

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2013

TOMÁŠ PELC

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ
KATEDR GEOINFORMATIKY A ÚZEMNÍHO
PLÁNOVÁNÍ

**KVANTITATIVNÍ ODHAD VEGETACE POMOCÍ
METOD OBRAZOVÉ SPEKTROSKOPIE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Ing. Petra Šímová, PhD.
Diplomant: Bc. Tomáš Pelc

2013

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra aplikované geoinformatiky a územního
plánování

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pelc Tomáš

Aplikovaná ekologie

Název práce

Odhad kvantitativních parametrů vegetace pomocí metod obrazové spektroskopie

Anglický název

Estimation of quantitative parameters of vegetation using imaging spectroscopy methods

Cíle práce

Práce bude s využitím leteckých hyperspektrálních dat vysokého prostorového rozlišení hodnotit vitalitu bukových porostů na vybrané modelové lokalitě v Bílých Karpatech. Cílem bude (i) Vyhodnotit stav porostů na řešeném území pomocí kvantitativních parametrů, jako je index listové plochy (LAI z angl. leaf area index) a celková koncentrace zelených fotosynteticky aktivních pigmentů (chlorofylu a +b); (ii) Přispět konkrétními hodnotami do spektrální banky pro hodnocení vitality listnatých porostů

Metodika

Práce bude řešena ve spolupráci s Ústavem pro systémovou biologii a ekologii AV ČR (ÚSBE). Hyperspektrální snímky budou pořízeny cíleným snímkováním lokality z letadla nesoucího senzor ASIA Egel s velmi vysokým rozlišením (až 0,4 m). Leteckou kampaň a základní korekci dat zajistí ÚSBE. Diplomant provede pozemní kampaň, spočívající ve vyhledání cca dvaceti stromů rozdílné vitality (vizuální zhodnocení), tak aby byla pokryta co nejširší škála vlastností. Z korun vyhledaných stromů budou ve dni leteckého snímkování odebrány vzorky větviček s listy. Ve vzorcích bude laboratorně stanoven obsah chlorofylu, určena listová plocha a zjištěny spektrální charakteristiky listů. Na základě těchto hodnot bude určeno, jaká část spektra je určující pro ten který typ stresové reakce. Na základě spektrálních vlastností vzorkovaných stromů a hyperspektrálních snímků lokality bude vyhodnocen stav modelového porostu. Ke zpracování snímků bude použit software ENVI nebo ERDAS Imagine.

Rozsah textové části

60 - 100 stran

Klíčová slova

Doporučené zdroje informací

Borengaser, M., Hungate, W.S., Watkins, R., 2008: Hyperspectral remote sensing – Principles and applications. Taylor&Francis group, LLC. U.S. 2008. ISBN 978-1-56670-654-4

Franklin E., S., 2001: Remote Sensing for Sustainable Forest Management . Lewis publishers, 2001. USA. ISBN 1-56670-394-8

Malenovsky, Z., 2006: Quantitative remote sensing of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.): Spectroscopy from needles to crowns to canopies. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands 2006. ISBN 90-8504-503-7.

Rautiainen, M., Heiskanen, J., Eklundh, L., Motus, M., Lukeš, P., Stenberg, P., 2010: Ecological applications of physically based remote sensing methods. Scandinavian Journal of Forest Research. 2010. 1-15.

ISI Web Of Knowledge

Vedoucí práce

Šímová Petra, Ing., Ph.D.

Konzultant práce

Ing. Petr Lukeš (ÚSBE AV ČR)

Ing. Petra Šímová, Ph.D.
Vedoucí katedry



N.2

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 3.3.2011

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petry Šímové Ph.D. a že jsem uvedl všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

Poděkování:

Rád bych poděkoval Centru výzkumu pro globální změny AV ČR, v.v.i., který mi umožnil na tomto tématu pracovat a podporoval mě v průběhu celé práce. Tato práce vznikla za podpory grantu Reg. č. CZ.1.05/1.1.00/02.0073 financovaného v rámci OP VaVpI z fondů EU i státního rozpočtu ČR a výzkumné infrastruktury CzeCOS/ICOS reg. č. LM2010007 a IGA (FŽP).

Abstrakt

Předložená práce se zabývá srovnáním bichomeckých (biochemical) a fyzikálních vlastností vegetace pomocí obrazové spektroskopie. Fyzikální vlastnosti byly měřeny leteckým hyperspektrálním senzorem (AISA Eagle). Biochemické vlastnosti jsou reprezentovány koncentrací chlorofylu v listech konkrétních jedinců. Zájmovou lokalitou pro snímání a sběr vzorků byl vzrostlý lesní porost s většinovým zastoupením *Fagus silvatica* L., kde má svou ekosystémovou stanici umístěno Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.. Cílem práce bylo zjistit možnosti využití spektrálního snímání pro hodnocení zdravotního stavu lesa.

V srpnu 2011 bylo provedeno letecké snímání zájmové lokality ve velmi dobrém spektrálním (10nm) i prostorovém (<0.5m) rozlišení. Bezprostředně poté následoval sběr asimilačních orgánů a zaměření polohy pomocí GPS v koruně předem vytipovaných stromů. Vzorky listů byly podrobeny analýze v N,N – Dimethylformamidu a spočítána koncentrace chlorofylu A+B v g.cm⁻² pro každého jedince.

Zpracování dat bylo provedeno převážně v programu ENVI. Na leteckém snímku byly nejprve dohledány a vyznačeny vzorkové stromy . Poté byl snímek kategorizován na osvětlené pixely a z nich byly spočítány vybrané vegetační indexy VI. Dále byly zjištěny průměrné hodnoty VI pro každý vzorkový strom, tato hodnota byla pomocí regrese vztažena na koncentraci chlorofylu A+B v listech a byla spočítána hodnota korelačního koeficientu (korelation koeficient) pro každý VI.

Nejtěsnější vztah byl $\rho=0.41$ (ND705). Na základě regrese mezi ND705 a koncentrací chlorofylu byla vytvořena chlorofylová. Ta znázorňuje odhad koncentrace chlorofylu pro každý pixel obrazu, který je klasifikován do 5 kategorií v rozpětí 10 – 60 $\mu\text{g.cm}^{-2}$.

Klíčová slova: AISA, letecké snímání, hyperspektrální data, chlorofyl A+B, vegetační indexy, chlorofylová mapa

Abstract

This study investigates the relationships between biochemical and physical vegetation properties by means of imaging spectroscopy. Physical properties were measured using an airborne hyperspectral sensor, AISA Eagle, and biochemical properties were represented by chlorophyll contents in individual trees. The research area designated for remote sensing and sample collection was located in a mature forest dominated by beech trees, where a research station of The Global Change Research Centre had been established. The objectives of this study were to investigate into possibilities of remote sensing as a tool of forest health assessment.

Airborne remote sensing of the (study) site was carried out in September 2011 in a very high spectral (10nm) and spatial (<0.5m) resolution. It was immediately followed by collection of leaf samples, taken from previously selected trees, and by measuring the locations of those sample trees. The locations were measured in the top of the trees using GPS. The leaf samples were consequently analyzed in a N,N - dimethylformaldehyde solution and a chlorophyll content A+B $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ correlation was estimated for each individual tree.

The hyperspectral imaging data were processed chiefly in the ENVI program. Firstly, the sample trees were identified and marked in the airborne image. Secondly, pre-selected vegetation indices (VI) were computed from hyperspectral data. Furthermore, it was necessary to estimate average values of these VI for each sample tree. The resulting values were related to chlorophyll A+B content leading finally to correlation coefficient estimation. The greatest accuracy appeared in VI ND₇₀₅ ($\rho=0.41$).

A map of foliar chlorophyll concentrations has been produced based on ND₇₀₅. It shows chlorophyll content estimation for each of image pixels, classified into 5 categories varying between 10 – 60 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Keywords: AISA, airborne remote sensing, hyperspectral data, Chlorophyll A+B, Chlorophyll map, vegetation indices

OBSAH

1. Úvod	- 9 -
2. Cíle práce	- 10 -
3. Rešerše	- 10 -
3.1 Teorie obrazové spektroskopie	- 10 -
3.2 Optické vlastnosti vegetace.....	- 16 -
3.3 Vegetační indexy	- 19 -
3.4 Základní přístupy zpracování dat.....	- 23 -
3.5 Způsoby snímání vegetace	- 23 -
5.3.1 Satelitní systémy	- 25 -
5.3.2 Letecké snímání	- 30 -
4. Charakteristika studijního území	- 31 -
5. Metodika	- 33 -
4.1 Letecká kampaň	- 34 -
4.2 Pozemní kampaň.....	- 34 -
4.3 Zpracování dat	- 35 -
6. Výsledky	- 38 -
7. Diskuse	- 46 -
7.1 Pozemní kampaň.....	- 46 -
7.2 Koncentrace chlorofylu.....	- 48 -
7.3 Vegetační indexy	- 48 -
7.4 Chlorofylová mapa.....	- 50 -
8. Závěr	- 51 -
9. Literatura	- 53 -
10. Přílohy	- 66 -

1. Úvod

Lesní biom má na zemi svou nezastupitelnou funkci. V poslední době si společnost začíná více než kdy jindy uvědomovat rychlost negativních změn v ekosystémech. Důvodem je zvyšující se impakt lidské činnosti, ale též zvyšující se intenzita přírodních vlivů. Pokud chceme zachovat udržitelné hospodaření, je potřeba umět tyto změny rychle detekovat a přizpůsobit jim své hospodaření. Pro detekci změn lesních ekosystémů se jako velmi efektivní metody dálkového průzkumu Země (dále jen DPZ), které jsou založené na interpretaci snímků zemského povrchu. Ty mohou být snímány různým způsobem: pomocí družic, letadel, balónů, aj. (Franklin et al. 2001). Detail, který můžeme ze snímků získat, závisí na typu a kvalitě použitého zařízení (Borengasser et al. 2008).

Výzkum vegetace pomocí obrazové spektroskopie zaznamenává v poslední dekádě značný růst (Blackburn 2007), což je dáno zejména vývojem technologií otvírajích prostor pro nový výzkum a analýzy. Tento trend by měl pokračovat i v budoucnu (Doubrava et al. 2011).

Spektrální projevy vegetace se liší nejen podle druhu vegetace, ale též v závislosti na geografické poloze nebo vegetačním období (Kodani 2002). Specifické spektrální křivky a k nim přiřazené vlastnosti se sdružují do tzv. spektrálních knihoven. Abychom dokázali určit vlastnost spektrální křivky, musíme tuto vlastnost nejprve ověřit in situ, odebráním a následnou analýzou vzorků. Výsledek analýzy je dále nutno porovnat s leteckými snímky místa, kde byly vzorky pořízeny, následně vztáhnout na širší oblast (např. porost) a tuto skutečnost znovu ověřit (Boreghasser et al. 2008, Mišurec et al. 2013).

Předložená práce se zabývá sběrem vzorků, porovnáním a následným vztažením zjištěných hodnot na celý porost. Zkoumanou vlastností je zde stres stromů, který se nejrychleji projevuje změnou chlorofylu (Chl_{A+B}) v asimilačních orgánech stromů (Treitz et Howarth 1999).

2 Cíle práce

Práce má za cíl ověřit možnost využití spektrálních snímků s vysokým spektrálním (10 nm) i obrazovým (< 0.5 m) rozlišením pro hodnocení vitality porostu buku lesního (*Fagus silvatica*) na vybrané modelové lokalitě v CHKO Bílé Karpaty.

