocí modelu radiativního transferu DART.

Oproti běžněji používaným empirickým modelům, kde je vztah obsahu chlorofylu a reflektance (resp. optického indexu) zjišťován přímo v samotných datech pomocí pozemních odběrů vzorků listoví¹, má některé výhody. Jednou z nejdůležitějších je skutečnost, že empirické modely jsou silně závislé na charakteristice dané lokality – tj. vztah mezi obsahem chlorofylu a reflektancí (resp. optickým indexem) je nutné stanovovat pro každou lokalitu samostatně. V našem případě by tedy bylo nutné provést odběry vzorků listoví v obou zájmových lokalitách (Černá Hora, Smrčina) a vztah obsahu chlorofylu na reflektanci stanovovat pro každou lokalitu samostatně. Vzhledem k tomu, že by tyto vztahy díky závislosti na charakteristikách lokalit nebyly stejné, by začala nabývat na významu otázka vzájemné porovnatelnosti získaných výsledků z obou lokalit. Použití modelů radiativního transferu je naopak zcela univerzální a vztah zjištěný na základě tohoto modelování je možné použít univerzálně všude tam, kde se vyskytují typy stromů, s nimiž model počítá. Nevýhodou je však skutečnost, že celý postup je celkově složitější. Modelování pomocí modelů radiativního transferu je navíc hardwarově velmi náročné.

Ze získaných výsledků vyplývá, že obsah chlorofylu u stromů napadených lýkožroutem je nižší než v případě stromů nenapadených. Toto zjištění je zcela v souladu s předpoklady uvažovanými v úvodu práce. Díky tomuto zjištění je tedy možné využít získané výsledky nejen ke sledování aktuálního zdravotního stavu smrkových porostů v zájmových oblastech, ale do značné míry se mohou stát vstupy pro modelování dalšího postupu lýkožrouta smrkového. Vycházíme zde přitom z předpokladu, že lýkožrout napadá nejprve stromy oslabené. Toto oslabení se pak může projevit v nižším obsahu chlorofylu v listoví.

Výsledky získané prostřednictvím zpracování popsanych dat pomocí uvedené metodiky však zcela jistě obsahují určité chyby. Jednou z nejzávažnějších příčin zkreslení výsledků jsou zejména nepříznivé povětrnostní podmínky v případě dat ze srpna 2009. Hodnoty naměřené senzorem jsou zde lokálně zkresleny vlivem oblačnosti a jejích stínů. Tato chyba se pak přenášela celým dalším postupem, a i když by měla být teoreticky potlačena při aplikaci atmosférických korekcí (zejména při použití dat ze senzoru FODIS), je otázkou, nakolik bylo toto potlačení efektivní a úspěšné.

Dalším problémem je fakt, že data nebyla pořízena v potřebných (a naplánovaných) termínech. V původním plánu se počítalo s tím, že data budou pořízena tak, aby bylo možné sledovat vývoj kůrovcové infekce v průběhu celé sezóny. 1. sada dat měla být pořízena během června (tj. před zahájením aktivity kůrovce), 2. sada dat měla být pořízena v polovině července (tj. při vrcholné aktivitě kůrovce) a 3. (kontrolní) sada dat měla být pořízena na přelomu září a října (tj. na konci kůrovcové sezóny). Vzhledem ke špatnému počasí v červnu a červenci bylo možné pořídit 1. sadu dat až 2. srpna a 2. sadu dat až 1. září. Díky tomu je mezi oběma sadami dat jen velmi malý časový rozdíl, čímž je v podstatě znemožněno sledování časového vývoje lokalit – resp. skutečné změny v lokalitách jsou tak malé, že jsou přehlušeny systematickou chybou vlastního zpracování dat. 3. sada dat pak nebyla do doby odevzdání práce pořízena vůbec, protože vzhledem k malému odstupu 1. a 2. sady nemělo smysl plánovat pořízení 3. sady na původní termín (opět by zde byl problém s malým časovým odstupem od 2. řady). Proto bylo pořízení 3. sady dat nejprve odsunuto a následně zrušeno, neboť v lokalitách již tou dobou ležela sněhová pokrývka.

Z údajů uvedených v tabulce 5.1 je možné zjistit, že hodnoty obsahu chlorofylu jsou na zkoumaných stromech ve všech případech vyšší v září ve srovnání se srpnovými hodnotami. Tento rozdíl sice může být způsoben skutečným nárůstem obsahu chlorofylu, ale s větší

¹ V zájmové oblasti je provedeno několik odběrů vzorků listoví, u nichž je laboratorně určen obsah chlorofylu. V obrazových datech je pak dané místo identifikováno a zjištěné hodnoty obsahu chlorofylu jsou porovnány s naměřenými hodnotami reflektance. Takto zjištěný vztah je potom aplikován na zbytek scény.

Kapitola 5: Výsledky

pravděpodobností se jedná o chybu zpracování dat (vliv oblačnosti a stínů), resp. atmosférických korekcí.

Získané výsledky bylo zamýšleno na závěr porovnat s obsahem chlorofylu zjištěným laboratorně ze vzorků odebraných v terénu v době pořizování dat. Bohužel tato data nebyla do odevzdání práce k dispozici a tudíž toto porovnání nemohlo být provedeno. Obecně je však možné říci, že se hodnoty obsahu chlorofylu a jejich prostorová distribuce pohybovaly v očekávaném intervalu. Z tohoto pohledu je tedy možné hodnotit celý postup zpracování a získané výsledky jako úspěšné.

6 ZÁVĚR

Aplikací kombinace metod radiativního transferu a nelineární exponenciální regrese byl vytvořen model popisující vztah obsahu chlorofylu v listoví a reflektance korun smrkových porostů. Tento model byl pak následně prakticky aplikován na letecká hyperspektrální obrazová data pořízená během dvou leteckých kampaní v srpnu a září roku 2009 v lokalitách NP Šumava. Tímto byly získány datové podklady pro tvorbu mapových výstupů zobrazujících obsah chlorofylu v listoví smrkových porostů ve zkoumaných lokalitách.

K tvorbě výše uvedeného modelu byl použit optický index $ANMB_{650-725}$. Tento index je založen na změnách reflektanční křivky v intervalu vlnových délek 650 – 725 nm. V tomto intervalu se nachází absorpční maximum chlorofylu. Absorpce elektromagnetického záření zde má za následek pokles reflektance, který dává vzniknout typické absorpční prohlubni. Hodnota indexu pak popisuje tvar a velikost této prohlubně, které jsou přímo závislé na obsahu chlorofylu. Jak bylo potvrzeno v průběhu zpracování práce, index $ANMB_{650-725}$ vykazuje velmi silnou exponenciální korelaci s vlastním obsahem chlorofylu.

Alternativní metodou bylo využití umělé neuronové sítě. V tomto případě je vztah obsahu chlorofylu a reflektance (po aplikaci transformace continuum removal) řešen přímo, tj. bez využití optického indexu. Tento postup přitom má jak výhody, tak nevýhody. Výhodou využití umělé neuronové sítě je fakt, že se vztah reflektance – obsah chlorofylu řeší pro každý pixel namodelovaných maket DART zvlášť, na rozdíl od použitého postupu, kdy je nutné určovat vždy průměrnou hodnotu reflektance (resp. optického indexu) za celou maketu. Toto průměrování pak může vést k potlačení některých spektrálních projevů, což může mít za následek dílčí zkreslení získaných výsledků. Práce s vlastní odrazivostí v jednotlivých spektrálních kanálech nasimulovaných scén však s sebou nese i nevýhody – například skutečnost, že je nutné co nejvíce potlačit ostatní vlivy, které získanou hodnotu reflektance ovlivňují a přitom nesouvisí s obsahem chlorofylu v listoví stromů. V tomto případě jde zejména o vliv geometrie povrchu – tj. orientace svahů vůči světovým stranám (resp. vůči postavení Slunce v době pořízení dat) a sklonu svahů. Proto je v případě využití přímého vztahu reflektance – obsah chlorofylu nutné provádět výpočet odděleně pro dílčí orientace a sklonitosti terénu. Dále je nutné brát v úvahu i strukturní charakteristiky pozorovaných stromů (např. index listové plochy LAI, velikost korunového zápoje apod.). Toto všechno má za následek mnohem vyšší výpočetní nároky (simulace je nutné provést nad všemi existujícími kombinacemi sledovaných faktorů). V případě využití optického indexu je situace jednodušší, neboť v podstatě není potřeba brát v potaz ani geometrii povrchu ani geometrické charakteristiky pozorovaných stromů (LAI, korunový zápoj) s ohledem na nezávislost hodnot indexu $ANMB_{650-720}$ na těchto faktorech. Zcela jiným přístupem je pak přímé statistické modelování vztahu obsahu chlorofylu na reflektanci. Tento vztah je v tomto případě zjišťován přímo z vlastních hyperspektrálních obrazových dat s pomocí laboratorně zpracovaných vzorků (tj. bez využití modelů radiativního transferu). Vztah založený na srovnání obsahu chlorofylu v odebraných vzorcích s hodnotami reflektance v daném místě je pak aplikován na zbytek snímku. Tato metoda (byť ve světě poměrně značně rozšířená) má ale velkou nevýhodu v silné závislosti na vlastnostech zkoumané lokality (tj. zjištěný vztah mezi reflektancí a obsahem chlorofylu není přenositelný mezi jednotlivými lokalitami).

S ohledem na výše uvedené skutečnosti je použitý postup možné vnímat jako vhodný kompromis mezi zbývajícími dvěma metodikami – tj. modelováním vztahu obsahu chlorofylu a reflektance pomocí modelů radiativního transferu s využitím umělých neuronových sítí a přímým statistickým modelováním. Uvedený postup přebírá výhody využití metodiky radiativního transferu, díky čemuž je zajištěna nezávislost na lokalitě, avšak zároveň je výpočet díky

robustnosti použitého indexu vůči geometrickým parametrům (orientace a sklon terénu, LAI, korunový zápoj) výrazně méně výpočetně náročný.

Kromě vlastního sledování obsahu chlorofylu bylo v závěru práce provedeno statistické srovnání kůrovcem napadených a nenapadených stromů. Výsledkem tohoto srovnání bylo zjištění, že obsah chlorofylu u kůrovcem viditelně napadených stromů je na 99% hladině spolehlivosti nižší než v případě kůrovcem nenapadených stromů. Toto zjištění tak potvrzuje možnost využití technik sledování obsahu chlorofylu metodami kvantitativního DPZ při monitoringu šíření hmyzích škůdců.

Vzhledem k rozsahu řešené problematiky již některé další otázky, které se v průběhu zpracování vyskytly, nemohly být v rámci této práce řešeny. Mohou ale být dobrým námětem na případné další studium do budoucna.

- zjištění vlivu atmosférické korekce na získaný výsledek (srovnání výsledků obdržených při použití různých typů atmosférické korekce – např. FODIS X ATCOR-4 X Empirical line).
- porovnání získaných výsledků s výsledky získanými s využitím aplikace umělé neuronové sítě.
- studium šíření lýkožrouta smrkového v závislosti na zjištěných hodnotách obsahu chlorofylu (např. zda je možné na statisticky reprezentativním vzorku prokázat, že kůvec napadá zejména stromy, u nichž byl zjištěn snížený obsah chlorofylu).

Autor má zájem ve studiu problematiky pokračovat a aktivně se účastnit řešení výše popsaných otázek.

SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ A LITERATURY

AISA Dual hyperspectral sensor: Specim Ltd., [on-line], [cit. 2009-05-26], dostupné z <<http://channelsystems.ca/documents/AISADualver1-07.pdf>>

AISA Eagle hyperspectral sensor: Specim Ltd., [on-line], [cit. 2009-05-26], dostupné z <<http://channelsystems.ca/documents/AISAEaglever1-07.pdf>>

AISA Hawk hyperspectral sensor: Specim Ltd., [on-line], [cit. 2009-05-26], dostupné z <<http://channelsystems.ca/documents/AISAHawkver1-07.pdf>>

AISA Systems: Specim Ltd., [on-line], [cit. 2009-05-26], dostupné z <<http://channelsystems.ca/documents/AISAProductsver1-07.pdf>>

ALLEN, W. A., et al., 1969: *Interaction of isotrophic light with a compact plant leaf*, Journal of Optical Society of America, vol. 59, issue 10, 1376-1379

ARES – Airborne Reflective and Emissive Spectrometer: Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), [on-line], poslední aktualizace 29.1. 2007, [cit. 2010-03-19], dostupné z <http://www.ares.caf.dlr.de/systemspecs_en.html>

AVIRIS Instrument: Jet Propulsion Laboratory (JPL), [on-line], poslední aktualizace 17.8. 2009, [cit. 2010-03-19], dostupné z <<http://aviris.jpl.nasa.gov>>

BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT, 1888: Meyers Konversationlexikon, Bibliographisches Institut, Leipzig, 1888-1889

BOLTON, J., 2003: *Full spectral imaging: a revisited approach to remote sensing*, Sensor, Systems and New Generation Satellites VII, SPIE, 2003, vol. 5234, 243 – 251

BROGE, N., LEBLANC, E., 2000, Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density, Remote sensing of Environment, Elsevier, vol. 76, 156 – 172, ISSN: 0034-4257

CESBIO, 2009: *DART Handbook*, [on-line], [cit. 2009-12-03], dostupné z <<http://www.cesbio.ups-tlse.fr/dart/documentation.php>>

DATT, B., 1999, *A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Test Using Eucalyptus Leaves*, Journal of Plant Physiology, vol. 154, 30 - 36

Earth Observing 1 – Hyperion: United States Geological Survey (USGS), [on-line], poslední aktualizace 11.6. 2009, [cit. 2010-03-19], dostupné z <<http://www.eo1.usgs.gov/hyperion.php>>

FERET, J. B. et. al., 2008: *PROSPECT – 4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments*, Remote sensing of Environment, vol. 112, issue 6, Elsevier, 2008, 3030 – 3043, ISSN: 0043-4257

- GASTELLU – ETCHEGORRY, J. P., MARTIN, E., GASCON, F., 2004: *DART: A 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget*, International Journal of Remote Sensing, vol. 25, issue 1, Taylor&Francis, 2004, 73 – 96, ISSN: 1366-5901
- GURNEY, K., 1997: *An Introduction to neural networks*, CRC Press, London, 1997, repr. 2003, 234 s.
- HABOUDANE, D., 2002, Integration of Hyperspectral Vegetation Indices for Prediction of Crop Chlorophyll Content for Application to Precision Agriculture, Remote Sensing of Environment, Elsevier, vol. 81, 416-426, ISSN: 0034-4257
- HyMap – Airborne Hyperspectral Sensors – Overview*: Integrated Spectronics, [on-line], [cit. 2009-05-26], dostupné z <<http://www.intspec.com/products/hymap>>
- JACQUEMOUD, S., BARET, F., 1990: *PROSPECT – A Model of Leaf Optical Properties Spectra*, Remote Sensing of Environment, vol. 34, issue 2, Elsevier, 1990, 75 – 91, ISSN: 0034-4257
- JACQUEMOUD, S., USTIN, S., 2001: *Leaf optical properties: A state of art*, [on-line], [cit. 2009-07-01], dostupné z <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/>>
- KRUSE, F.A., 2003: *Mineral mapping with AVIRIS and EO-1 Hyperion*, [on-line], [cit. 2010-04-02], dostupné z <http://www.hgimaging.com/PDF/Kruse_JPL2003_Minerals.com>
- LIANG, S., 2004, Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces, Wiley Interscience, A John Wiley & sons, inc. publication, 2004, Hoboken, New Jersey, 534 s., ISBN: 0-471-28166-02
- MALENOVSKÝ, Z., et al., 2006a: *Applicability of the PROSPECT model for Norway spruce needles*, International Journal of Remote Sensing, vol. 27, issue 24, Taylor&Francis, 2006, 5315 – 5340, ISSN: 0143-1161
- MALENOVSKÝ, Z., et al., 2006b: *A new hyperspectral index for chlorophyll estimation of forest canopy: Area under curve normalized to maximal band depth between 650-725 nm*, EARSeL eProceedings, vol. 5, issue 2, 161 – 172, ISSN: 1729-3782
- MALENOVSKÝ, Z. et al., 2007b: *Scaling dimensions in spectroscopy of soil and vegetation*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 9, issue 2, 137 – 164, ISSN: 0303-2434
- MALENOVSKÝ Z., et al., 2008: *Retrievals of the Ecosystem Variables from the Remotely sensed (hyperspectral) data*, HYPER I-NET Distance Learning Environment, 2008
- MOORTHY, I. et. al., 2003: *Needle Chlorophyll Content Estimation: A Comparative Study of PROSPECT and LIBERTY*, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, IGARSS 03, vol. 3, 1676 – 1678, ISSN: 0-7803-7929-2
- NICODEMUS, F., 1965, *Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface*, Applied Optics, vol. 4., issue 7, 767 – 773

- PROBA: European Space agency (ESA), [on-line], [cit. 2010-03-19], dostupné z <<http://earth.esa.int/proba>>
- PŘÍRODA.CZ: *Lýkožrout smrkový – Ips Typographus*, [on-line], poslední aktualizace 14.5. 2004, [cit. 2009-05-24], dostupné z <<http://www.priroda.cz/lexikon.php?detail=72>>
- ROUSE, J. W. et al., 1973, Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS, 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, 309-317
- SILVAPORTAL: *Biotické škodní faktory – škůdci na smrku*, [on-line], [cit. 2010-07-19], dostupné z <http://forrestprot.silvportal.info>
- SIPPERT, P., 2003: *Introduction to Hyperspectral Image Analysis*, Online Journal of Space Communication, issue 3, winter 2003, [on-line], dostupné z <<http://spacejournal.ohio.edu/pdf/shippert.pdf>>
- SKUHRAVÝ V., 2001: *Lýkožrout smrkový – škůdce horských lesů*, Lesnická práce, roč. 80, č. 8, [on-line], dostupné z <<http://lesprace.silvarium.cz/content/blogcategory/64/89>>
- STERGIOU, C., SIGANOS, D., 1996?: *Neural Networks*, [on-line], [cit. 2009-29-11], dostupné z <http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/cs11/report.html>
- USTIN, S., et al., 2009: *Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy*, Remote sensing of Environment, vol. 113, sup. 1, S67-S77
- VACEK, S., PODHRÁZSKÝ, V.V., 2003: *Forrest ecosystems of Šumava Mts. and their management*, Journal of Forrest Science, vol. 49, issue 7, Česká akademie zemědělských věd, Praha 2003, 291 – 301
- ZARCO-TEJADA, P., et al., 2001: *Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forrest canopis with hyperspectral data*, IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, vol. 39, issue 7, 1491 – 1507, ISSN: 0196-2892
- ZATLOUKAL, V., 2001: *Kůrovec v Národním parku Šumava*, Lesnická práce, roč. 80, č. 6, [on-line], [cit. 2009-05-24], dostupné z <<http://lesprace.silvarium.cz/content/view/1227/89>>
- ZVÁRA, K., 2004: *Biostatistika*, Karolinum, Praha, 2004, 210 s., ISBN: 80-246-0739-5

PŘÍLOHY

Příloha 1: Kůrovcová kalamita v Národním parku Šumava

Příloha 2: Zkoumané lokality

Příloha 3: Počasí v době leteckých kampaní

Příloha 4: Přehledová mapky zkoumaných lokalit

Příloha 5: Zhodnocení atmosférických korekcí

Příloha 6: Zhodnocení geometrické korekce

Příloha 7: Legenda klasifikace obrazových dat

Příloha 8: Pozemní podpůrná kampaň

Příloha 9: Mapový list

Příloha 10: DVD s elektronickou verzí práce

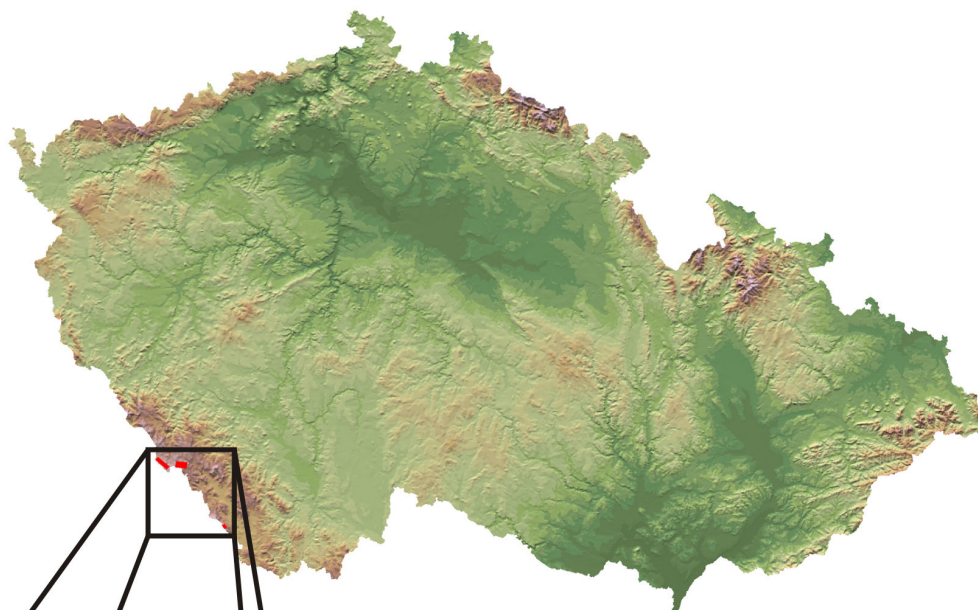
PŘÍLOHA 1: KŮROVCOVÁ KALAMITA V NP ŠUMAVA

Hlavním kůrovcem, vyskytujícím se v šumavských lesích je lýkožrout smrkový (Ips Typographus). Jedná se o červenohnědého lesklého brouka se žlutými chloupky a paličkovitými tykadly. Na zádech nese lýkožrout štít, který je v přední části hrbolatý, v zadní pak tečkovaný. Okraje jeho krovek jsou na každé straně vroubeny čtyřmi charakteristickými zuby. Dospělí jedinci dosahují velikosti 4-5,5 mm. Na přelomu dubna a května se brouci začínají probouzet ve stromech, v nichž se vyvinuli. Dospělí jedinci vylétají ze svých zimovišť a napadají další stromy. Brouci se zavrtají pod kůru, kde samičky vyhlodávají rovnou (mateční) chodbičku, v níž kladou střídavě vajíčka. Vylíhlé larvy vyhlodávají kolmo na mateční chodbičku tzv. larvové chodbičky, na jejichž konci se zakuklí. Tím vzniká charakteristický kůrovcový požerek. Vyhlodáváním chodbiček však brouci způsobují poškození lýka, jenž má za následek narušení transportu vody v těle stromu. Ten díky tomu začne usychat až nakonec uhynie.

Přemnožení kůrovců a následná kalamita však není v šumavských lesích nějakou novinkou – právě naopak. Se změnou druhové skladby lesů, k níž došlo počátkem 19. století se začaly pravidelně vyskytovat i kůrovcové kalamity. Do této doby byl totiž lýkožrout vázán pouze do nejvyšších horských poloh, kde se smrky vyskytovaly. S tím, jak se smrk stal hlavní dřevinou prakticky ve všech nadmořských výškách začalo i šíření kůrovce. K první velké kůrovcové kalamitě došlo v návaznosti na větrnou kalamitu v letech 1868-1875 (ztráty jsou odhadovány na cca 11 mil m³ dřeva). Zmiňuje se o ní například Karel Klostrmann ve svém románu Ze světa lesních samot, který si již zde všímá skutečnosti, že kůrovec zasáhl zejména nově vysázené smrkové porosty, zatímco původní pralesovité lesy nebyly zasaženy prakticky vůbec. K dalšímu přemnožení kůrovce došlo v letech 1917-1927 v návaznosti na přemnožení bekyně mnišky. Tentokrát však byly škody způsobené kůrovcem spíše malé (cca 30 tis. m³ dřeva). Rozsáhlá kalamita se odehrála až po druhé světové válce v letech 1943 – 1955 (velký vliv zde mělo především sucho v roce 1947), kdy padlo za oběť zhruba 30 milionů m³ dřeva [ZATLOUKAL, 2001].

Současná kůrovcová kalamita má svůj počátek v roce 1984, kdy silná vichřice způsobila na německé části Šumavy rozsáhlé polomy o rozloze 270 ha. Vzhledem k tomu, že severní část parku byla vyhlášena jako bezzásahové území, nebylo polomové a později kůrovcové dřevo odvezeno (resp. polomy byly zpracovány jen v nižších polohách, protože se soudilo, že je zde škodlivost lýkožrouta vyšší – prakticky to však bylo způsobeno spíše tím, že v nižších polohách byla na rozdíl od vysokých poloh možnost zpracování polomů o mnoho snazší). Lýkožrout se šířil dál jak na Bavorské, tak i na České straně hranice. Kalamita byla několikrát prohlášena za skončenou, avšak kůrovec se vždy objevil znovu a začal se šířit dále. Situace se začala zlepšovat až po roce 2000. Nicméně na šíření kůrovce měl významný vliv orkán Kyrill, který udeřil v únoru roku 2007 a způsobil přitom rozsáhlé polomy, které se staly novou živnou půdou pro další šíření lýkožrouta [SKUHRAVÝ, 2001].

PŘÍLOHA 2: ZKOUMANÉ LOKALITY



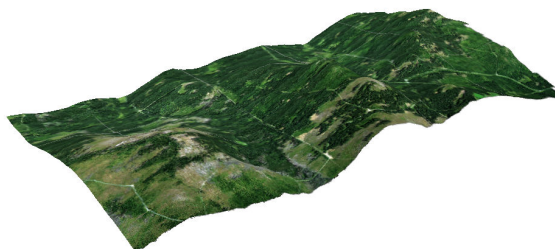
- 1...Březník
- 2...Černá Hora
- 3...Smrčina



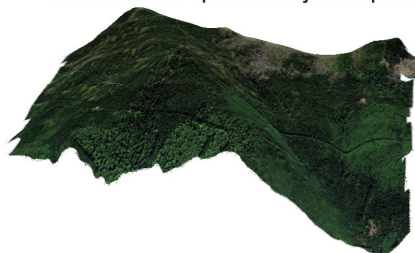
Březník - pohled ze západu



kůrovcem poškozené stromy v lokalitě Březník

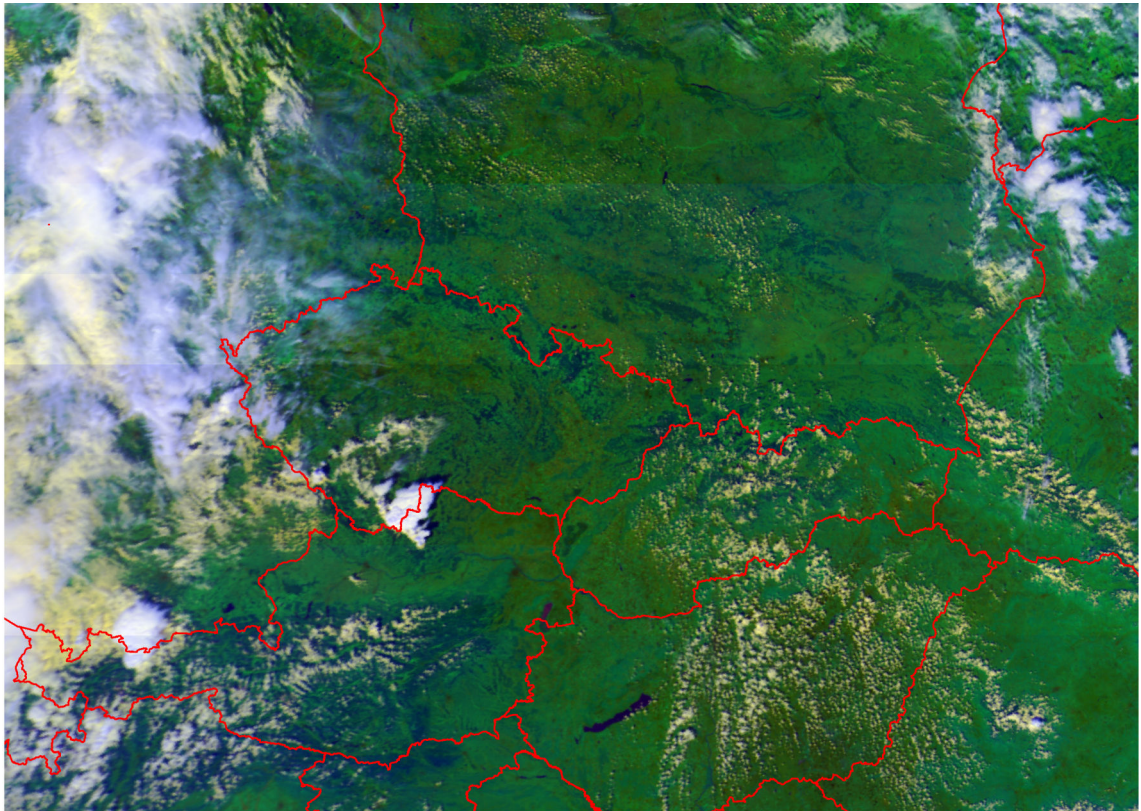


Černá Hora - pohled z jihozápadu

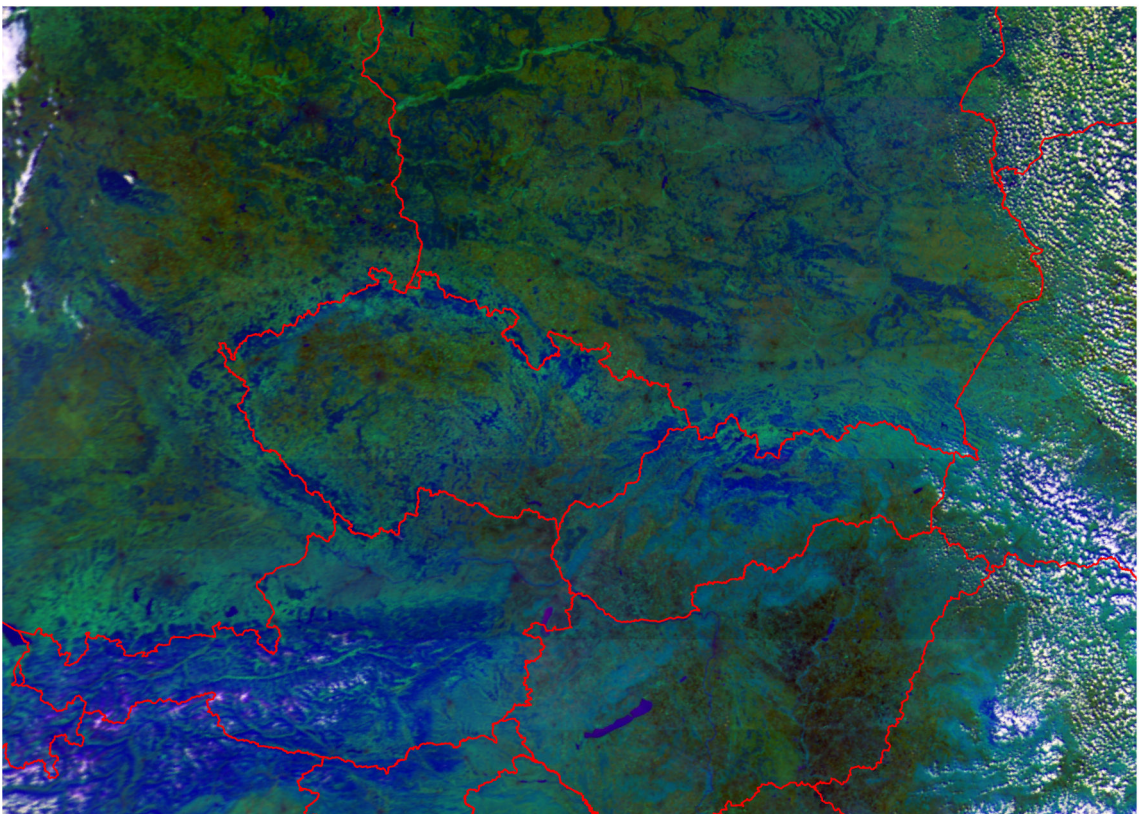


Smrčina - pohled ze severovýchodu

PŘÍLOHA 3: POČASÍ V DOBĚ LETECKÝCH KAMPANÍ



obr. 1: oblačnost nad Českou republikou v době 1. náletu (2.8. 2009), snímek byl pořízen družicí NOAA 19