Díličmi cíli jsou:

- shrnutí metodiky hodnocení zdravotního stavu lesních porostů pomocí metod obrazové spektroskopie: od pozemní kampaně až po interpretaci dat (mimo zpracování leteckých dat na úroveň odrazivosti)
- odhad zdravotního stavu porostů na řešeném území pomocí kvantitativních parametrů: vegetační indexy (VI z anglického vegetation indices) a celková koncentrace zelených fotosynteticky aktivních pigmentů (chlorofylu a+b)
- vytvoření chlorofylové mapy daného území

Pro řešení práce byly stanoveny tyto **hypotézy**:

I. Lesní porosty mění své spektrální vlastnosti se změnou jejich biochemických či strukturálních vlastností

II. Tyto spektrální vlastnosti je možné ve formě vhodného vegetačního indexu (např. NDVI, SIPI, REP) vztáhnout na množství Ca+b v listoví pomocí regresního vztahu

III. Takto získaný regresní vztah je aplikovatelný v rámci snímaného porostu pro všechny jedince

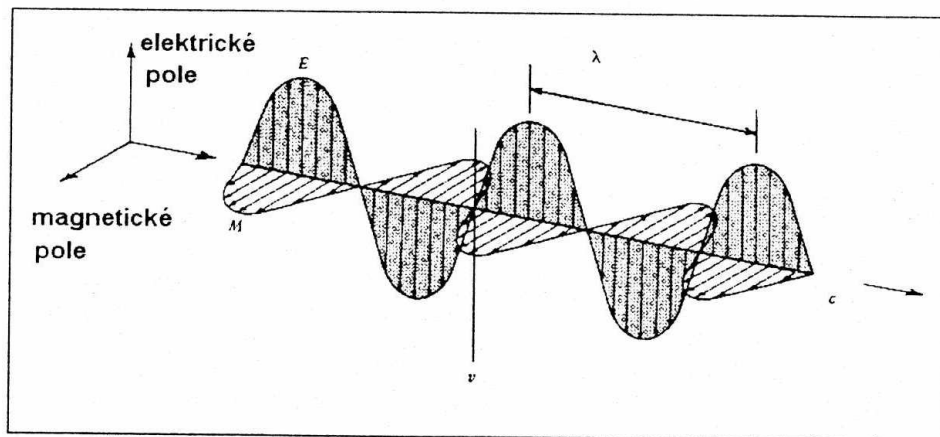
3 Rešerše

3.1 Teorie obrazové spektroskopie

Na zemský povrch dopadá elektromagnetické sluneční záření (neboli světlo), jehož základní složkou jsou fotony nebo též kvanta (Q). Existenci fotonů poprvé popsal

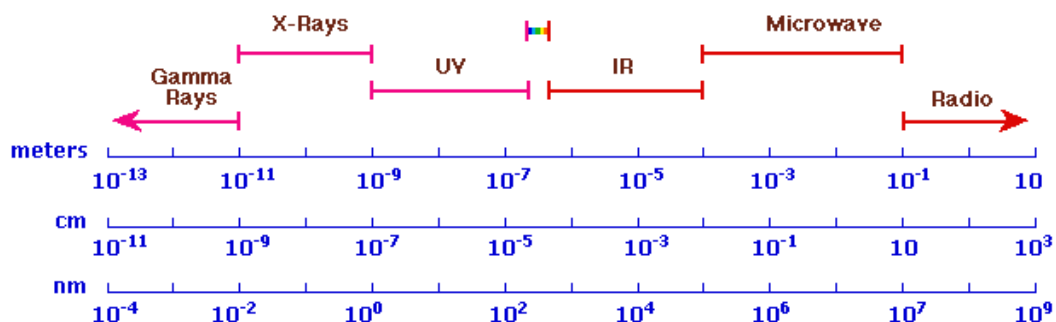
Albert Einstein v roce 1905. Elektromagnetické záření se prostorem šíří jako vlna (Obr.1). Tato vlna má dvě části, magnetickou vlnu M a elektrickou vlnu E. Pohybují se rychlostí světla, jsou navzájem kolmé a rovnoběžné ve směru šíření a odráží se od objektů, které mají vyšší teplotu, než je absolutní nula (-273. 15°C). Zdrojem vlnění může být Země nebo Slunce. Hlavními vlastnostmi záření jsou: vlnová délka (wavelength) - λ a frekvence (frequency) - ν , mezi kterými je nepřímá úměra:

$$c = \lambda \cdot \nu.$$



Obr.č. 1: Schéma elektromagnetické vlny (Dobrovolný, 1998)

Rozpětí vlnových délek elektromagnetického záření sahá od gama záření (10^{-14} m) až po dlouhovlnné radiové vlnění (10^4 m). Postupem času, vlivem nových technik a použitých snímacích zřízení, se vyvinulo 6 základních oblastí, které jsou využívány k získávání informací o zemském povrchu nebo atmosféře (obr. 2) (Dobrovolný, 1998, Borengasser et al., 2008.). Z tohoto rozpětí zaznamenává lidské oko jen zlomek, kterému říkáme viditelné spektrum a nachází se mezi 400 a 700nm (Zhao et al. 2005). V rámci viditelného spektra rozlišujeme 3 barevné gradienty s hodnotou vlnové délky v jejich středu (Nishio 2000): **R**ed (červený) 650nm, **G**reen (zelený) 560nm a **B**lue (modrý) 450nm.



Obr.č. 2: Oblasti elektromagnetického záření (Mehta, 2011)

Vědní disciplína, která se obecně zabývá vznikem, měřením a interpretací energetických spekter se nazývá spektrometrie (Němcová 1997). Snímání se provádí pomocí spektrometrů, které zaznamenávají funkci záření emitovaného, odraženého nebo rozptýleného částicí. Spektrometru se využívá zejména v analytické fyzice a chemii pro rychlé a přesné zjištění vlastností a obsahu sledovaných částic.

Hlavními parametry spektrometrů jsou spektrální rozsah (spectral range), spektrální rozlišení (spectral resolutions), spektrální šířka pásma (spectral sampling interval) a poměr signálu a šumu (Signal to Noise Ratio). Další vlastnosti senzorů jsou prostorové rozlišení (Ground Resolution), prostorový rozsah (spatial extent) a prostorový úhel (Field Of View - FOV), okamžité zorné pole (Instantaneous Field Of View - IFOV), radiometrické rozlišení (output) a časová rozlišovací schopnost (Forshaw et al. 1983, Malenovský 2006, Doubrava et al. 2011).

Spektrální rozsah je oblast mezi minimální a maximální vlnovou délkou měřitelnou senzorem (λ_{\max} - λ_{\min}). Běžné spektrální rozsahy jsou např.: viditelné spektrum (VIS: 0.4 – 0.7 μm), blížečervené spektrum (NIR: 0.7-1.0 μm) nebo středněvlnné infračervené spektrum (2.5 μm – 15 μm). V rámci dálkového průzkumu Země se s ohledem na praktické použití používají i nestandardní spektrální rozsahy: VNIR – viditelné a blízké infračervené pásmo (VNIR) s rozsahem od 0.4 do 0.9 μm , tento rozsah má např.: sensor AISA; SWIR – krátkovlnné infračervené pásmo s rozsahem od 1 do 2.5 μm . (Drake et al. 1999, Fischer et Kakoulli 2004, Doubrava et al. 2011).

Spektrální rozlišení (nm) je vzdálenost mezi vlnovými délkami sousedních pásmových propustností. Je také jedním z nejdůležitějších klasifikačních kritérií spektrometru. Rozlišení spektrometrů je dáno velikostí štěrbin, hustotou vrypů na ohybové mřížce, použitým detektorem (velikostí a počtem pixelů), použitou optikou a celkovou konstrukcí přístroje. Se spektrálním rozlišením koresponduje šířka pásmové propustnosti – FWHM (Full-Width-at-Half-Maximum), což je šířka ve vlnové délce v 50% odezvy (Dell'Endice et al. 2009, Doubrava 2011, Oupický 2013).

O spektrální šířce pásma Dell'Endice et al. (2009) uvádí, že je to vzdálenost (nm) mezi dvěma přilehlými centry vlnových délek. Podle Doubravy (2011) dodávám, že

se jedná o šířku kanálu, důležitou pro míru detailu, kterou chceme z dat zjistit. Platí zde nepřímá úměra: čím užší jsou spektrální pásy, tím vyšší míru detailu můžeme z obrazu zjistit.

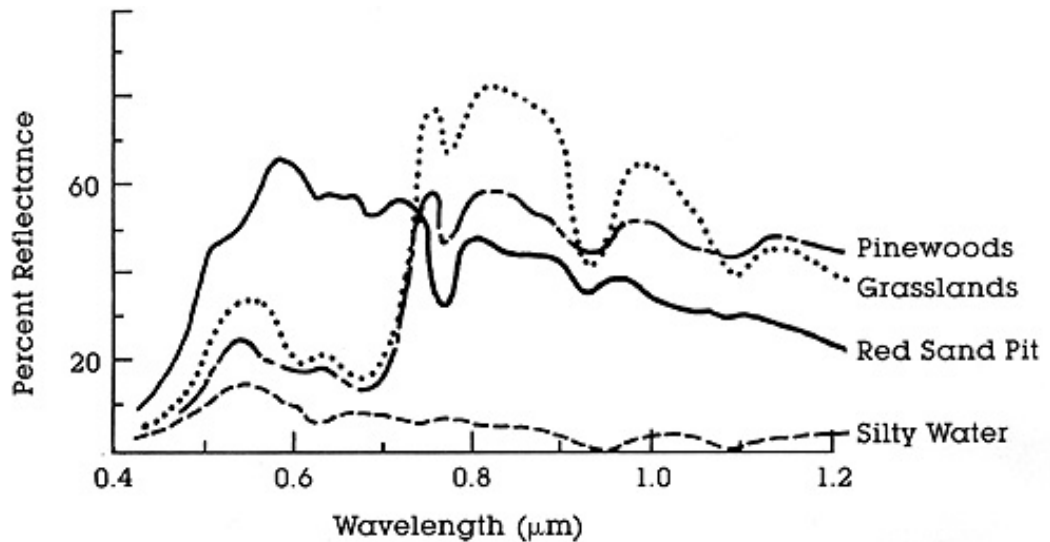
Prostorové rozlišení je délka strany (v m) jednoho pixelu promítnutého na snímaný povrch a prostorový rozsah udává, jak velké území dokáže senzor zaznamenat v jednom snímku. Tyto prostorové parametry jsou funkcí spektrálního senzoru (jeho digitální sítě) a okamžitého zorného pole (IFOV), které jsou dané výškou a rychlostí letu a optickým systémem (Forshaw et al. 1983). Navulur 2006 in Xie et al. 2007 rozlišují toto základní prostorové rozlišení: Nízké rozlišení – velikost pixelu je 30m a vyšší, střední rozlišení – velikost pixelu 2 – 30 m, vysoké rozlišení – velikost pixelu 0.5 – 2 m – a velmi vysoké rozlišení – strana pixelu menší než 0.5m. Časová rozlišovací schopnost je doba, za jakou dokáže senzor udělat snímky stejného území (Doubrava et al. 2011).

Vědní obor vytvořený spojením klasické spektroskopie s metodami dálkového průzkumu země se nazývá obrazová spektroskopie (Imagine Spectroscopy). Pomocí obrazové spektroskopie získáváme informace o různých částech zemského povrchu: horninovém podloží, půdních poměrech, vlhkosti, vlastnostech ekosystémů a jejich procesů, aj. Obrazová spektroskopie zaznamenává v posledních dvaceti letech velký nárůst zájmu, jak popisuje Schaepman et al. (2009) ve své práci, kde zkoumal mj. nárůst počtu nových citací a hledaných keywords.

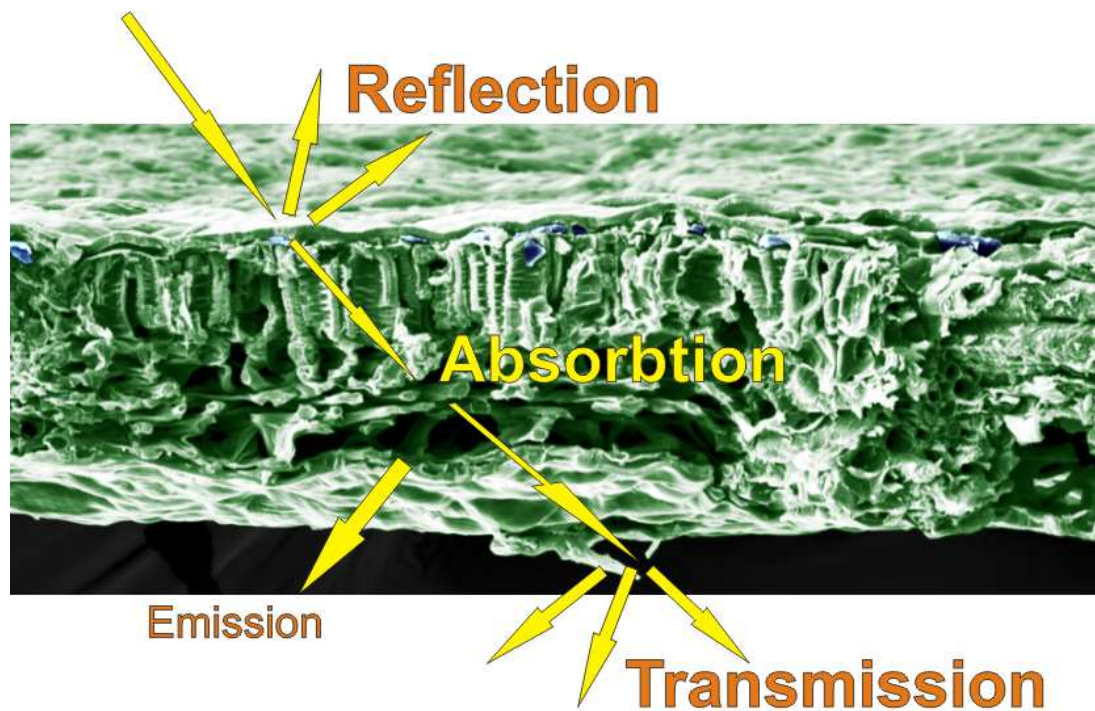
Jedním ze základních výstupů obrazové spektroskopie je spektrální křivka odrazivosti. Ta je projevem spektrálního chování objektů. Záření dopadající na zemský povrch je částečně absorbováno (Absorpce), částečně svedeno do nižších vrstev (Transmitance) a částečně odraženo (Reflectance) zpět do atmosféry (Fischer et Kakuoli 2006). Celková energetická bilance je $A+T+R=1$ (viz. obr.č. 5). Podle toho, jak bylo záření v průběhu absorpce a transmitance modifikováno (resp. pohlcováno), tak se projeví výsledná spektrální křivka odrazivosti. Jaký projev má spektrální křivka pro různé druhy povrchů, ukazuje následující obrázek. Pro každý druh povrchu má trochu jiný projev, ale je možné si všimnout, že pro vegetační povrchy má typický průběh: lokální maximum okolo 550 μm , 2 lokální minima

okolo 440 μm a 680 μm a výrazný nárůst odrazivosti v oblasti blízkého infračerveného záření.

Obr.č. 3: Příklady spektrálních reflektančních křivek různých druhů povrchů (Short 2005)



Obr.č. 4: Možnosti transformace a využití dopadajícího elektromagnetického záření na vegetaci.

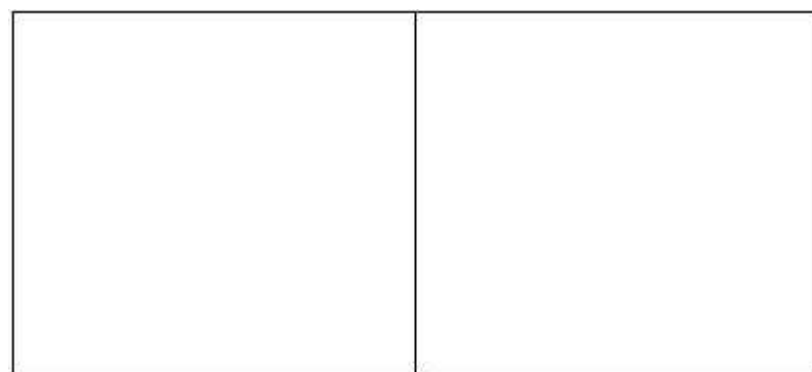


Energy conservation: $R+T+A=1$

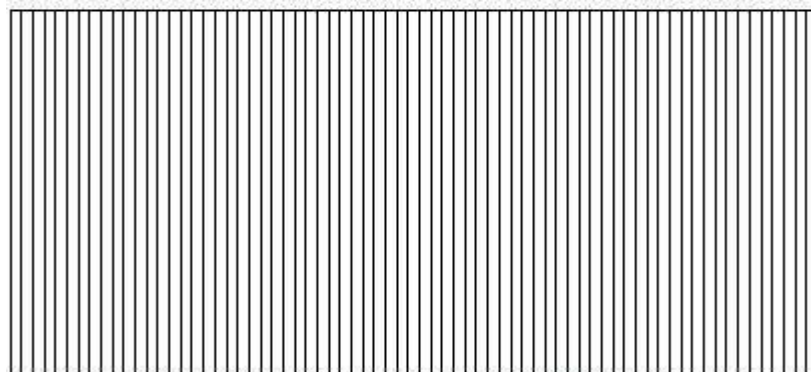
Podle detailu, počtu spektrálních pásem (resp. spektrálního rozlišení), který dokáže spektrometr zjistit, rozlišujeme multispektrální a hyperspektrální senzory (Doubrava et al., 2011). Multispektrální senzory pořizují data v několika poměrně širokých intervalech. Běžně mezi 3 a 7 spektrálními pásy se spektrálním rozlišením od 50 do 120 nebo více nm. Oproti tomu hyperspektrální senzory snímají v 10 a více, často i stovkách, spektrálních pásmech se spektrálním rozlišením od 1 do 15 nm . Z toho vyplývá, že hyperspektrální sensor má mnohem lepší spektrální rozlišení, než sensor multispektrální a tím pádem z hyperspektrálních dat dostaneme několikanásobně detailnější informaci o snímaném povrchu (Boreghasser 2008).

Obr.č. 5: Rozdíl mezi multispektrálním a hyperspektrálním snímačem. a) schematický, b) výsledná reflektanční křivka (Boreghasser 2008)

a)

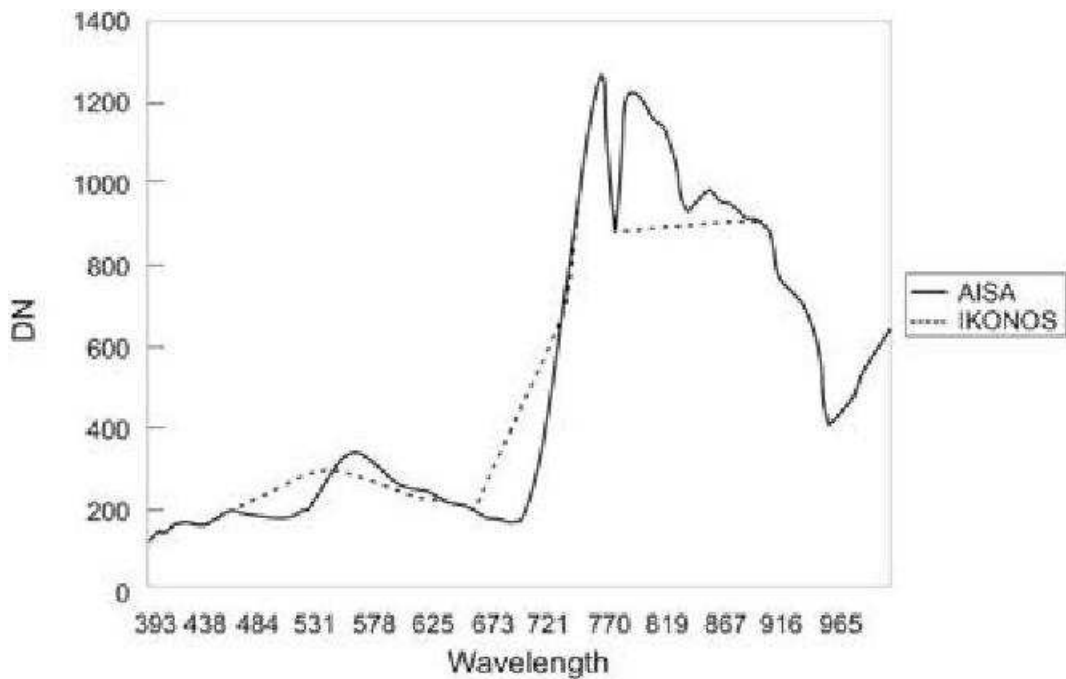


Multispectral Bandwidths
50–150 Nanometers Wide



Hyperspectral Bandwidths
1–15 Nanometers Wide

b)



Při měření povrchu Země pomocí obrazové spektroskopie je nejdůležitější veličinou odrazivost – R. Ta je dána funkcí f_R , která je definována prostorovým, spektrálním, směrovým a časovým měřítkem (Malenovský 2006).

$$R = f_R(x, y; \lambda; \Omega_v, \Omega_s; t)$$

kde x a y jsou souřadnice, λ je vlnová délka elektromagnetického spektra, Ω_v, Ω_s popisují úhel pod jakým snímají měřicí senzory a t je čas (frekvence) měření.

Při zjišťování odrazivosti na úrovni korun stromů, je výsledná křivka kombinací odrazivosti od půdy a vegetace. Záleží na externích parametrech jako osvětlení nebo struktura porostu, jakou váhu ten který snímáný povrch dostane.

3.2 Optické vlastnosti vegetace

Pro fotosyntézu jsou základními orgány rostlin listy. Ty obsahují v buňkách mezofylu chloroplasty. Mezofyl obsahuje většinou okolo 30 – 40 chloroplastů o velikosti 2 - 4 x 4 - 7 μm . Na jednom čtverečném milimetru povrchu listu se jich nalézá asi jeden milión. Chloroplasty jsou orgány, které obsahují rostlinné

pigmenty (barviva). Molekuly barviva pohlcují světelnou energii a dále ji přeměňují na energii chemickou. Právě pohlcování světelné energie využívá obrazová spektroskopie k určení zdravotního stavu vegetace (Campbell et Reece 2002, Blackburn 2007).

Přibližně 70% povrchu pevniny je pokryta vegetací (Goetz et al. 1985). Vlastnosti elektromagnetického záření (vlnové délky), které se odráží od zemského povrchu, nám určují charakter zkoumaného povrchu. Unikátní vlastnosti křivky jsou pak charakteristické pro každou jednotlivou látku (Doubrava et al. 2011). Nedestruktivní dálkové metody měření chlorofylu pomocí spektrometrie je oproti tradičním metodám levnější a méně náročné na čas (le Maire et al. 2004). Pomocí spektrometrie se dá určit nejen výskyt látky, ale i její množství (Hunt et al. 2011).