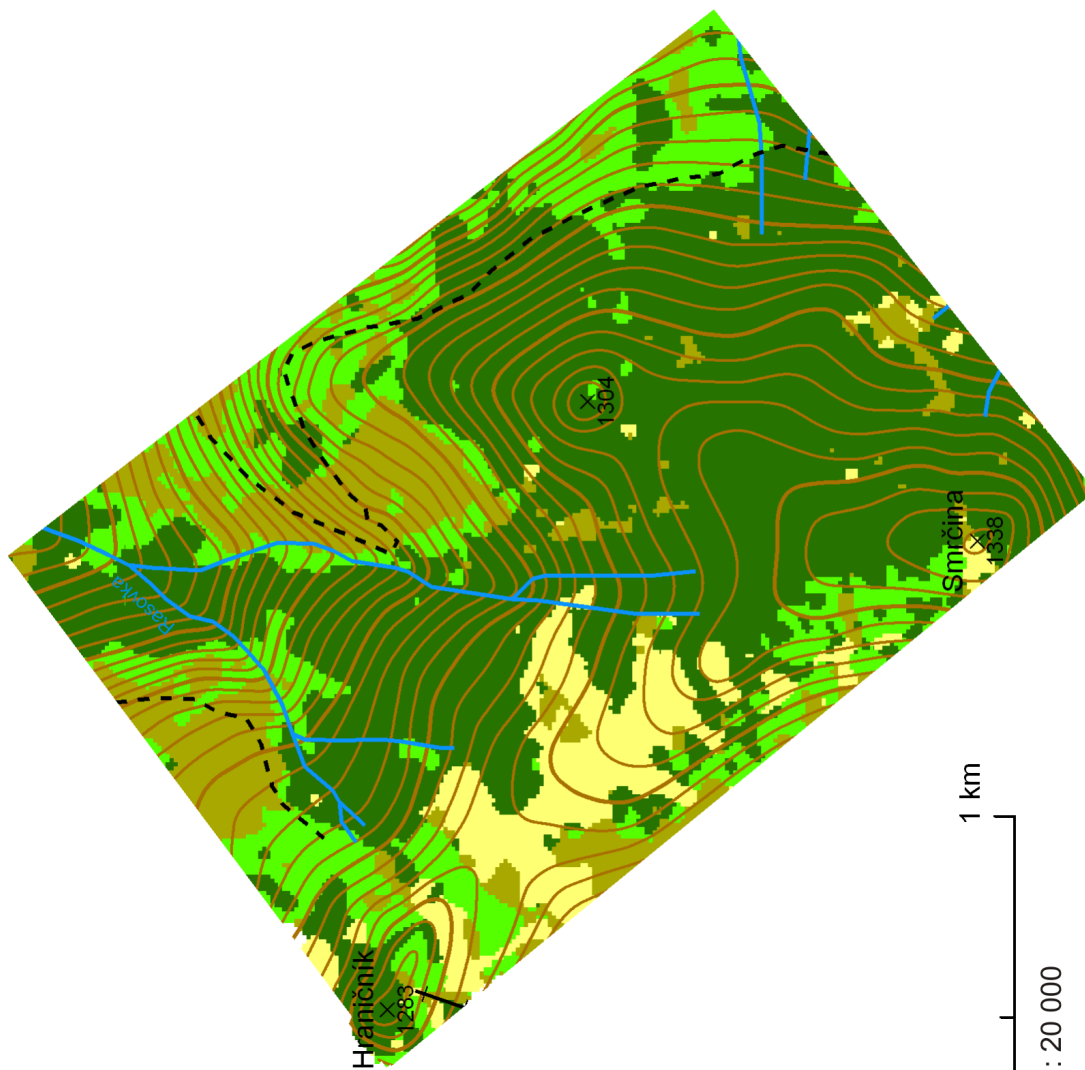
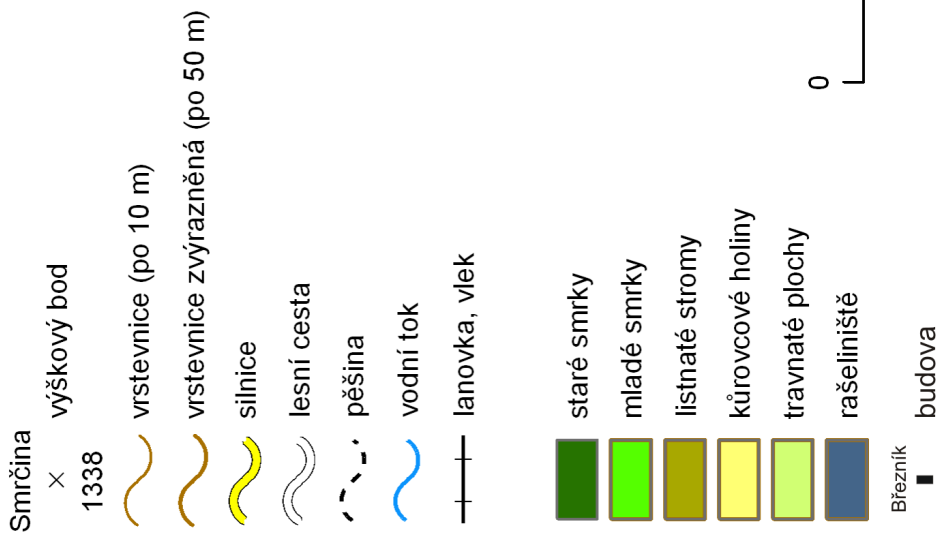


obr. 1: oblačnost nad Českou republikou v době 2. náletu (1.9. 2009), snímek byl pořízen družicí NOAA 19

PŘÍLOHA 4: PŘEHLEDOVÉ MAPKY ZKOUMANÝCH LOKALIT

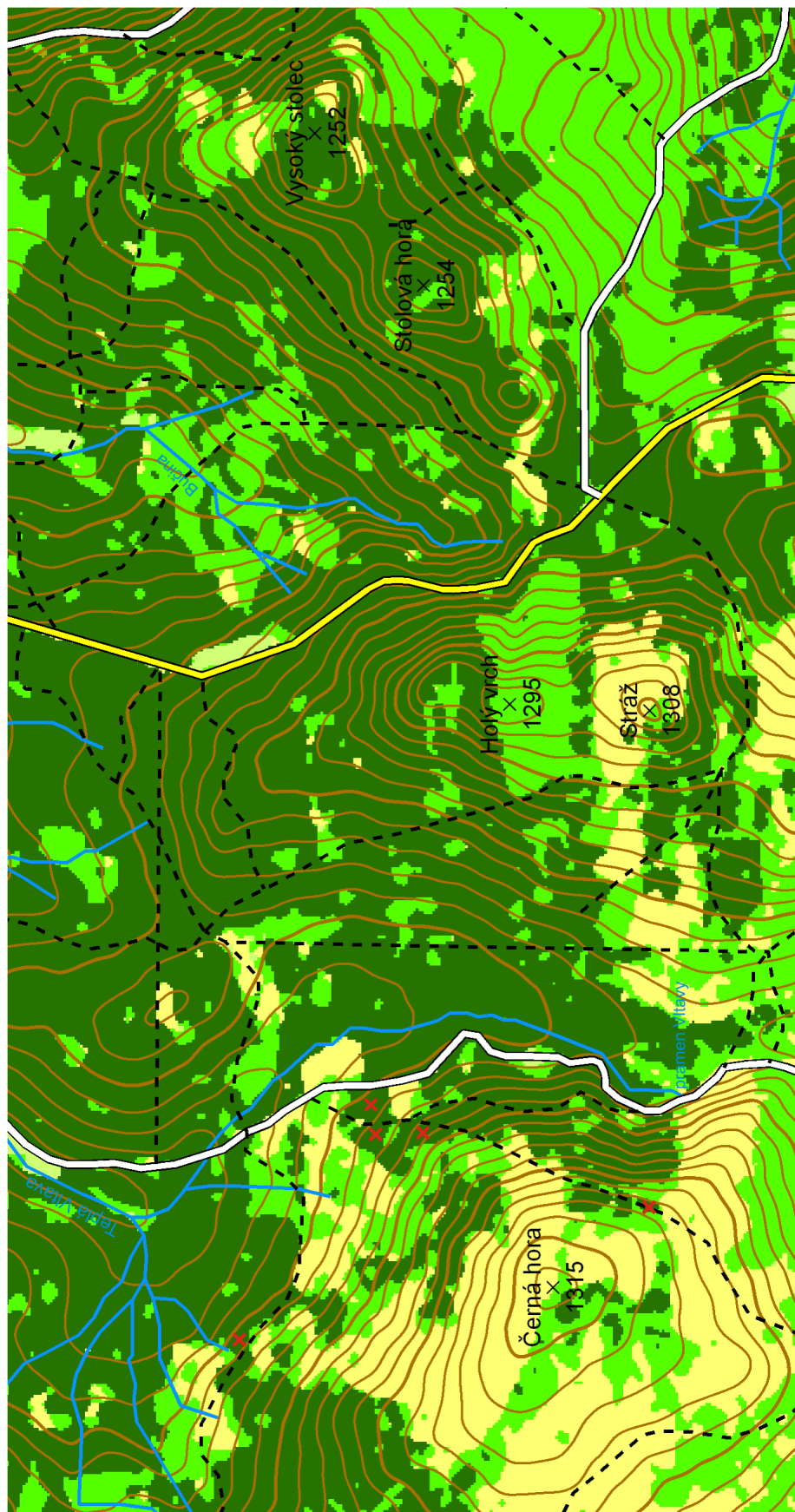
SMRČINA

stav k 1.9. 2009



ČERNÁ HORA

stav k 1.9. 2009



x místo odběru ground truth dat

BŘEZNÍK

stav k 1.9. 2009



0 1 km
1:40 000

x kalibrační terče NEXTEL

PŘÍLOHA 5: ZHODNOCENÍ ATMOSFÉRICKÝCH KOREKČÍ

AISA EAGLE 2.8. 2009

NEXTEL CREAM (60 %)

λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$	λ	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$
399,50	2,2109	0,2208	1,9901	698,40	0,4350	0,6384	0,2034
408,14	0,3404	0,3272	0,0132	707,67	0,4490	0,6403	0,1913
416,78	0,2845	0,3849	0,1004	716,95	0,4440	0,6402	0,1962
425,42	0,3047	0,4074	0,1027	726,23	0,4486	0,6424	0,1938
434,09	0,2959	0,4209	0,1251	735,51	0,4779	0,6449	0,1670
442,98	0,2970	0,4332	0,1363	744,79	0,4919	0,6463	0,1544
451,93	0,2964	0,4431	0,1467	754,15	0,4965	0,6464	0,1499
460,88	0,2967	0,4489	0,1521	763,60	0,5068	0,6478	0,1410
469,83	0,2975	0,4531	0,1557	773,06	0,5051	0,6440	0,1389
478,78	0,2974	0,4575	0,1601	782,51	0,5039	0,6417	0,1379
487,73	0,3022	0,4636	0,1614	791,96	0,4991	0,6391	0,1400
496,68	0,3070	0,4732	0,1661	801,41	0,4997	0,6365	0,1368
505,64	0,2963	0,4869	0,1906	810,86	0,4890	0,6333	0,1443
514,59	0,2646	0,5052	0,2406	820,31	0,4881	0,6310	0,1428
523,54	0,2465	0,5300	0,2835	829,75	0,4949	0,6281	0,1332
532,49	0,2417	0,5587	0,3170	839,18	0,5080	0,6262	0,1182
541,44	0,2549	0,5839	0,3290	848,60	0,5116	0,6237	0,1121
550,51	0,2518	0,6098	0,3580	858,03	0,5167	0,6219	0,1052
559,67	0,2509	0,6245	0,3735	867,46	0,5196	0,6199	0,1003
568,83	0,2552	0,6316	0,3764	876,88	0,5171	0,6181	0,1011
578,01	0,2547	0,6343	0,3795	886,31	0,5235	0,6166	0,0931
587,26	0,2610	0,6338	0,3727	895,74	0,5024	0,6134	0,1110
596,52	0,2679	0,6328	0,3649	905,16	0,5193	0,6126	0,0933
605,79	0,2638	0,6320	0,3683	914,60	0,5314	0,6106	0,0792
615,05	0,2773	0,6305	0,3532	924,05	0,5536	0,6103	0,0567
624,31	0,2947	0,6299	0,3352	933,51	0,7272	0,6052	0,1219
633,57	0,3164	0,6307	0,3143	942,96	1,0469	0,6066	0,4403
642,83	0,3219	0,6312	0,3094	952,42	1,3503	0,6070	0,7433
652,09	0,3422	0,6317	0,2895	961,87	1,1614	0,6078	0,5535
661,35	0,3601	0,6332	0,2730	971,33	0,9426	0,6084	0,3342
670,61	0,3761	0,6344	0,2584	980,78	1,0743	0,6085	0,4658
679,87	0,4033	0,6359	0,2326	990,24	1,0893	0,6084	0,4809
689,13	0,4298	0,6380	0,2082			Ø	0,2526

NEXTEL PEARL (40 %)

λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$	λ	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$
399,50	0,5318	0,1735	0,3583	698,40	0,2847	0,3824	0,0977
408,14	0,1800	0,2402	0,0601	707,67	0,2923	0,3818	0,0896
416,78	0,1722	0,2718	0,0997	716,95	0,2915	0,3800	0,0885
425,42	0,1896	0,2839	0,0943	726,23	0,2933	0,3795	0,0862
434,09	0,1905	0,2913	0,1008	735,51	0,3094	0,3794	0,0700
442,98	0,1996	0,2979	0,0984	744,79	0,3179	0,3790	0,0611
451,93	0,2045	0,3032	0,0987	754,15	0,3215	0,3777	0,0562
460,88	0,2075	0,3058	0,0984	763,60	0,3218	0,3770	0,0552
469,83	0,2063	0,3075	0,1012	773,06	0,3255	0,3744	0,0489
478,78	0,2065	0,3090	0,1025	782,51	0,3242	0,3725	0,0482
487,73	0,2094	0,3112	0,1018	791,96	0,3188	0,3703	0,0515
496,68	0,2116	0,3150	0,1035	801,41	0,3206	0,3684	0,0478
505,64	0,2153	0,3208	0,1055	810,86	0,3102	0,3660	0,0558
514,59	0,2235	0,3284	0,1049	820,31	0,3124	0,3640	0,0516
523,54	0,2310	0,3381	0,1071	829,75	0,3155	0,3619	0,0464
532,49	0,2395	0,3494	0,1099	839,18	0,3258	0,3606	0,0348
541,44	0,2470	0,3595	0,1125	848,60	0,3228	0,3588	0,0360
550,51	0,2551	0,3705	0,1154	858,03	0,3281	0,3572	0,0291
559,67	0,2550	0,3781	0,1231	867,46	0,3283	0,3559	0,0276
568,83	0,2604	0,3836	0,1233	876,88	0,3273	0,3542	0,0269
578,01	0,2596	0,3879	0,1283	886,31	0,3294	0,3527	0,0234
587,26	0,2653	0,3903	0,1250	895,74	0,3145	0,3503	0,0358
596,52	0,2713	0,3914	0,1201	905,16	0,3328	0,3492	0,0164
605,79	0,2682	0,3914	0,1233	914,60	0,3411	0,3473	0,0062
615,05	0,2795	0,3902	0,1107	924,05	0,3556	0,3467	0,0089
624,31	0,2808	0,3891	0,1083	933,51	0,4811	0,3429	0,1381
633,57	0,2785	0,3885	0,1100	942,96	0,7210	0,3433	0,3776
642,83	0,2782	0,3876	0,1094	952,42	0,8230	0,3422	0,4807
652,09	0,2763	0,3863	0,1100	961,87	0,7526	0,3422	0,4104
661,35	0,2809	0,3856	0,1047	971,33	0,5922	0,3414	0,2508
670,61	0,2798	0,3847	0,1048	980,78	0,7072	0,3408	0,3664
679,87	0,2802	0,3840	0,1039	990,24	0,7044	0,3413	0,3631
689,13	0,2811	0,3836	0,1025			∅	0,1133

NEXTEL GREY (25 %)

λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$	λ	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$
399,50	0,6606	0,1376	0,5230	698,40	0,1995	0,2607	0,0612
408,14	0,1442	0,1923	0,0481	707,67	0,2050	0,2598	0,0549
416,78	0,1388	0,2178	0,0790	716,95	0,2049	0,2587	0,0538
425,42	0,1509	0,2259	0,0750	726,23	0,2034	0,2579	0,0544
434,09	0,1504	0,2289	0,0785	735,51	0,2152	0,2569	0,0418
442,98	0,1530	0,2308	0,0778	744,79	0,2224	0,2560	0,0336
451,93	0,1572	0,2325	0,0752	754,15	0,2244	0,2546	0,0302
460,88	0,1601	0,2343	0,0742	763,60	0,2256	0,2533	0,0277
469,83	0,1620	0,2365	0,0746	773,06	0,2277	0,2513	0,0237
478,78	0,1613	0,2397	0,0784	782,51	0,2253	0,2496	0,0243
487,73	0,1650	0,2438	0,0789	791,96	0,2205	0,2480	0,0275
496,68	0,1683	0,2486	0,0803	801,41	0,2215	0,2464	0,0249
505,64	0,1705	0,2527	0,0822	810,86	0,2166	0,2447	0,0281
514,59	0,1742	0,2554	0,0812	820,31	0,2115	0,2434	0,0318
523,54	0,1756	0,2565	0,0810	829,75	0,2197	0,2419	0,0222
532,49	0,1767	0,2567	0,0799	839,18	0,2233	0,2406	0,0173
541,44	0,1769	0,2564	0,0795	848,60	0,2248	0,2392	0,0144
550,51	0,1784	0,2559	0,0775	858,03	0,2262	0,2381	0,0119
559,67	0,1791	0,2558	0,0767	867,46	0,2254	0,2371	0,0117
568,83	0,1798	0,2565	0,0766	876,88	0,2279	0,2362	0,0083
578,01	0,1819	0,2583	0,0764	886,31	0,2253	0,2353	0,0100
587,26	0,1824	0,2606	0,0782	895,74	0,2174	0,2341	0,0167
596,52	0,1856	0,2632	0,0776	905,16	0,2285	0,2332	0,0048
605,79	0,1895	0,2646	0,0751	914,60	0,2418	0,2322	0,0097
615,05	0,1926	0,2649	0,0723	924,05	0,2455	0,2317	0,0138
624,31	0,1932	0,2649	0,0717	933,51	0,3572	0,2313	0,1259
633,57	0,1923	0,2649	0,0726	942,96	0,5298	0,2310	0,2988
642,83	0,1923	0,2645	0,0722	952,42	0,5898	0,2301	0,3597
652,09	0,1924	0,2639	0,0715	961,87	0,5879	0,2296	0,3583
661,35	0,1949	0,2633	0,0684	971,33	0,4174	0,2284	0,1890
670,61	0,1949	0,2626	0,0677	980,78	0,4694	0,2276	0,2418
679,87	0,1962	0,2620	0,0659	990,24	0,5040	0,2272	0,2767
689,13	0,1980	0,2615	0,0635			∅	0,0834

NEXTEL BLACK (8 %)

λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$	λ	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$
399,50	0,3397	0,0557	0,2840	698,40	0,0590	0,0634	0,0022
408,14	0,0688	0,0632	0,0056	707,67	0,0612	0,0631	0,0005
416,78	0,0525	0,0653	0,0128	716,95	0,0627	0,0630	0,0011
425,42	0,0548	0,0651	0,0104	726,23	0,0641	0,0629	0,0069
434,09	0,0532	0,0644	0,0112	735,51	0,0699	0,0629	0,0102
442,98	0,0509	0,0638	0,0129	744,79	0,0731	0,0626	0,0114
451,93	0,0526	0,0634	0,0108	754,15	0,0740	0,0621	0,0132
460,88	0,0519	0,0631	0,0112	763,60	0,0754	0,0618	0,0134
469,83	0,0515	0,0630	0,0115	773,06	0,0752	0,0614	0,0131
478,78	0,0517	0,0631	0,0114	782,51	0,0744	0,0609	0,0126
487,73	0,0518	0,0635	0,0117	791,96	0,0735	0,0605	0,0126
496,68	0,0522	0,0640	0,0118	801,41	0,0731	0,0600	0,0126
505,64	0,0529	0,0645	0,0115	810,86	0,0726	0,0595	0,0135
514,59	0,0536	0,0649	0,0114	820,31	0,0730	0,0592	0,0173
523,54	0,0547	0,0654	0,0107	829,75	0,0764	0,0588	0,0176
532,49	0,0551	0,0655	0,0103	839,18	0,0764	0,0585	0,0174
541,44	0,0551	0,0652	0,0101	848,60	0,0760	0,0582	0,0167
550,51	0,0553	0,0645	0,0093	858,03	0,0749	0,0580	0,0192
559,67	0,0546	0,0639	0,0093	867,46	0,0772	0,0578	0,0213
568,83	0,0550	0,0635	0,0085	876,88	0,0791	0,0574	0,0206
578,01	0,0540	0,0634	0,0094	886,31	0,0779	0,0569	0,0185
587,26	0,0543	0,0636	0,0093	895,74	0,0755	0,0565	0,0266
596,52	0,0545	0,0639	0,0095	905,16	0,0831	0,0563	0,0324
605,79	0,0561	0,0641	0,0080	914,60	0,0886	0,0561	0,0350
615,05	0,0565	0,0641	0,0077	924,05	0,0911	0,0552	0,0999
624,31	0,0561	0,0641	0,0080	933,51	0,1551	0,0555	0,1895
633,57	0,0563	0,0641	0,0079	942,96	0,2450	0,0547	0,2217
642,83	0,0557	0,0640	0,0084	952,42	0,2764	0,0548	0,1932
652,09	0,0555	0,0639	0,0084	961,87	0,2480	0,0547	0,1184
661,35	0,0566	0,0639	0,0074	971,33	0,1731	0,0547	0,1190
670,61	0,0562	0,0638	0,0077	980,78	0,1736	0,0545	0,1431
679,87	0,0568	0,0638	0,0070	990,24	0,1976	0,0634	0,0022
689,13	0,0572	0,0637	0,0065			∅	0,0315

AISA DUAL 1.9. 2009

NEXTEL CREAM (60 %)

λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$	λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$
400,83	0,2255	0,2257	0,0002	691,13	0,4198	0,6257	0,2059
405,11	0,2381	0,2825	0,0444	695,77	0,4150	0,6260	0,2110
409,40	0,2599	0,3264	0,0665	700,44	0,4297	0,6264	0,1967
413,69	0,2761	0,3629	0,0868	705,11	0,4399	0,6271	0,1872
417,98	0,3041	0,3791	0,0750	709,78	0,4483	0,6278	0,1795
422,27	0,3154	0,3894	0,0740	714,44	0,4326	0,6281	0,1955
426,56	0,3316	0,3965	0,0649	719,11	0,4287	0,6277	0,1990
430,85	0,3410	0,4043	0,0633	723,78	0,4269	0,6286	0,2017
435,14	0,3427	0,4104	0,0677	728,45	0,4351	0,6291	0,1940
439,58	0,3523	0,4160	0,0637	733,12	0,4485	0,6301	0,1816
444,05	0,3511	0,4230	0,0719	737,79	0,4518	0,6308	0,1790
448,53	0,3628	0,4291	0,0663	742,46	0,4620	0,6312	0,1692
453,01	0,3653	0,4329	0,0676	747,12	0,4563	0,6314	0,1751
457,48	0,3700	0,4359	0,0659	751,82	0,4600	0,6314	0,1714
461,96	0,3748	0,4382	0,0634	756,58	0,4334	0,6310	0,1976
466,44	0,3711	0,4407	0,0696	761,35	0,4457	0,6326	0,1869
470,91	0,3748	0,4432	0,0684	766,11	0,4670	0,6307	0,1637
475,39	0,3749	0,4451	0,0702	770,87	0,4548	0,6293	0,1745
479,86	0,3448	0,4478	0,1030	775,64	0,4554	0,6284	0,1730
484,34	0,3424	0,4510	0,1086	780,40	0,4606	0,6276	0,1670
488,82	0,3592	0,4544	0,0952	785,16	0,4543	0,6264	0,1721
493,29	0,3455	0,4584	0,1129	789,92	0,4535	0,6251	0,1716
497,77	0,3367	0,4643	0,1276	794,69	0,4559	0,6240	0,1681
502,24	0,3339	0,4700	0,1361	799,45	0,4485	0,6230	0,1745
506,72	0,3050	0,4783	0,1733	804,21	0,4530	0,6218	0,1688
511,20	0,2807	0,4861	0,2054	808,98	0,4507	0,6204	0,1697
515,67	0,2754	0,4972	0,2218	813,74	0,4213	0,6185	0,1972
520,15	0,2631	0,5080	0,2449	818,50	0,4267	0,6175	0,1908
524,62	0,2431	0,5220	0,2789	823,27	0,4343	0,6164	0,1821
529,10	0,2380	0,5345	0,2965	828,03	0,4308	0,6155	0,1847
533,58	0,2314	0,5501	0,3187	832,78	0,4481	0,6145	0,1664
538,05	0,2335	0,5624	0,3289	837,53	0,4424	0,6136	0,1712
542,53	0,2415	0,5772	0,3357	842,29	0,4466	0,6129	0,1663
547,05	0,2446	0,5876	0,3430	847,04	0,4507	0,6120	0,1613
551,69	0,2482	0,5986	0,3504	851,79	0,4479	0,6110	0,1631
556,34	0,2527	0,6055	0,3528	856,55	0,4642	0,6101	0,1459
560,98	0,2646	0,6122	0,3476	861,30	0,4493	0,6094	0,1601
565,63	0,2741	0,6159	0,3418	866,05	0,4608	0,6086	0,1478
570,28	0,2914	0,6190	0,3276	870,81	0,4590	0,6077	0,1487
574,93	0,2928	0,6209	0,3281	875,56	0,4562	0,6070	0,1508
579,58	0,2936	0,6217	0,3281	880,32	0,4460	0,6064	0,1604
584,22	0,2860	0,6219	0,3359	885,07	0,4553	0,6058	0,1505
588,87	0,2948	0,6212	0,3264	889,82	0,4501	0,6051	0,1550
593,52	0,2882	0,6210	0,3328	894,58	0,4255	0,6039	0,1784
598,17	0,2836	0,6208	0,3372	899,33	0,4206	0,6033	0,1827
602,82	0,2800	0,6204	0,3404	904,08	0,4393	0,6029	0,1636
607,46	0,2777	0,6199	0,3422	908,84	0,4267	0,6021	0,1754
612,11	0,2746	0,6190	0,3444	913,60	0,4108	0,6016	0,1908
616,76	0,2754	0,6184	0,3430	918,37	0,4412	0,6017	0,1605
621,41	0,2676	0,6179	0,3503	923,14	0,4355	0,6017	0,1662
626,06	0,2728	0,6181	0,3453	927,91	0,3753	0,6005	0,2252
630,70	0,2751	0,6188	0,3437	932,68	0,3180	0,5986	0,2806
635,35	0,2785	0,6191	0,3406	937,45	0,3870	0,5995	0,2125
640,00	0,2805	0,6194	0,3389	942,22	0,3805	0,5995	0,2190
644,65	0,2817	0,6195	0,3378	946,99	0,3686	0,5995	0,2309
649,29	0,2875	0,6197	0,3322	951,76	0,3860	0,5999	0,2139
653,94	0,2914	0,6202	0,3288	956,53	0,3827	0,6005	0,2178
658,59	0,3002	0,6210	0,3208	961,30	0,3750	0,6012	0,2262
663,24	0,3045	0,6216	0,3171	966,07	0,1785	0,6023	0,4238
667,89	0,3138	0,6223	0,3085	970,84	0,2519	0,6025	0,3506
672,53	0,3326	0,6229	0,2903	975,61	0,2941	0,6031	0,3090
677,18	0,3438	0,6235	0,2797	980,39	0,3693	0,6036	0,2343
681,83	0,3559	0,6243	0,2684	985,16	0,4398	0,6037	0,1639
686,48	0,4038	0,6249	0,2211	989,95	0,4497	0,6038	0,1541
						Ø	0,2078