Pro zjišťování informací o vegetaci se využívá spektrální rozpětí elektromagnetického záření mezi 0.4 - 2.5 μm . To nám poskytuje informace zejména o koncentraci rostlinných pigmentů (400 - 800 nm), listové buněčné struktuře a obsahu vlhkosti v listech (Goetz et al. 1985). Stres se nejvíce projevuje na odrazivosti ve viditelné části spektra mezi 400 – 720 nm (Carter et Kanpp 2001, Zhao et al. 2005).

Rostlinný pigment chlorofyl je jednou z nejdůležitějších organických molekul na zemi, protože má nezastupitelnou funkci při biochemickém procesu fotosyntézy (Blackburn 2007). Jako jediný pigment se také dokáže přímo účastnit reakce, kdy se světelná energie převádí na energii chemickou (Campbell et Reece 2002). Uvnitř chloroplastu zachytí pigment solární radiaci a absorbuje ji do reakčního centra pigmentu, který započne proces fotosyntézy (Richardson et al. 2001). Chlorofyl pohlcuje zejména červenou a modrou část viditelného spektra. Zelená část světla je rostlinou nejméně pohlcena a nejvíce odražena, proto je většina listů zelených (Nishio 2000, Campbell et Reece 2002).

Chlorofyly (Chl_A - chlorofyl A a Chl_B - chlorofyl B) jsou nejdůležitější rostlinné pigmenty. Mají kontrolu nad množstvím solární radiance, kterou list absorbuje. Dalším důležitým pigmentem jsou karotenoidy (Cars – carotenoids), uhlovodíky mající různý odstín žluté a oranžové, které chrání reakční centrum od nadměrného

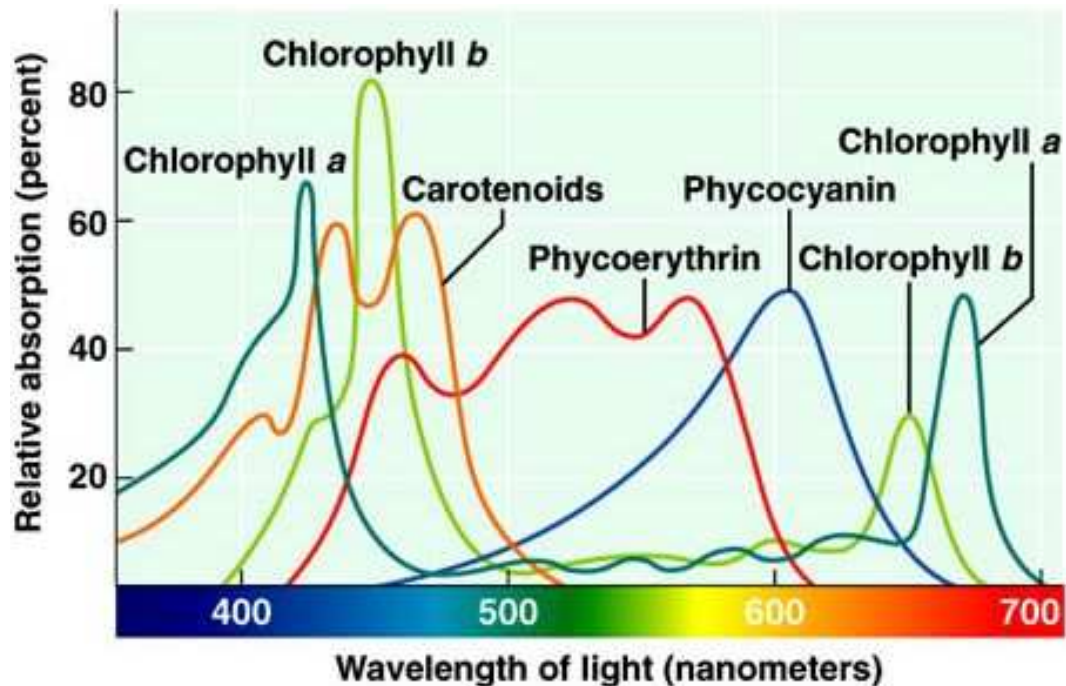
světla. Tomuto jevu říkáme fotoprotekce, vyznačuje se tím, že rozptyluje a pohlcuje přebytečné světlo. Dále karotenoidy pomáhají Chl_A při zachycování radiance. Jak Chl tak i Cars v důsledku kontrolují fotosyntetický potenciál, primární produkci rostliny (Blackburn 1998a, Campbell et Reece 2002, Blackburn 2007). Rostlinné pigmenty zachycují elektromagnetické záření v rozsahu 400 – 700 nm, toto světlo se nazývá fotosynteticky aktivní radiace (PAR – photosynthetically active radiation). PAR, která je skutečně využita pro fotosyntézu (primární produktivitu), nazýváme APAR (absorbed photosynthetically active radiation).

Vegetační pigmenty mohou být použity jako základní indikátor fyziologického stavu vegetace. Jejich odhad pomocí dálkového průzkumu Země má značný potenciál. Technicky se zaměřuje zejména na fyziologický stav vegetace (př.: stres vegetace), určení druhů a odhad produktivity (př.: měření a interpretace APAR) (Blackburn 1998a). Konkrétně odhad obsahu chlorofylu v listech poskytuje informaci o fotosyntetické aktivitě, mutacích a nutričním a stresovém stavu (Chaoyang et al. 2008).

Chlorofyly mají absorpční špičky v červené a modré části spektra. V modré části spektra je absorpční maximum kolem 440 μm a v červené části mezi 660 a 680 μm . V modré části spektra se absorpční špička chlorofylů a karotenoidů překrývá. Proto se tato část spektra pro odhad obsahu chlorofylu používá málo. Nejvíce se pro odhad obsahu chlorofylu používají oblasti kolem 550 a 700 μm . (Sims and Gamon 2002, le Maire et al. 2004). Oblast kolem 550 μm je lokální absorpční minimum a světlo je v listech nejméně pohlcováno, proto se nám jeví jako zelené (Moss and Lomis 1951).

V závislosti na obsahu chlorofylu a jiných vegetačních pigmentech se mění i vlastnosti reflektanční křivky. Pokud je tato křivka dobře kvantifikována, např. pomocí vhodného vegetačního indexu, můžeme zpětně z reflektanční křivky zjišťovat zastoupení chlorofylu, resp. vitalitu rostlin (Hanus i verb. 2012).

Obr.č.6: Absorpční maxima vybraných rostlinných pigmentů (online, 2013: <http://www.citruscollege.edu/lc/archive/biology/Pages/Chapter06-Rabitoj.aspx>)



3.3 Vegetační indexy

Peñuelas a Fiella (1998) píší, že výrazný rozdíl mezi odrazivostí půdy a vegetace v blízkce červené, červené a viditelné části spektra byl základním předpokladem pro vytvoření „reflectance spectral indices“ (spektrálních indexů odrazivosti). Poprvé byly indexy vyvinuty v 70. letech 20. století, a to pro monitoring suchozemského prostředí. Již v začátcích byly velmi úspěšné při posuzování zdravotního stavu vegetace, fenologie, pokryvnosti a procesů jako třeba evapotranspirace (ET) a primární produkce (Glenn et al. 2008).

Ve studiích, jako třeba Hall et al. (1990), Gamon et al. (1995), Sims et Gamon (2002), le Maire et al. (2004), ale i v mnoha dalších, byl využit vztah mezi biofyzikálními a biochemickými vlastnostmi vegetace, které reprezentují jejich spektrální vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou zkoumány, kvantifikovány a poté převedeny na vhodný vegetační index (dále VI). VI je jednoduchý numerický indikátor, který redukuje multi/hyperspektrální data do jedné proměnné, dále využitelné k odhadu a posuzování charakteru vegetace (Verlinder 2010).

VI je možné použít k odhadu celé řady různých ekologických charakteristik s aplikací na malé ale i velké plochy. Příkladem může být určení druhu a pestrosti ve studiích Martin et al. (1998), Gould (2000), Fairbanks et McGwire (2004) nebo Rocchini et al. (2007); určení evapotranspirace (Wiegand et Richardson 1990); zjišťování primární produkce rostlin (Xiao et al. 2004, Running et al. 2004, Xiao et al. 2005, Turner et al. 2005); nebo odhad obsahu chlorofylu v listech (Gamon et al. 1995, Balckburn 1998, Gitelson et al. 1999, Carter et Knapp 2001, Chaoyang 2008, Glenn et al. 2008, Hun et al. 2011).

Jedním z nejpoužívanějších indexů je Normal Difference Vegetation Index – NDVI (Tucker 1979), který závisí na absorpci v červené části spektra, vyvolané listovými pigmenty (zejména chlorofylem) a na silném rozptylu záření v blízkce červené části spektra, vyvolaném listy (Blackburn 1998a, Gittelson 2003, Beck et al. 2006):

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$$

Kde R_{NIR} je hodnota reflektance v blízkce červené části (700 – 900 nm) a R_{RED} je hodnota absorpce v červené části spektra (okolo 650 nm). Výsledné hodnoty indexu leží mezi -1 a 1 (Sellers 1985).

NDVI byl vyvinut pro odhad obsahu chlorofylu ve vegetaci (Sims and Gammon 2002). Je citlivý na hustotu, přítomnost a stav vegetace a přímo koreluje s PAR a primární produkcí vegetace (Hermann 2005). Po vypuštění sensoru AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer – NOAA, viz kap. 5.3) byla zahájena v roce 1979 studie, zabývající se globálním výzkumem fenologie vegetace. Aplikace využívající sensor AVHRR jsou tradičně založené na NDVI (Gitelson 2004).

NDVI je hojně používaný i přesto, že má některé nedostatky: citlivost na půdu a atmosferické jevy, osvětlení a úhel snímání. Další nevýhodou je, že má nelineární vztah s biofyzikálními vlastnostmi jako LAI (Leaf Area Index) nebo nadzemní biomasou (Gitelson 2004). Postupně byl index NDVI pozměňován tak, aby byl senzitivní k určitému typu povrchu a tím zpřesnil odhad. Příkladem mohou být

indexy: EVI (Enhanced Vegetation Index, Huete et al. 2002), MSAVI (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index) (Qi et al. 1994), ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index) (Kufman and Tanre 1992 in Hermann et al. 2005), SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) (Qi et al. 1994), WDRVI (Wide Dynamic Range Vegetation Index) (Gitelson 2004). I přes vznik nových modifikací je index NDVI univerzální a stále velmi často používaný pro hodnocení stavu vegetace. Zároveň je to index s nejdelší časovou řadou (Hermann et al. 2005, Saikia 2009).

Gitelson et Merzlyak (1993) ve své studii použili také upravený NDVI index, označovaný jako ND₇₀₅ (Sims et Gamon 2002) nebo RNDVI (Red – Edge NDVI) (ENVI 2005), který by měl být úspěšnější při hodnocení listů s vysokým obsahem Chl. V tomto indexu byla nahrazena proměnná z červené části spektra za hodnotu z okraje blízké červené části spektra:

$$ND_{705} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$$

Rozpětí indexu ND₇₀₅ je od -1 do 1, pro zelenou vegetaci se pohybuje hodnota mezi 0.2 a 0.9.

Další velmi používaný index je SR_{index}. Sims et Gamon (2002) ho popisují jako jednoduchý index rozdělující odrazivost na referenční vlnovou délku – R_{ref}, která většinou leží v rozpětí 750 - 900 nm, a index-vlnovou délku – R_{index}, jejíž hodnoty jsou mezi 660 - 720 nm. Vztah těchto dvou proměnných je následující:

$$SR_{index} = R_{ref} / R_{index}$$

Sims et Gamon (2002) dosazují 750 nm za R_{ref} a 705 nm za R_{index}. Pro kompenzaci vysoké odrazivosti od listů přidali do výpočtu konstantu z absorpčního minima chlorofylu (445 nm), a tím definovali dva nové vegetační indexy:

$$mSR_{705} = (R_{750} - R_{445}) / (R_{705} - R_{445})$$

$$mND_{705} = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2 R_{445})$$

Vogelmann Red Edge Index 1 (VOG1) byl použit ve studii zaměřené na hodnocení dopadu hmyzí kalamity postihující javor cukrový (*Acer saccharum*) ve Spojených státech v roce 1988. Vogelmann et al. (1993) zjišťoval laboratorně odrazivost různých vzorků z různých míst napadeného území. Výsledky byly konzistentní a diagnostické nejvíce na okraji červeného spektra mezi 680 - 750 μm . Tyto hodnoty zahrnul do indexu REIP (red edge inflection point), který je v programu ENVI označován jako VOG₁:

$$REIP = R_{740} / R_{720}$$

Index kombinuje citlivost ke koncentraci chlorofylu, listové ploše a obsahu vody. Výsledné hodnoty studie průkazně korelovaly s totálním obsahem chlorofylu v listech (Vogelmann et al. 1993).

Peñuelas et al. (1994) použil a testoval index NPCI (normalized pigments chlorophyll ratio index), vytvořený na základě poměru lokálních absorpčních špiček v modré (430 μm) a červené (680 μm) části spektra:

$$NPCI = (R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$$

Tento index vykazoval příznivou korelaci s koncentrací pigmentů, zejména chlorofylu, a poukazoval na fenologický a fyziologický stav vegetace.

Gitelson et al. (1999) úspěšně otestovali hypotézu, že poměr mezi odrazivostí R735 a R700 je citlivý ke koncentraci chlorofylu, a může tak být použit k odhadu koncentrace chlorofylu v listech. Studie byla testována na 2 druzích stromů: buku lesním (*Fagus silvatica* L.) a jilmu drsném (*Ulmus minor* Miller.) a jedné popínavé rostlině, loubinci trojlaločném (*Parthenocissus tricuspidata* L.). Test byl proveden laboratorně za použití spektrofluorometru (Luminiscence spectrometer LS52, Perkin

– Elmer, Germany). Výsledek byl velmi uspokojivý, korelační koeficient dosahoval hodnoty $r^2 = 0.96$.

3.4 Základní přístupy zpracování dat

V uplynulých třiceti letech byly přijaty dva přístupy pro interpretaci dat. Oba týkající se biofyzikálních a biochemických vlastností vegetace (Boyd et Danson 2005).

První přístup, obecně nazýván metoda radiativního transferu, se zabývá precizním matematickým modelováním přenosu slunečního záření přes různé objekty na zemském povrchu. Matematická simulace přispívá k pochopení vztahu mezi snímanými daty a biofyzikálními a biochemickými vlastnostmi vegetace (Boyd et Danson 2005, Malenovský et al. 2006). Modelů je celá řada, příkladem mohou být modely autorů Jacquemoud et Baret (1990) - PROSPECT (leaf optical PROPERTIES SPECTra), Rozanov et al. (1997) – GEOMETRAN nebo Verhoef (1984) – SAIL model. Metody radiativního transferu jsou oproti metodám empirického modelování složitější, zejména pro množství vnějších faktorů, které do modelu vstupují. Nevýhodou je tedy časová náročnost vývoje modelu, předností je geograficky univerzální použití.

Druhý přístup využívá jednoduchého empirického vztahu mezi spektrálními snímky, které jsou reprezentovány VI, a daty nasbíranými při pozemním měření (např. koncentrace listového pigmentu). Tento vztah je popisován pomocí statistické regrese. Empirický přístup je dobře použitelný, pokud je žádoucí rychlé vyhodnocení stavu v lokálním měřítku. Naopak je limitovaný tím, že jej není možné převést na jiný obraz, a je tak použitelný pouze lokálně. Empirický vztah dále slouží zejména k rektifikaci modelu radiativního transferu (Boyd 2005, Verrelst 2010).

3.5 Způsoby snímání vegetace

Spektrální snímání vegetace započalo v roce 1972, kdy americký Vládní úřad pro letectví a kosmonautiku (NASA) vypustil na oběžnou dráhu satelit (LANDSAT-1) nesoucí multi-spektrální skener (MSS). Následovalo vypuštění dalších satelitů, které postupně vynášejí technologicky dokonalejší spektrometry. První satelit s hyperspektrálním skenerem byl vypuštěn v roce 1999 s označením MODIS. První

použití leteckého hyperspektrálního skeneru bylo v roce 1986 (Treitz et Howarth 1999, Malenovský et al. 2009).

Spektrometry snímající zemský povrch se označují jako zobrazovací spektrometry, přesněji též stírací (push broom) senzory (Dobrovolný 2012). Snímky vegetace z dálkového průzkumu Země mohou být pořízeny letecky nebo protřednictvím satelitů. Pro terénní nebo laboratorní měření spekter se využívají stolní spektrometry (Franklin 2001).

Pro zdárné pořízení leteckých nebo satelitních snímků jsou zapotřebí ideální klimatické podmínky, zejména kombinace dobré viditelnosti s nízkou vzdušnou vlhkostí. Důležitou roli hraje i denní doba. Díky dobré iluminaci a vhodnému úhlu dopadajícího světla je nejvhodnější doba pro pořízení záznamu mezi 10:00 a 14:00 hod. V této době mají objekty minimální stíny a barevná tónová rozrůzněnost je minimální. Při leteckém snímání probíhá pro korekci dat i měření na zemi pomocí podpůrného spektrometru (př. FieldSpec). Družice má pro korekci svých dat na zemi referenční plochy a tuto korekci provádí automaticky (Borengasser et al. 2008).

Podle charakteru zkoumaného povrchu a nároků na výstupy volíme mezi třemi druhy měřítek (resp. senzorů):

- I. Snímky s nízkým prostorovým rozlišením – použijeme při výzkumu jevů, pro které stačí velikost pixelu řádově mezi stovkami a tisíci metry. Pro toto měřítko se používají družicové systémy NOAA AVHRR, SPOT Vegetation, aj. Příkladem užití může být zjišťování, zda v daném území převažují listnaté, jehličnaté nebo smíšené lesy.
- II. Snímky se středním prostorovým rozlišením – použijeme při zkoumání jevů, při kterých stačí velikost pixelu v řádu desítek metrů až metru. Zde většinou poslouží družicové systémy, např. Landsat a SPOT, ale v některých případech mohou být použity i letecké senzory. Příkladem jsou studie druhové diverzity stromů v porostu, měření velikosti korun, množství kmenů, aj.
- III. Snímky s vysokým prostorovým rozlišením – použijeme při zkoumání jevů na úrovni metru až centimetrů. Zde jsou většinou používány letecké senzory (AISA,

CASI, aj.). Takové rozlišení může být využito pro zkoumání porostu na úrovni detailu koruny, LAI, detekci vtroušených druhů, aj.

V ideálním případě by naše výstupy měly být kombinací snímků všech tří měřítek (Franklin 2001).

V této kapitole se budeme dále věnovat především satelitním systémům a leteckým senzorům. Nemůžeme však opomenout zmínit i některé typy stolních spektrometrů, např.: LI-COR (Carter et Knapp 2001, Malenovský 2006), Ocean Optics model ST-1000 (Hadoudane et al. 2002), Hitachi 150 –20 (Gitelson 2003), Single-Field-of-View IRIS (SIRIS), používaných pro zjišťování optických vlastností snímaných organických povrchů vegetace, verifikaci letecky nebo družicově pořízených dat (Blackburn 1998a).

Letecké senzory mají oproti satelitním větší rozlišovací schopnosti. Postupně však dochází vlivem technického vývoje ke konvergenci. Pro potřeby lesnického výzkumu na úrovni korun stromů mají letecké senzory svojí nezastupitelnou funkci (Franklin 2001).

5.3.1 Satelitní systémy

Mezi nejpoužívanější satelity pro snímání vegetace patří: Landsat, SPOT, NOAA-AVHRR a IKONOS. Výstupem senzorů těchto družic jsou snímky s multispektrálním rozlišením (Xie et al. 2007). Z hyperspektrálních senzorů jsou to Hyperion a CHRIS.

LANDSAT

První specializovaný civilní vesmírný program zabývající se zkoumáním vegetační složky povrchu, označovaný jako Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Programme, byl započat vypuštěním multispektrálního skeneru (MSS), s označením ERTS-1, 23. července 1972. Jeho hlavním posláním bylo monitorovat a analyzovat živou složku zemského povrchu. ERTS program byl později přejmenován na LANDSAT (Boyd, 2005; USGS 2012)

Program Landsat vyvinula NASA (National Aeronautics and Space Administration) Správu, pozemní příjem, archivaci dat a distribuci má dále v kompetenci USGS (U.S. Geological Survey). Do této doby bylo na oběžnou dráhu posláno 7 satelitů, označovaných Landsat 1 - 7. Jediná mise, Landsat 6, skončila neúspěšně, když se raketě nesoucí satelit nepodařilo dosáhnout orbitu. Momentálně jsou funkční satelity Landsat 5 a 7. Ty obíhají Zemi ve výšce 705 km každých 99 minut. Satelit zabírá pás o šířce 185 km v severo-jížním směru. Každý satelit zaznamenává každý bod na Zemi v přibližně stejném čase každých 16 dní (USGS 2012).

První tři satelity nesly multispektrální skener (označovaný MSS) s prostorovým rozlišením okolo 80 m, ve 4 spektrálních pásmech od zelené k blízké červené vlnové délce. Při vývoji následujícího satelitu Landsat 4 (později použito i u Landsat 5) došlo k rozšíření o krátkovlnné infračervené spektrum (SWIR) a termální infračervené spektrum (thermal-IR). Rozlišení pro viditelné, blízké infračervené a SWIR spektrum je 30m, pro thermal-IR je to 120m. Spojení těchto senzorů je označováno jako Thematic Mapper (TM). (USGS 2012) TM je mechanooptický multispektrální skener, jenž snímá zemský povrch v pruhu o šířce cca 185 km a zaznamenává celkem 7 spektrálních pásem (Dobrovolný 1998)

Poslední funkční satelit vyneseny na oběžnou dráhu byl 15.3.1999 Landsat 7 nesoucí Enhance Thematic Mapper Plus (ETM+). Ve viditelném, blízké infračerveném a krátkovlnném infračerveném pásmu má rozlišení 30m, v termální pásmu má rozlišení 60m a 15m v panchromatickém módu (USGS 2012)

Začátkem roku 2013 bude na oběžnou dráhu poslána další generace satelitů Landsat. Koncept má název The Landsat Data Continuity Mission (LDCM) – Landsat 8. LDCM ponese dva pushbroom senzory. První s názvem Operational Land imager (OLI) bude snímat data v 9 krátkovlnných pásmech (8 spektrálních pásem s rozlišením 30m a jedno panchromatické pásmo s rozlišením 15m). Druhý senzor bude specializovaný na termální pásmo - Thermal Infrared Sensor (TIRIS). Po plném zapojení do provozu bude LDCM snímat 400 scén každý den. Ty budou přístupné ke stažení 24 hodin po přijetí a archivaci (USGS 2012)

NOAA

Další civilní satelity nesoucí multispektrální senzor byly vyvinuty U.S. agenturou NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ve spolupráci s NASA. Hlavním posláním NOAA je monitorování a vyhodnocování stavu životního prostředí země. NOAA se zaměřuje zejména na atmosferické jevy a meteorologii. Pomocí dat z jejich družic však můžeme získávat informace i o biologické složce životního prostředí. První satelit určený pro zkoumání (předpověď) počasí vyslali na oběžnou dráhu již v roce 1960 (1.3.1960) pod označením TIROS-1. Ten nesl pouze televizní kameru, nahrávač a komunikátor. V roce 1978 přišla NOAA s další generací satelitů, která již měla zabudovaný jednoduchý spektrometr, tzv. Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) (Davis 2011). Pomocí senzoru AVHRR již bylo možné získávat informace o vztahu mezi mraky, zemským povrchem, vodou, sněhem a ledem. (Goward et al. 1985 ex Schneider a McGinnis, 1977) První generaci AVHRR nesly satelity TIROS – N (1978) a NOAA-6 (1979). Sensory měli čtyřkanálový spektrometr. Další satelity vynesené v roce 1981 (NOAA-7) a 1983 (NOAA-8), byly již pětikanálové (druhá generace AVHRR) (Davis 2011). Satelitní snímače NOAA AVHRR jsou na oběžné dráze již více než tři desetiletí a její délka záznamu je bezkonkurenční (Hermann et al. 2005). Sensory denně zaznamenají povrch země v rozlišení 1.1 km (Gitelson 2004).