NEXTEL PEARL (40 %)

λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$	λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$
400,83	0,0910	0,1692	0,0782	691,13	0,2421	0,3581	0,1160
405,11	0,1114	0,2035	0,0921	695,77	0,2477	0,3585	0,1108
409,40	0,1255	0,2279	0,1024	700,44	0,2525	0,3589	0,1064
413,69	0,1438	0,2468	0,1030	705,11	0,2605	0,3597	0,0992
417,98	0,1664	0,2548	0,0884	709,78	0,2614	0,3603	0,0989
422,27	0,1798	0,2598	0,0800	714,44	0,2600	0,3606	0,1006
426,56	0,1859	0,2634	0,0775	719,11	0,2549	0,3603	0,1054
430,85	0,1966	0,2673	0,0707	723,78	0,2579	0,3608	0,1029
435,14	0,2007	0,2703	0,0696	728,45	0,2606	0,3610	0,1004
439,58	0,2084	0,2732	0,0648	733,12	0,2734	0,3614	0,0880
444,05	0,2117	0,2766	0,0649	737,79	0,2722	0,3614	0,0892
448,53	0,2172	0,2796	0,0624	742,46	0,2803	0,3614	0,0811
453,01	0,2178	0,2813	0,0635	747,12	0,2796	0,3611	0,0815
457,48	0,2219	0,2826	0,0607	751,82	0,2820	0,3607	0,0787
461,96	0,2215	0,2835	0,0620	756,58	0,2643	0,3602	0,0959
466,44	0,2227	0,2844	0,0617	761,35	0,2748	0,3606	0,0858
470,91	0,2261	0,2852	0,0591	766,11	0,2818	0,3593	0,0775
475,39	0,2234	0,2858	0,0624	770,87	0,2795	0,3584	0,0789
479,86	0,2257	0,2867	0,0610	775,64	0,2781	0,3577	0,0796
484,34	0,2202	0,2878	0,0676	780,40	0,2795	0,3571	0,0776
488,82	0,2249	0,2890	0,0641	785,16	0,2799	0,3563	0,0764
493,29	0,2236	0,2904	0,0668	789,92	0,2789	0,3554	0,0765
497,77	0,2233	0,2927	0,0694	794,69	0,2790	0,3547	0,0757
502,24	0,2237	0,2950	0,0713	799,45	0,2741	0,3540	0,0799
506,72	0,2275	0,2984	0,0709	804,21	0,2788	0,3533	0,0745
511,20	0,2295	0,3016	0,0721	808,98	0,2748	0,3525	0,0777
515,67	0,2319	0,3060	0,0741	813,74	0,2600	0,3513	0,0913
520,15	0,2399	0,3101	0,0702	818,50	0,2656	0,3507	0,0851
524,62	0,2410	0,3156	0,0746	823,27	0,2705	0,3500	0,0795
529,10	0,2397	0,3204	0,0807	828,03	0,2688	0,3494	0,0806
533,58	0,2321	0,3264	0,0943	832,78	0,2722	0,3488	0,0766
538,05	0,2361	0,3312	0,0951	837,53	0,2815	0,3482	0,0667
542,53	0,2446	0,3370	0,0924	842,29	0,2771	0,3477	0,0706
547,05	0,2454	0,3412	0,0958	847,04	0,2839	0,3471	0,0632
551,69	0,2505	0,3460	0,0955	851,79	0,2824	0,3464	0,0640
556,34	0,2546	0,3493	0,0947	856,55	0,2820	0,3458	0,0638
560,98	0,2659	0,3529	0,0870	861,30	0,2827	0,3453	0,0626
565,63	0,2684	0,3554	0,0870	866,05	0,2866	0,3446	0,0580
570,28	0,2680	0,3580	0,0900	870,81	0,2831	0,3440	0,0609
574,93	0,2636	0,3603	0,0967	875,56	0,2837	0,3434	0,0597
579,58	0,2630	0,3622	0,0992	880,32	0,2808	0,3429	0,0621
584,22	0,2615	0,3633	0,1018	885,07	0,2842	0,3424	0,0582
588,87	0,2538	0,3640	0,1102	889,82	0,2799	0,3419	0,0620
593,52	0,2527	0,3647	0,1120	894,58	0,2724	0,3410	0,0686
598,17	0,2544	0,3650	0,1106	899,33	0,2574	0,3406	0,0832
602,82	0,2547	0,3651	0,1104	904,08	0,2801	0,3401	0,0600
607,46	0,2555	0,3648	0,1093	908,84	0,2635	0,3395	0,0760
612,11	0,2552	0,3642	0,1090	913,60	0,2661	0,3391	0,0730
616,76	0,2552	0,3636	0,1084	918,37	0,2662	0,3389	0,0727
621,41	0,2547	0,3630	0,1083	923,14	0,2800	0,3386	0,0586
626,06	0,2517	0,3627	0,1110	927,91	0,2443	0,3375	0,0932
630,70	0,2497	0,3626	0,1129	932,68	0,2164	0,3367	0,1203
635,35	0,2502	0,3624	0,1122	937,45	0,2514	0,3368	0,0854
640,00	0,2457	0,3619	0,1162	942,22	0,2316	0,3364	0,1048
644,65	0,2431	0,3611	0,1180	946,99	0,2475	0,3362	0,0887
649,29	0,2400	0,3605	0,1205	951,76	0,2434	0,3360	0,0926
653,94	0,2381	0,3600	0,1219	956,53	0,2398	0,3358	0,0960
658,59	0,2409	0,3596	0,1187	961,30	0,2508	0,3359	0,0851
663,24	0,2358	0,3592	0,1234	966,07	0,1969	0,3358	0,1389
667,89	0,2355	0,3587	0,1232	970,84	0,2032	0,3356	0,1324
672,53	0,2388	0,3583	0,1195	975,61	0,2452	0,3354	0,0902
677,18	0,2391	0,3581	0,1190	980,38	0,2617	0,3353	0,0736
681,83	0,2399	0,3579	0,1180	985,15	0,3023	0,3351	0,0328
686,48	0,2346	0,3578	0,1232	989,92	0,3067	0,3346	0,0279
						∅	0,0865

NEXTEL GREY (25 %)

λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$	λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$
400,83	0,0796	0,1367	0,0571	691,13	0,1974	0,2527	0,0571
405,11	0,1021	0,1660	0,0639	695,77	0,2004	0,2525	0,0639
409,40	0,1208	0,1870	0,0662	700,44	0,2019	0,2524	0,0662
413,69	0,1334	0,2032	0,0698	705,11	0,2054	0,2524	0,0698
417,98	0,1501	0,2097	0,0596	709,78	0,2063	0,2524	0,0596
422,27	0,1618	0,2134	0,0516	714,44	0,2026	0,2522	0,0516
426,56	0,1738	0,2156	0,0418	719,11	0,2017	0,2514	0,0418
430,85	0,1772	0,2175	0,0403	723,78	0,2026	0,2513	0,0403
435,14	0,1828	0,2187	0,0359	728,45	0,2022	0,2511	0,0359
439,58	0,1825	0,2196	0,0371	733,12	0,2097	0,2510	0,0371
444,05	0,1910	0,2207	0,0297	737,79	0,2129	0,2507	0,0297
448,53	0,1926	0,2217	0,0291	742,46	0,2140	0,2504	0,0291
453,01	0,1946	0,2224	0,0278	747,12	0,2151	0,2499	0,0278
457,48	0,1950	0,2232	0,0282	751,82	0,2168	0,2493	0,0282
461,96	0,1950	0,2241	0,0291	756,58	0,2031	0,2487	0,0291
466,44	0,1954	0,2253	0,0299	761,35	0,2126	0,2485	0,0299
470,91	0,2006	0,2267	0,0261	766,11	0,2201	0,2475	0,0261
475,39	0,1997	0,2280	0,0283	770,87	0,2134	0,2467	0,0283
479,86	0,2021	0,2299	0,0278	775,64	0,2143	0,2460	0,0278
484,34	0,1999	0,2321	0,0322	780,40	0,2137	0,2454	0,0322
488,82	0,2033	0,2341	0,0308	785,16	0,2123	0,2446	0,0308
493,29	0,2044	0,2362	0,0318	789,92	0,2098	0,2439	0,0318
497,77	0,2022	0,2387	0,0365	794,69	0,2131	0,2432	0,0365
502,24	0,2041	0,2407	0,0366	799,45	0,2093	0,2426	0,0366
506,72	0,2066	0,2428	0,0362	804,21	0,2112	0,2420	0,0362
511,20	0,2086	0,2441	0,0355	808,98	0,2081	0,2413	0,0355
515,67	0,2075	0,2453	0,0378	813,74	0,1981	0,2403	0,0378
520,15	0,2123	0,2461	0,0338	818,50	0,2029	0,2398	0,0338
524,62	0,2092	0,2466	0,0374	823,27	0,2026	0,2393	0,0374
529,10	0,2123	0,2468	0,0345	828,03	0,2064	0,2388	0,0345
533,58	0,2081	0,2468	0,0387	832,78	0,2073	0,2383	0,0387
538,05	0,2079	0,2468	0,0389	837,53	0,2083	0,2379	0,0389
542,53	0,2097	0,2466	0,0369	842,29	0,2136	0,2376	0,0369
547,05	0,2085	0,2465	0,0380	847,04	0,2097	0,2371	0,0380
551,69	0,2091	0,2464	0,0373	851,79	0,2102	0,2367	0,0373
556,34	0,2100	0,2464	0,0364	856,55	0,2163	0,2362	0,0364
560,98	0,2105	0,2465	0,0360	861,30	0,2112	0,2359	0,0360
565,63	0,2094	0,2467	0,0373	866,05	0,2171	0,2354	0,0373
570,28	0,2088	0,2473	0,0385	870,81	0,2155	0,2350	0,0385
574,93	0,2057	0,2482	0,0425	875,56	0,2128	0,2346	0,0425
579,58	0,2062	0,2494	0,0432	880,32	0,2127	0,2343	0,0432
584,22	0,2045	0,2504	0,0459	885,07	0,2151	0,2340	0,0459
588,87	0,1991	0,2516	0,0525	889,82	0,2104	0,2336	0,0525
593,52	0,1993	0,2529	0,0536	894,58	0,1977	0,2330	0,0536
598,17	0,2014	0,2539	0,0525	899,33	0,1931	0,2327	0,0525
602,82	0,2015	0,2548	0,0533	904,08	0,2124	0,2324	0,0533
607,46	0,2035	0,2552	0,0517	908,84	0,2004	0,2320	0,0517
612,11	0,2030	0,2554	0,0524	913,60	0,2043	0,2316	0,0524
616,76	0,2031	0,2554	0,0523	918,37	0,2099	0,2315	0,0523
621,41	0,2020	0,2554	0,0534	923,14	0,2088	0,2314	0,0534
626,06	0,2008	0,2555	0,0547	927,91	0,1836	0,2307	0,0547
630,70	0,2013	0,2557	0,0544	932,68	0,1675	0,2297	0,0544
635,35	0,2019	0,2557	0,0538	937,45	0,2128	0,2298	0,0538
640,00	0,1994	0,2555	0,0561	942,22	0,1841	0,2296	0,0561
644,65	0,1959	0,2552	0,0593	946,99	0,1879	0,2295	0,0593
649,29	0,1953	0,2548	0,0595	951,76	0,1963	0,2294	0,0595
653,94	0,1938	0,2545	0,0607	956,53	0,1825	0,2295	0,0607
658,59	0,1961	0,2543	0,0582	961,30	0,1758	0,2295	0,0582
663,24	0,1935	0,2541	0,0606	966,07	0,1799	0,2298	0,0606
667,89	0,1939	0,2538	0,0599	970,84	0,1988	0,2295	0,0599
672,53	0,1933	0,2535	0,0602	975,61	0,2257	0,2294	0,0602
677,18	0,1949	0,2533	0,0584	980,38	0,2349	0,2293	0,0584
681,83	0,1971	0,2530	0,0559	985,15	0,2415	0,2291	0,0559
686,48	0,1935	0,2528	0,0593	989,92	0,2471	0,2287	0,0593
						∅	0,0392

NEXTEL BLACK (8 %)

λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$	λ [nm]	AISA/FODIS (R _A)	FieldSpec (R _F)	$\sqrt{(R_A - R_F)^2}$
400,83	0,0428	0,0524	0,0096	691,13	0,0597	0,0576	0,0020
405,11	0,0473	0,0563	0,0090	695,77	0,0647	0,0576	0,0072
409,40	0,0482	0,0585	0,0103	700,44	0,0698	0,0575	0,0123
413,69	0,0498	0,0597	0,0100	705,11	0,0749	0,0575	0,0174
417,98	0,0555	0,0599	0,0044	709,78	0,0813	0,0575	0,0238
422,27	0,0579	0,0598	0,0019	714,44	0,0827	0,0574	0,0253
426,56	0,0607	0,0595	0,0012	719,11	0,0876	0,0572	0,0304
430,85	0,0596	0,0591	0,0005	723,78	0,0909	0,0572	0,0337
435,14	0,0626	0,0588	0,0038	728,45	0,0962	0,0572	0,0390
439,58	0,0615	0,0585	0,0030	733,12	0,1030	0,0571	0,0459
444,05	0,0602	0,0582	0,0020	737,79	0,1075	0,0571	0,0504
448,53	0,0609	0,0580	0,0029	742,46	0,1099	0,0571	0,0528
453,01	0,0607	0,0578	0,0028	747,12	0,1125	0,0570	0,0555
457,48	0,0617	0,0577	0,0040	751,82	0,1132	0,0568	0,0564
461,96	0,0607	0,0576	0,0032	756,58	0,1101	0,0567	0,0534
466,44	0,0605	0,0575	0,0030	761,35	0,1166	0,0565	0,0601
470,91	0,0609	0,0574	0,0034	766,11	0,1206	0,0563	0,0643
475,39	0,0607	0,0574	0,0033	770,87	0,1194	0,0562	0,0632
479,86	0,0608	0,0575	0,0033	775,64	0,1193	0,0560	0,0633
484,34	0,0594	0,0576	0,0018	780,40	0,1211	0,0558	0,0653
488,82	0,0602	0,0578	0,0024	785,16	0,1213	0,0556	0,0657
493,29	0,0604	0,0580	0,0023	789,92	0,1203	0,0554	0,0649
497,77	0,0599	0,0583	0,0016	794,69	0,1222	0,0552	0,0670
502,24	0,0603	0,0585	0,0019	799,45	0,1218	0,0550	0,0668
506,72	0,0606	0,0587	0,0020	804,21	0,1240	0,0548	0,0692
511,20	0,0607	0,0588	0,0018	808,98	0,1224	0,0547	0,0677
515,67	0,0614	0,0591	0,0023	813,74	0,1175	0,0544	0,0631
520,15	0,0625	0,0593	0,0032	818,50	0,1230	0,0542	0,0688
524,62	0,0631	0,0595	0,0036	823,27	0,1248	0,0540	0,0707
529,10	0,0642	0,0595	0,0046	828,03	0,1239	0,0539	0,0700
533,58	0,0637	0,0595	0,0042	832,78	0,1271	0,0538	0,0734
538,05	0,0635	0,0594	0,0041	837,53	0,1280	0,0536	0,0744
542,53	0,0635	0,0592	0,0044	842,29	0,1328	0,0535	0,0793
547,05	0,0644	0,0589	0,0055	847,04	0,1324	0,0534	0,0790
551,69	0,0640	0,0586	0,0054	851,79	0,1328	0,0533	0,0795
556,34	0,0647	0,0583	0,0063	856,55	0,1330	0,0532	0,0799
560,98	0,0647	0,0580	0,0067	861,30	0,1337	0,0531	0,0806
565,63	0,0641	0,0578	0,0063	866,05	0,1371	0,0529	0,0842
570,28	0,0634	0,0577	0,0058	870,81	0,1327	0,0528	0,0799
574,93	0,0622	0,0576	0,0046	875,56	0,1331	0,0526	0,0805
579,58	0,0610	0,0576	0,0034	880,32	0,1345	0,0526	0,0820
584,22	0,0603	0,0577	0,0026	885,07	0,1341	0,0524	0,0817
588,87	0,0591	0,0577	0,0013	889,82	0,1350	0,0523	0,0827
593,52	0,0591	0,0579	0,0012	894,58	0,1318	0,0521	0,0797
598,17	0,0590	0,0580	0,0010	899,33	0,1314	0,0521	0,0793
602,82	0,0595	0,0581	0,0014	904,08	0,1341	0,0519	0,0822
607,46	0,0592	0,0582	0,0010	908,84	0,1317	0,0518	0,0799
612,11	0,0595	0,0582	0,0013	913,60	0,1323	0,0517	0,0806
616,76	0,0597	0,0582	0,0016	918,37	0,1367	0,0517	0,0850
621,41	0,0589	0,0581	0,0008	923,14	0,1357	0,0516	0,0841
626,06	0,0586	0,0581	0,0005	927,91	0,1254	0,0513	0,0740
630,70	0,0583	0,0581	0,0002	932,68	0,1237	0,0508	0,0729
635,35	0,0590	0,0581	0,0009	937,45	0,1379	0,0510	0,0869
640,00	0,0578	0,0580	0,0002	942,22	0,1321	0,0509	0,0812
644,65	0,0568	0,0580	0,0012	946,99	0,1296	0,0509	0,0787
649,29	0,0556	0,0579	0,0023	951,76	0,1374	0,0509	0,0865
653,94	0,0554	0,0579	0,0025	956,53	0,1294	0,0508	0,0786
658,59	0,0565	0,0579	0,0014	961,30	0,1386	0,0508	0,0877
663,24	0,0552	0,0579	0,0027	966,07	0,1963	0,0508	0,1454
667,89	0,0546	0,0579	0,0033	970,84	0,1858	0,0507	0,1351
672,53	0,0557	0,0578	0,0021	975,61	0,1676	0,0506	0,1170
677,18	0,0551	0,0578	0,0026	980,38	0,1726	0,0505	0,1221
681,83	0,0556	0,0577	0,0021	985,15	0,1867	0,0504	0,1364
686,48	0,0574	0,0577	0,0003	989,92	0,1702	0,0503	0,1702
						∅	0,0373

PŘÍLOHA 6: ZHODNOCENÍ GEOMETRICKÉ KOREKCE

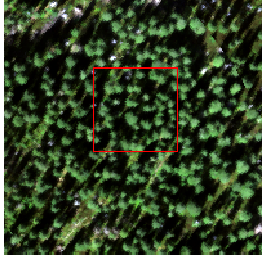
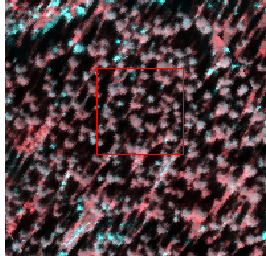
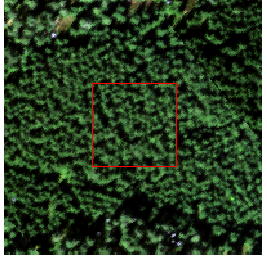
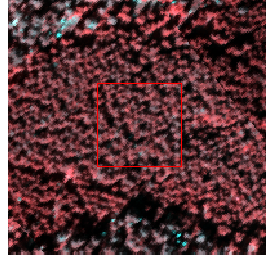
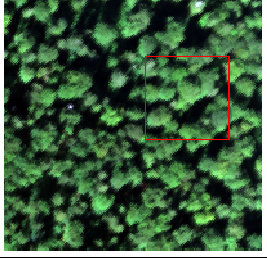
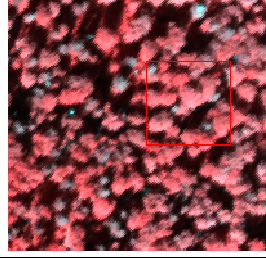