SPOT

SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) je systém družic spravovaný francouzskou kosmickou agenturou (CNES). Byl vyvinut pro výzkum přírodních zdrojů země. Data jsou distribuována společností SPOT IMAGE. (Dobrovolný 1998) První družice, která byla vypuštěna na oběžnou dráhu byla SPOT-1 (1986). Následovaly družice SPOT-2 a SPOT-3 (1990 a 1993). Všechny tři družice nesly multispektrální sensor HRV (high-resolution visible). Sensor zaznamenával ve 3 multispektrálních pásmech (20m/pixel) a jednom panchromatickém (10m/pixel). Tyto družice již nejsou na oběžné dráze a nahradila je nová generace družic – SPOT-4 (1998) a SPOT-5 (2002).

Družice SPOT-4 nese 2 HRVIR (High Resolution Visible Infrared) multispektrální radiometr a jeden sensor VEGETATION – 1. HRVIRs snímá již 4 multispektrální (v zelené, červené, blízké infračervené a krátkovlnné infračervené části spektra) a 1

panchromatické pásmo. Prostorové i spektrální rozlišení zůstává stejné jako u předchozího HRVs. Sensor VEGETATION-1 je úzce specializovaný na zkoumání vegetace. Snímá následující rozsahy spektra: B0: 0.45 – 0.52 μm , B2: 0.61 – 0.68 μm , B3: 0.78 – 0.89 μm , B4: 1.58 – 1.75 μm ; prostorové rozlišení je 1000 m.

Družice SPOT-5 vypuštěná v roce 2002 nese, kromě sensoru VEGETATION-2, který je totožný s VEG-1, také novou multispektrální kameru HRG (High Resolution Geometric). HRGs snímá v pěti pásmech: panchromatickém (0.48–0.71 μm , 5 m/pix), dvou viditelných (green 0.50 – 0.59 μm a red : 0.61 – 0.68 μm , obojí 10 m/pix), blízké-červeném (NIR 0.78 – 0.89 μm , 10 m/pix) a krátkovlnném (SWIR 1.58 – 1.75 μm). (Lu et al. 2008, CNES 2010)

IKONOS

IKONOS je pozorovací satelit, který byl na oběžnou dráhu vypuštěn v roce 1999, aby sbíral data s vysokým prostorovým rozlišením. Obsahuje dva snímací sensory jeden multispektrální se 4 kanály (R,G,B,NIR) a panchromatický. Snímače mají šířku záběru 11 km ve tří- až čtyřdenních intervalech. Sensor IKONOS je v některých ohledech velmi podobný Landsatu 7 ETM+. Zejména spektrální propustností kanálů dále pozicí (viz tab.č.1) a dobou oběhu na orbitě. Liší se však v prostorovém rozlišení, IKONOS má prostorové rozlišení oproti ETM+ několikanásobně vyšší – IKONOS 4 m, ETM+ 30 m; výstupu – IKONOS 11-bit ETM+ 8 bit a ve skenovacím úhlu, kdy IKONOS je možné velmi flexibilně nastavovat vůči rovníku. Ideálně je IKONOS využitelný pro snímání a vyhodnocování vegetace (Goward et al. 2003).

Tab.č.1: Srovnání senzorů IKONOS a Landsat.

	IKONOS	Landsat
R	632–698	630-690
G	506–595	525-605
B	445–516	450 -
NIR	757-853	775-900

HYPERION

V roce 21.11.2000 byla z letecké základny Vandenberg v Kalifornii pomocí rakety Delta 7320 vypuštěna družice s označením Earth Observing-1 (EO-1), která nesla sensor Hyperion. Mise EO-1 je jedna z částí programu NASA New Milenium

Program a jejím úkolem je demonstrovat/validovat nové přístroje využívané pro kosmonautiku a DPZ. EO-1 obíhá Zemi po stejné orbitě jako Landsat-7 a je za ní zpožděna asi 1 minutu. To umožňuje získat obraz stejných území v téměř stejnou dobu, čímž je možné získat přímé srovnání výsledků s Landsat ETM+, SAC-C (argentinský satelit) a TERRA, které obíhají po téměř totožné dráze. Tyto čtyři družice spolu tvoří tzv. ranní souhvězdí (Folkman et al. 2001, Doubrava et al. 2011).

Hyperion snímá viditelné, blízce červené a krátkovlnné infračervené spektrální pásmo, v rozsahu 367 μm – 2576 μm . Poskytuje snímky v hyperspektrálním rozlišení, a to v 220 úzkých spektrálních pásmech se spektrálním rozlišením 10nm a vysokým prostorovým rozlišením 30 m. Kalibrace je však provedena pouze pro VNIR 8 - 57 pásmo a SWIR 77 - 224 pásmo, celkem tedy 158 kanálů. Ostatní kanály jsou nastaveny na hodnotu 0. Na jednom snímku je zaznamenána oblast o rozměrech 7.5 x 100 km. Tento univerzální sensor je používán nejen pro měření povrchu země, ale i pro měření kosmických těles (Měsíce, planet, aj.). (Folkman et al. 2001, Pearlman et al. 2001, Pu et al. 2003, Doubrava et al. 2011).

Data z Hyperionu jsou volně k dispozici v archivu Geologické služby Spojených států amerických (USGS) ve formátu GeoTIFF a je možné je získat v těchto stupních předpracování: 1. Level 0R (L0R) – bez jakýchkoli korekcí, 2. Level 1R (L1R) – radiometricky opravená, 3. Level 1Gs (L1Gs) - transformovaná, radiometricky opravená, převzorkovaná po geometrické korekci, 4. Level 1Gst (L1Gst) – stejné jako u L1Gs, dále je na snímku provedena ortorektifikace s použitím DEM (digitálního výškového modelu) (Dobrovolný et al. 2011).

CHRIS

Senzor CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer) byl vyvinut Evropskou vesmírnou agenturou (ESA). Družice PROBA – 1 (Project for On Board Autonomy 1), která nese sensor CHRIS byla na oběžnou dráhu vypuštěna 21.9.2001. Tato technicky vyspělá družice měla demonstrovat vyspělost evropské techniky, hlavně díky velmi kompaktním rozměrům 60 x 60 x 80 cm a nízké váze 100 kg. Senzor PROBA snímá záření v rozpětí 400 – 1050 nm, ve více než 62 úzkých spektrálních pásmech (5 -12 nm), s prostorovým rozlišením mezi 17 a 34 m a celkovým záběrem jednoho snímku 13 x 13 km (Verrelst 2010).

5.3.2 Letecké snímání

Letecké senzory byly vyvinuty zejména pro získání kontinuálního spektra povrchu vody a země. Letecká data mají oproti satelitním lepší prostorové a spektrální rozlišení. Jsou tak vhodné pro detailní studium lesní dynamiky. Zároveň slouží k verifikaci družicových senzorů (Treitz et Howarth 1999).

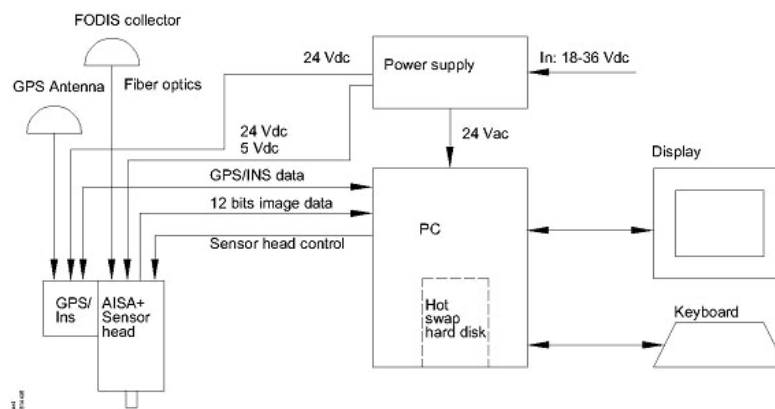
Pro letecké spektrální snímání se využívá více typů nosičů. Největší využití mají zatím letadla (Rock et al. 1988, Martin et al. 1998, Yu et al. 2006, Mišurec et al. 2012). Dalšími nosiči mohou být vzducholodě (Vierling 2006, Yongjun 2008, Zhang 2008, Liu et al. 2009) nebo helikoptéry (Honbou et al. 2001, Sugiura 2005). Všechny tyto nosiče jsou souhrnně nazývány letecké (Franklin 2001).

Příkladem používaných hyperspektrálních spektrometrů jsou: Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), poprvé použitý a popsáný v práci Porter et Enmark (1987); Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) (Anger et al. in Treitz and Howarth 1999); HyMap (Borengasser et al. 2008).

Hlavní komponenty pro letecké snímání jsou: optický senzor, inerciální měřicí jednotky, letecký GPS a letecký řídicí systém. Vedlejšími komponenty mohou být: externí napájení přístrojů, měnič napětí, kabely a řízení letové výšky (Borengasser et al. 2008).

Data v této studii byla nasnímána pomocí sensoru Asia Egle - SN 100014, který je složen z hyperspektrálního sensoru, součásti zaznamenávající data, GPS/IMS součásti a sensoru zářivosti FODIS (obr. č. 7).

Hyperspektrální skener AISA zaznamenává pomocí progresivní CCD kamery elektromagnetické vlnění v rozsahu VNIR (viditelné a blízce červené části spektra) v rozsahu od 400 do 1000 nm. Spektrální rozlišení je až 1.25 nm ve 488 pásmech. Výstup je digitální 12ti bitový. Letadlo je naváděno pomocí GPS/INS soupravy.

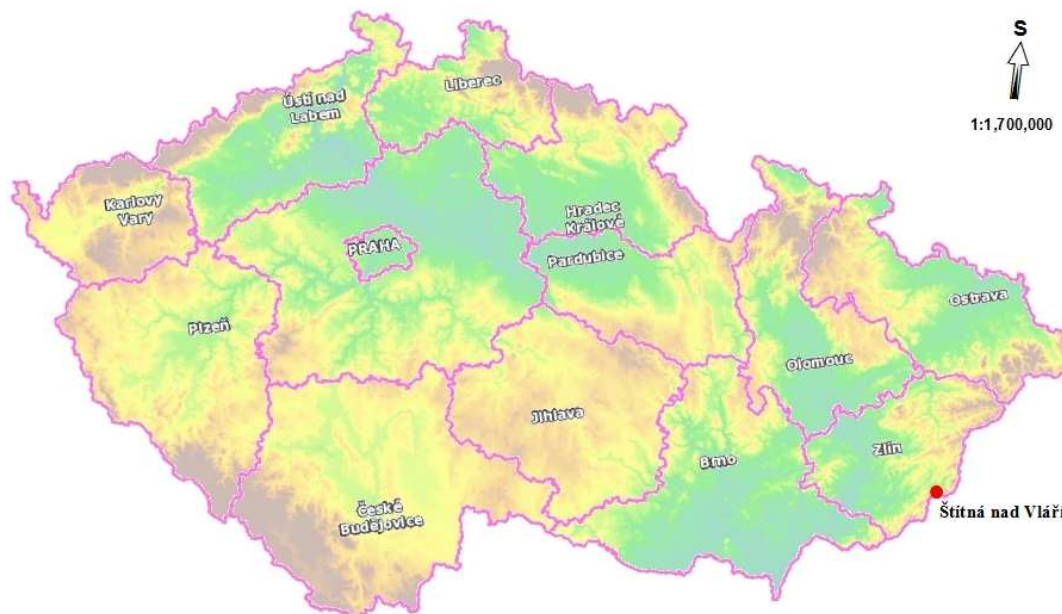


Obr.č. 7: Diagram systému AISA eagle

4 Charakteristika studijního území

Data byla sbírána na výzkumné lokalitě Centra výzkumu pro globální změny AV ČR v.v.i. (dále jen CzechGlobe), v blízkosti obce Štítná nad Vláří ($49^{\circ}02'03.182''$ SŠ, $13^{\circ}58'15.26''$ VD), v CHKO Bílé Karpaty, kde má CzechGlobe i svou ekosystémovou stanici.

Obr.č.8: Umístění ekosystémové stanice v rámci ČR.



Stanice je zařazena mezi významné evropské infrastruktury v rámci European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI), projekt Integrated Karbon Observation System (ICOS). Na ekosystémové stanici je měřena:

1. fotosynteticky aktivní radiace: dopadající na porost (PAR_I), pronikající porostem (PAR_t), odražená porostem (PAR_r); Globální radiace dopadající na porost (S_I), globální radiace odražená porostem (S_r), dlouhovlnná radiace dopadající na porost (L_I) a dlouhovlnná radiace vyzářená porostem (L_r).
2. teplota vzduchu - ve vertikálním profilu a nad korunami (na 8 místech –3 až 44 m)
3. teplota půdy – ve vertikálním profilu (5 míst, 5 – 50 cm)
4. relativní vlhkost vzduchu – ve vertikálním profilu koruny a nad ní (na 8 místech –3 až 44 m)
5. úhrn srážek nad porostem (42 m)
6. rychlost a směr větru nad korunovou vrstvou (44m) i ve vertikálním profilu (na 8 místech –3 až 44 m)

Centrum výzkumu pro globální změny vydává každý rok ročenku s naměřenými hodnotami.

CHKO Bílé Karpaty náleží k přírodní lesní oblasti (PLO) 38 – Bílé Karpaty a Vizovické vrchy. V této oblasti převažuje 3. lesní vegetační stupeň (dále LVS) dubobukový – 54%, v podobném poměru jsou pak zastoupeny 2. LVS – 20% bukodubový a 4 LVS 16% bukový. V porostech převažuje živná řada – 78% plochy. (Němec et al.. 2009).

Lesní porost patří do klimatické oblasti mírně teplé, MT 5. Průměrná teplota v červenci dosahuje 16 - 17°C. Roční úhrn srážek je 891 mm. (r. 2010) Patří do 4. LVS, ekologická řada bohatá. Z hlediska lesního typu patří do 4S7 – svěží bučina středních poloh s bikou chlupatou. Je součástí 1. zóny CHKO Bílé Karpaty.

Lokalita leží v nadmořské od 550 do 640 m n.m. Geologické podloží je tvořeno terciárními alpínskými zvrásněnými horninami – pískovcem a břidlicí. Hlavním půdním typem je kambizem.

V zájmovém porostu dominuje buk lesní (*Fagus sylvatica L.*), vtroušen je modřín opadavý (*Larix decidua*). Bukový porost v okolí stanice je stejnověká monokultura ve stáří 110 let (r. 2013) a s plným zápojem – 10.. Hustota porostu je 280 stromů na

hektar, průměrná výška 33.8 ± 3.4 m, výčetní tloušťka 37.3 ± 12.1 cm, index listové plochy (LAI) $4.6 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ a celková nadzemní biomasa $353 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-2}$. Porost má charakter tzv. sloupových síní, kde se vlivem vysokého zakmenění, a tedy nepřístupu světla, koruna (většina listové plochy), nachází v horní třetině stromu. Stromy jsou pěstovány za cílem získání co nejkvalitnější dřevní hmoty, a kvůli cílené pozitivní selekci je u stromů poměrně malá variabilita mezi jednotlivými jedinci.

5 Metodika

Samotná metodika je rozdělena do tří (resp. čtyř) samostatných oddílů. Následující odstavce jsou úvodem k metodice. Oddíl Letecká kampaň sem byl zahrnut, protože by měl být vnímán jako součást tohoto výzkumu, i když byla kampaň celá v režii Centra pro globální změny, v.v.i. (dále CzechGlobe). V rámci pozemní kampaně byly sebrány vzorky a zaměřena poloha vzorkových stromů. Oddíl Zpracování dat se pak zabývá samotným tříděním dat, prací s rastry, finálními výpočty a interpretací dat.

Hlavním podkladem pro výběr stromů byla mapa území vytvořená na základě předchozího leteckého snímkování (2010). Na základě této mapy byly dohledány předem vybraní jedinci, u kterých byla předpokládána určitá hodnota chlorofylu. Předpokladem bylo sebrat za týden vzorky z 20ti stromů. Proto jsme se snažili vybrat takové jedince, aby nám pokryly co největší rozpětí koncentrace chlorofylu. Zároveň byli pro zefektivnění práce k těmto předem vytipovaným stromům přidávány sousední jedinci (dalo se rychleji přelézat mezi korunami). Konečný počet stromů označených pro sběr vzorků bylo $n = 18$. Bohužel se při pozemní kampani nepodařilo zaznamenat GPS routerem všech 18 stromů, ale pouze 9. Proto bylo měření ještě 2x opakováno ze země v průběhu podzimu (kdy už jsou stromy bez asimilačních orgánů). Tato skutečnost zvýšila nepřesnost a časovou náročnost při následném vyhledávání vybraných stromů na pořízených leteckých snímcích. Do konečné analýzy vstoupilo $n = 18$ stromů.

Po provedení letecké kampaně následovala pozemní kampaň. Poté bylo prováděno zpracování dat. U leteckých snímků se jedná zejména o geometrické a atmosferické korekce. Listové vzorky byly poslány do laboratoře pro zjištění obsahu chlorofylu. GPS data byla zpracována pomocí postprocessingu. Následovalo zpracování

korigovaných dat v programu ENVI: vyhledání konkrétních jedinců, určení jejich reflektančních vlastností, převedení kontinuální reflektanční křivky na některý z vegetačních indexů (VI), určení empirického vztahu mezi obsahem Chl a VI a aplikace tohoto vztahu na celý porost (viz diagram, příl.č.1). V závěru byla data vhodně graficky interpretována.

4.1 Letecká kampaň

Letecká kampaň byla provedena 30.8.2011 dopoledne. Samotný nálet, pozemní korekci FieldSpecem a zpracování leteckých snímků bylo v kompetenci CzechGlobe, v diagramu (viz. příl.č.2) označeno oranžově.. Já jsem obdržel finální rastr na úrovni TOC reflectance (Top of Canopy).

4.2 Pozemní kampaň

Pozemní kampaň proběhla v termínu 13.8.2011 – 20.8.2011. V zájmovém porostu CzechGlobe se nacházejí vyznačené stromy, které jsou součástí dlouhodobého výzkumu. Některé z těchto stromů byly použity ke sběru vzorků i v mém případě. Další stromy vstupující do analýzy byly subjektivně vybrány tak, aby mezi nimi byla co nejširší variabilita a zároveň byla zohledněna přístupnost koruny. Každému stromu bylo přiděleno a na kmen vyznačeno specifické ID. Celkem bylo vybráno n=19 jedinců. Důležitým podkladem pro výběr stromů byla i mapa pořízená na základě leteckého snímání z předchozího roku (2010). Mapa byla klasifikována do několika tříd. Z každé třídy byl vybrán jedinec a k němu určen další, poblíž stojící jedinec (pro zvýšení efektivity práce při sběru vzorků).

Do korun jsem lezl pomocí speciální stromolezecké techniky tak, aby nedošlo k poškození stromu. Lano bylo do koruny instalováno vystřelením kotvy stromolezeckým prakem (BigShot®, SherrilTree). Výstup po instalovaném laně byl prováděn pomocí systému dvou blokantů. Po vyšplhání a zajištění v koruně, byla do nejvyššího možného místa umístěna GPS, pro zaznamenání pozice stromu. Konkrétně byl použit rover GPS Topcon. Měření bylo provedeno offline s následným postprocessingem. Čas měření trval dle náročnosti a dalšího postupu v koruně 3 – 42 minut. Průměrný čas pro zlezení jednoho stromu se pohyboval kolem 1 – 2 h, v závislosti na rychlosti instalace lana a složitosti koruny. Pokud se dva stromy nacházely v bezprostřední blízkosti, byla mezi korunami instalována

dočasná lanová lávka, po které se dalo přelézt na sousední strom, což velmi ušetřilo energii a čas.

Listové vzorky (vzorkem rozumíme větev s asimilačními orgány) byly sebrány z vrcholových partií koruny. Sbíraly se dva typy vzorků: z osvětlené části koruny (většinou J expozice) a z nižší, zastíněné části koruny. Tyto vzorky byly bezprostředně po uštípnutí spuštěny na zem, kde byly rozděleny na menší části. Část listů se hluboce zamrazila do tekutého dusíku (cca – 200°C), část byla v terénní laboratoři naskenována pro zjištění indexu listové plochy, zbytek byl použit pro ostatní měření pro potřeby CzechGlobe.

Zamražené vzorky byly poslány do laboratoře, kde byla provedena analýza chlorofylu v N,N – Dimethylformamidu (Porra et al. 1989, Stiegler et al. 2005), a to vždy na pěti listech ze stinné i světlé části koruny. Zjišťován byl chlorofyl A (Chl_A) a B (Chl_B). V laboratoři bylo určeno z n=19 stromů pouze n₁=18. Analýzu listových vzorků a práce v terénní laboratoři měl v režii CzechGlobe, v diagramu značeno oranžově (viz příl.č.1).

Po skončení terénních prací bylo zjištěno chybné zaznamenávání routeru GPS. Z původních 18ti měřených jedinců bylo správně zaznamenáno pouze 9. Opětovné zlezení korun by bylo časově velmi náročné. Proto se přistoupilo k alternativnímu řešení: měření GPS u paty kmene stromu mimo vegetační období.