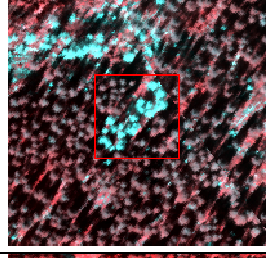

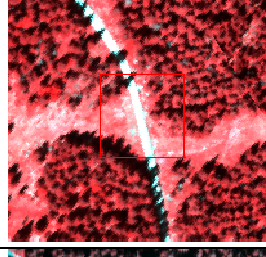

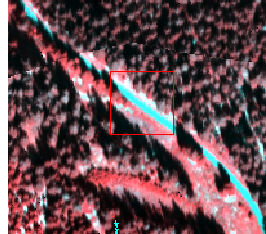
AISA EAGLE 2.8. 2009


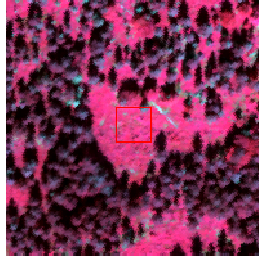
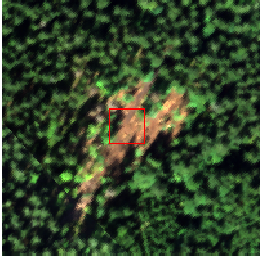
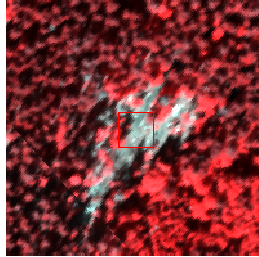
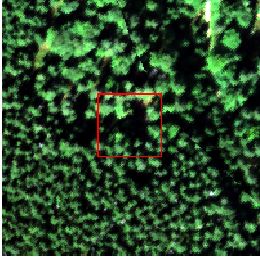
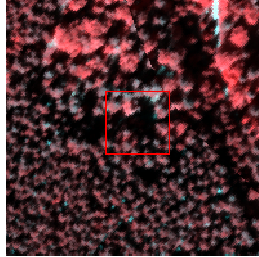
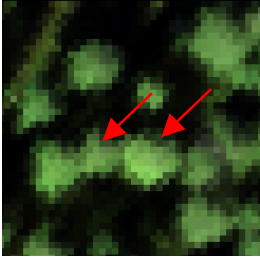
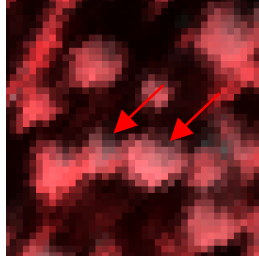
ID bodu	Y _{GPS}	Y _{AISA}	ΔY^2	$\sqrt{\Delta Y^2}$	X _{GPS}	X _{AISA}	ΔX^2	$\sqrt{\Delta X^2}$
HADR1001	387069,860	387070,326	0,217	0,466	5426410,381	5426410,262	0,014	0,119
HADR1002	387067,709	387068,042	0,111	0,333	5426412,540	5426412,474	0,004	0,066
HADR1003	387069,574	387069,969	0,156	0,395	5426414,610	5426414,580	0,001	0,030
HADR1004	387071,866	387072,325	0,211	0,459	5426412,708	5426412,439	0,072	0,269
HADR2002	388947,520	388948,200	0,462	0,680	5425388,076	5425387,908	0,028	0,168
HADR2003	388953,629	388953,673	0,002	0,044	5425387,336	5425387,163	0,030	0,173
HADR2004	388953,314	388953,413	0,010	0,099	5425384,262	5425384,519	0,066	0,257
HAR2001	388947,336	388947,753	0,174	0,417	5425384,990	5425385,078	0,008	0,088
KOLO001	386046,126	386045,921	0,042	0,205	5427155,677	5427155,839	0,026	0,162
KOLO2	387993,461	387994,329	0,753	0,868	5425393,493	5425392,501	0,984	0,992
KRYT1001	388940,065	388940,464	0,159	0,399	5425383,680	5425383,573	0,011	0,107
KRYT1002	388938,808	388939,054	0,061	0,246	5425383,807	5425383,796	0,000	0,011
KRYT1003	388938,927	388939,265	0,114	0,338	5425384,765	5425384,784	0,000	0,019
KRYT1004	388940,182	388940,629	0,200	0,447	5425384,601	5425384,537	0,004	0,064
KRYT2001	388939,797	388939,923	0,016	0,126	5425381,568	5425381,469	0,010	0,099
KRYT2002	388938,509	388938,677	0,028	0,168	5425381,775	5425381,857	0,007	0,082
KRYT2003	388938,630	388938,995	0,133	0,365	5425382,654	5425382,844	0,036	0,190
KRYT2004	388939,860	388940,182	0,104	0,322	5425382,525	5425382,433	0,008	0,092
LINO1001	385686,859	385685,417	2,079	1,442	5427072,918	5427073,074	0,024	0,156
LINO1002	385687,066	385685,832	1,523	1,234	5427073,604	5427073,812	0,043	0,208
LINO1003	385687,790	385686,639	1,325	1,151	5427073,498	5427073,327	0,029	0,171
LINO1004	385687,612	385686,178	2,056	1,434	5427072,739	5427072,590	0,022	0,149
PANEL1001	385175,785	385175,825	0,002	0,040	5427059,786	5427059,378	0,166	0,408
PANEL1002	385176,013	385176,433	0,176	0,420	5427057,782	5427058,066	0,081	0,284
PANEL1003	385174,008	385174,913	0,819	0,905	5427057,567	5427057,410	0,025	0,157
PANEL1004	385173,791	385174,369	0,334	0,578	5427059,552	5427058,786	0,587	0,766
PANEL2001	385172,603	385172,961	0,128	0,358	5427059,445	5427058,914	0,282	0,531
PANEL2002	385172,859	385173,377	0,268	0,518	5427057,437	5427057,490	0,003	0,053
PANEL2003	385170,845	385171,889	1,090	1,044	5427057,155	5427057,010	0,021	0,145
PANEL2004	385170,594	385171,473	0,773	0,879	5427059,129	5427058,482	0,419	0,647
PANEL3001	385169,465	385169,665	0,040	0,200	5427058,933	5427058,786	0,022	0,147
PANEL3002	385169,762	385170,449	0,472	0,687	5427056,953	5427057,154	0,040	0,201
PANEL3003	385167,773	385168,833	1,124	1,060	5427056,688	5427056,338	0,122	0,350
PANEL3004	385167,489	385168,001	0,262	0,512	5427058,638	5427057,970	0,446	0,668
PANEL4001	385166,381	385166,393	0,000	0,012	5427058,442	5427058,206	0,056	0,236
PANEL4002	385166,688	385167,404	0,513	0,716	5427056,476	5427056,443	0,001	0,033
PANEL4003	385164,713	385165,617	0,817	0,904	5427056,162	5427055,808	0,125	0,354
PANEL4004	385164,392	385165,029	0,406	0,637	5427058,159	5427057,807	0,124	0,352
PLAST1001	385532,012	385531,834	0,032	0,178	5427107,074	5427106,604	0,221	0,470
PLAST1002	385530,857	385530,958	0,010	0,101	5427107,386	5427107,295	0,008	0,091
PLAST1003	385531,183	385531,719	0,287	0,536	5427108,583	5427108,310	0,075	0,273
PLAST1004	385532,343	385532,619	0,076	0,276	5427108,236	5427107,664	0,327	0,572
PLAST2001	386373,413	386373,584	0,029	0,171	5426992,969	5426993,600	0,398	0,631
PLAST2002	386372,164	386373,377	1,471	1,213	5426992,943	5426993,622	0,461	0,679
PLAST2003	386372,152	386372,377	0,051	0,225	5426994,121	5426994,786	0,442	0,665
PLAST2004	386373,368	386373,562	0,038	0,194	5426994,165	5426994,808	0,413	0,643
STUDNA001	388965,495	388966,147	0,425	0,652	5425387,367	5425386,865	0,252	0,502
		RMSE_y	0,645			RMSE_x	0,373	

AISA DUAL 1.9. 2009

ID bodu	Y _{GPS}	Y _{AISA}	ΔY^2	$\sqrt{\Delta Y^2}$	X _{GPS}	X _{AISA}	ΔX^2	$\sqrt{\Delta X^2}$
HAJENKA1	385214,6	385214,2	0,1697	0,4120	5427113	5427112	2,1963	1,4820
HAJENKA2	385223,0	385221,8	1,4137	1,1890	5427106	5427105	0,2500	0,5000
HAJENKA3	385209,6	385209,8	0,0316	0,1780	5427089	5427090	0,2798	0,5290
HAJENKA4	385201,2	385201,9	0,5700	0,7550	5427097	5427098	2,8628	1,6920
BILA_PLACHTA	385686,5	385688,3	3,3518	1,8073	5427080	5427082	3,9616	1,9685
CERNA_PLACHTA	385687,4	385688,9	3,0223	1,5118	5427088	5427090	2,9373	1,6472
SEDA_PLACHTA	385683,8	385685,3	2,5837	1,5608	5427096	5427097	1,3527	1,1310
KRIZOVATKA1	385521,1	385521,2	0,0075	0,0870	5427107	5427106	1,1004	1,0490
KRIZOVATKA2	385527,1	385526,2	0,7638	0,8740	5427107	5427106	0,3745	0,6120
KRIZOVATKA3	385529,2	385527,3	3,6979	1,9230	5427111	5427111	0,0077	0,0880
KRIZOVATKA4	385526,7	385524,2	6,4211	2,5340	5427119	5427118	1,7187	1,3110
KRIZOVATKA5	385530,5	385528,5	3,6979	1,9230	5427124	5427122	1,2904	1,1360
KRIZOVATKA6	385537,4	385535,6	3,0555	1,7480	5427114	5427112	3,6979	1,9230
KRIZOVATKA7	385547,4	385545,8	2,4743	1,5730	5427106	5427104	5,1665	2,2730
KRIZOVATKA8	385562,7	385562,2	0,2745	0,5240	5427100	5427098	4,0401	2,0100
KRIZOVATKA9	385563,3	385562,9	0,1576	0,3970	5427096	5427094	7,1877	2,6810
KRIZOVATKA10	385549,7	385549,2	0,2088	0,4570	5427097	5427095	3,9204	1,9800
KRIZOVATKA11	385525,9	385525,5	0,1482	0,3850	5427101	5427098	8,9221	2,9870
KRIZOVATKA12	385518,7	385517,7	0,9781	0,9890	5427102	5427100	4,3597	2,0880
BOD1	385706,6	385708,4	3,6269	1,7778	5427058	5427060	2,5500	1,5925
BOD3	386167,5	386168,2	0,4555	0,6498	5426972	5426972	0,1171	0,3015
BOD7	387045,6	387046,1	0,3410	0,4520	5426436	5426435	1,8019	1,3220
HRANA2002	389018,1	389015,2	7,8568	2,8030	5424996	5424995	0,8226	0,9070
HRANA2001	389017,7	389019,2	2,2022	1,4840	5424989	5424988	0,9781	0,9890
BREZNIK2004	389009,3	389008,9	0,1376	0,3710	5424972	5424974	3,7908	1,9470
BREZNIK2005	389009,6	389009,3	0,0610	0,2470	5424967	5424969	1,7397	1,3190
BREZNIK2003	389019,0	389018,5	0,2450	0,4950	5424974	5424975	1,3317	1,1540
BREZNIK2007	389033,7	389032,6	1,1470	1,0710	5424971	5424973	1,3340	1,1550
		RMSE_Y	1,0382			RMSE_X	1,1919	

PŘÍLOHA 7: LEGENDA KLASIFIKACE OBRAZOVÝCH DAT

třída	příklad true RGB (28-18-8)	příklad CIR (46-33-20)
staré smrky		
mladé smrky		
listnaté stromy		
holé (mrtvé) stromy		
cesty (štěrk)		
asfalt		

podklad – zelený		
podklad – hnědý		
stíny		
zastíněné smrkové koruny		

PŘÍLOHA 8: POZEMNÍ PODPŮRNÁ KAMPAŇ



obr. 1: hájovna Březník



obr.2: odběry vzorků smrkových jehlic



obr.3: kalibrační panely NEXTEL



obr. 4: proměření reflektance kalibrační plochy pomocí pozemního spektrometru ASD FieldSpec-3 (vlevo)
obr. 5: Microtops Sunphotometer II (vpravo)