Celkem byla provedena dvě opakovaná měření 25.11 a 13.12. Na každý strom byly zaměřeny dva body, zapsána vzdálenost od stromu a azimut. Souřadnice stromu byly získány jejich zprůměrováním. První měření proběhlo 25.11.2011: doba měření 25 min (rover offline). Druhé opakované měření bylo 13.12.2011: strom 505 a 503 byly měřeny online do zafixování a ostatní stromy offline, doba měření byla 20 min.

4.3 Zpracování dat

Výpočet jsem zpracoval na počítači Centra výzkumu globální změny AV ČR. Jedná se o počítač složený z 19 procesorů Intel® pracujících na 2.8 GHz, s 70.9 GiB operační pamětí. Pracovním prostředím byl OS Linux – Ubuntu. Při zpracování dat byl využíván zejména Software ENVI (Exelis Visual Information Solutions), což je

specializovaný nástroj řešící zpracování a analýzy geoprostorového obrazu (EXELIS 2012). Dále, zejména pro dohledání korun stromů, byly použity softwary Google Earth (Google©) a ArcGIS 9.3 Desktop (ESRI©). Data byla tříděna pomocí MS Office (Microsoft©) a exportována do Statistica, kde byly vypočteny lineární regrese. Diagramy byly tvořeny v programu SmartDraw (SmartDraw, LLC ©).

Z každého vzorku listoví (n_1, n_2, \dots, n_{18}) bylo vytvořeno 5 vzorků pro analýzu chlorofylu. Pro získání hodnoty koncentrace ($\text{ug} \cdot \text{cm}^{-2}$) byl použit následující vzorec:

$$Cha(b) = 100 * Ca(\text{ug ml}^{-1}) * \frac{V(\text{ml})}{A(\text{cm}^2)}$$

kde: Ca je koncentrace Chl v ug v jednom ml roztoku, V je množství roztoku v ml daného vzorku a A je listová plocha vzorku podrobeného analýze v cm^2 .

5 dílčích vzorků obsahu chlorofylu bylo zprůměrováno a výsledky Chl_A a Chl_B byly sečteny – Chl_{A+B} . Tato hodnota dále vstupovala do regrese s hodnotami leteckého snímkování (vegetačními indexy).

Pro dohledání korun stromů bylo využito několika podkladových map. Hlavním podkladem byly pořízené letecké hyperspektrální snímky. Ty jsem dostal již po geometrických i atmosférických korekcích. Vzniklý rastr byl tedy již na úrovni tzv. TOC odrazivosti (Top of Canopy Reflectance). Prostorové rozlišení snímků 0.5 m a spektrálním rozlišením $<10 \text{ nm}$, se spektrálním rozsahem 0.3992 – 0.9899 nm (celkem 65 spektrálních pásem).

Obr.č.9. Výřez území R40 (0.7538 nm), G30 (0.6611 nm) a B7 (0.4517 nm).



Pro zobrazení byla použita různá kombinace RGB kanálů. Nejčastěji R40 (0.7538 nm), G30 (0.6611 nm) a B7 (0.4517 nm) (viz obr.č.9); G28, G18, B8 a také s různými odstíny šedi včetně použitých VI. Dále jsem pracoval s ortofotomapou v Google Earth a ortofotomapu CÚZK v ArcGIS, zejména pro odhad hranice korun.

Koruny stromů byly dohledávány individuálně v programu ENVI. Na podkladový rastr byla načtena vektorová vrstva bodů z měření GPS. Stromy byly dohledávány jednak podle zaměřené polohy a jednak podle tvaru koruny a polohy, tak jak jsem si je v průběhu pozemní kampaně zapamatoval. Každému dohledanému a označenému stromu byla přiřazena subjektivní procentuální hodnota určující pravděpodobnost, že strom, ze kterého byly sbírány vzorky, patří stejnému jedinci jako množina pixelů označených v rastru. Stromy pod hranici 75% byly označeny jako „nejasné“ a byly pro další výpočty vyřazeny. Dohledané koruny byly označeny pomocí ROI (region of interest) polygonů. Celkem bylo vybráno $n=15$ polygonů (75% - 99%).

V průběhu zpracování dat bylo dohodnuto s VÚ CzechGlobe, že do výsledné regrese použijeme pouze vzorky z osvětlených částí korun. Proto bylo nutné z rastru vybrat pouze osvětlené pixely (s nejsilnějším signálem). To bylo provedeno pomocí řízené klasifikace. Z rastru byla vybrána tmavá, stinná místa a označena pomocí ROI. Celkem bylo vybráno $n=8456$ pixelů. Z těchto vybraných ploch zájmu byla následně vypočítána klasifikace pro celý rastr, pomocí funkce: Class/Supervised/Parallelepiped. Tím vznikl rastr (osvicene_koruny_tmave) neosvětlených částí porostu. Tento rastr byl použit jako maska pro oříznutí původního rastru, funkce: Masking. Výsledný rastr (vysledna_vrstva_korun_svetlo) obsahoval pouze osvětlené pixely. Ostatní pixely byly bez hodnoty.

ROI stromů musely být změněny podle nového rastru tak, aby obsahovaly pouze osvětlené pixely a neobsahovaly pixely bez hodnot. Z rastru vysledna_vrstva_korun_svetlo byly postupně spočítány vegetační indexy – funkce: Vegetation Index Calculator, nebo pro výpočet jiného indexu, Band Math. Po každém spočítaném indexu byly vyexportovány průměrné hodnoty VI pro každý strom a přeneseny do tabulky v programu Statistica.

V programu Statistica byla spočítána lineární regrese pro každý index. Kde vysvětlující proměnou je obsah Chl_{A+B} (osa Y) a vysvětlovanou proměnou je hodnota VI (osa X). Výsledným grafem byla proložena přímka, kde na ose Y je hodnota chlorofylu a na ose X průměrná hodnota VI.

Na závěr byl vybrán index, který měl nejtěsnější regresní vztah s koncentrací chlorofylu v listech. Tento index sloužil jako základ pro vytvoření chlorofylové mapy území.

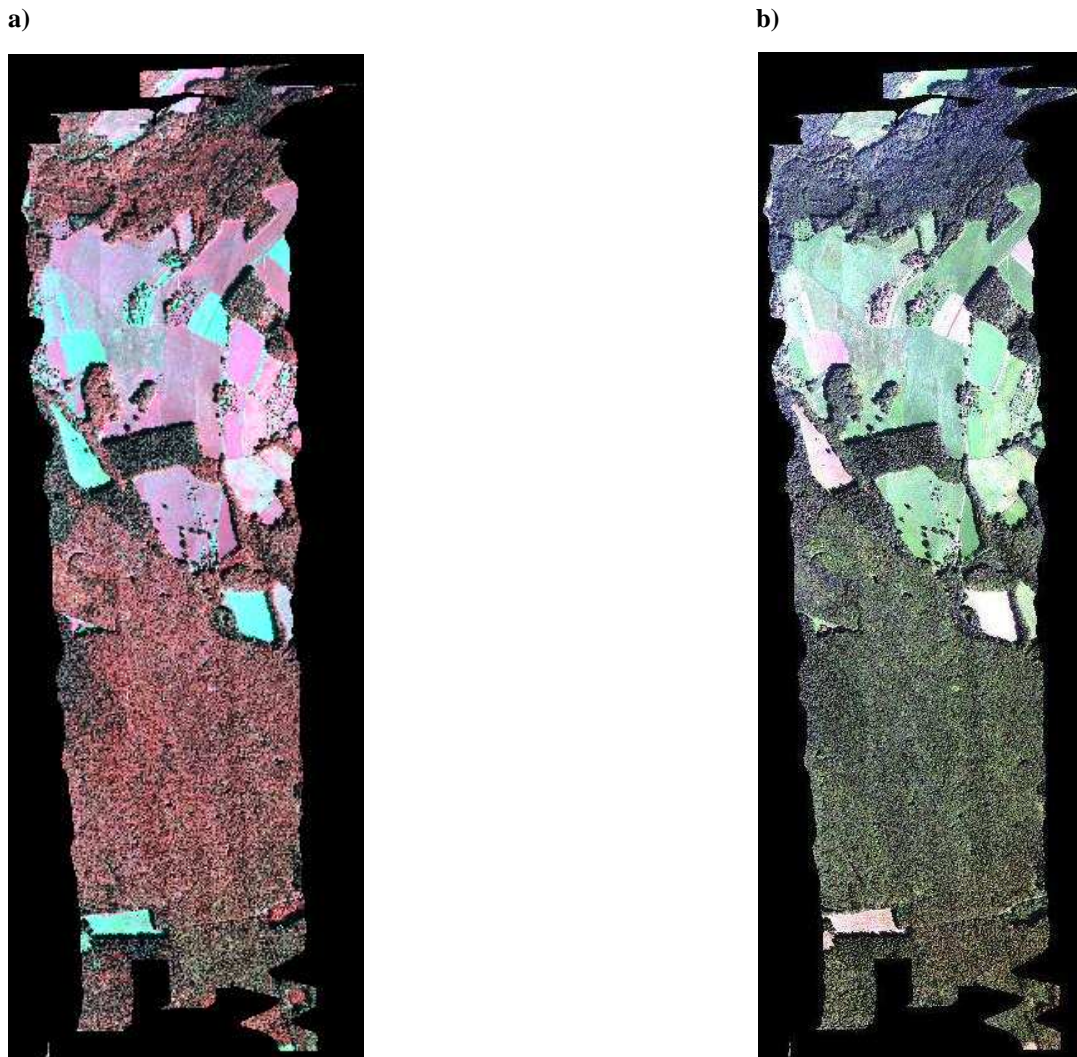
Vybraný index byl v ENVI klasifikován. Škála hodnot byla subjektivně klasifikována na 5 kategorií, a to v rozpětí, které nám určila koncentrace chlorofylu sebraných vzorků, tj. 16 – 52 mg/cm². Spodní hranice je ohraničena 10 mg/cm², horní hranice je otevřena 50 mg/cm² a víc. Neosvícené pixely a pixely s nižší hodnotou než 10 mg/cm², resp. ND₇₀₅ < 0.2 nejsou do analýzy zahrnuty a mají hodnotu 0, resp. černou barvu. Konkrétní hodnoty kategorií jsou: <0.2 = 0, 0.2–0.4 = 10–20 ug.cm², 0.4 – 0.49 = 20 – 30 ug.cm², 0.49 – 0.57 = 30 – 40 ug.cm², 0.57 - 0.64 = 40 - 50 ug.cm² a >0.64 = 50+ ug.cm² (viz ukázka obr. č. 14, celá mapa je součástí přílohy) (Mišurec et al. 2012). Pro barevnou vizualizaci byla použita funkce Tools/Color Mapping/Density Slice. Každé třídě byla přiřazena barva od červené (nejnižší hodnota indexu/chlorofylu) po tmavě zelenou (nejvyšší hodnota indexu/chlorofylu). Ve výsledném obrazu je tak vidět na první pohled podle barvy, do jaké hodnotové škály konkrétní pixely patří, resp. jakou mají hodnotu chlorofylu. Pro vytvoření layoutu byl použit ArcGIS 9.3.

Celá metodika je shrnuta pomocí diagramu (viz příloha č. 1), kde jsou oranžově označeny procesy, které vypracoval VÚ CzechGlobe, zbylé procesy jsem provedl já.

6 Výsledky

V rámci letecké kampaně bylo nalétnuto 5 letových linií, které byly následně spojeny v rámci postprocessingu. Součástí postprocessingu, který měl ve své režii CzechGlobe, byly i atmosferické, geometrické a radiometrické korekce. Výsledkem byl georeferencovaný obraz na úrovni TOC reflektance s prostorovým rozlišením <0.5 m, velikostí 3441 x 8921 pixelů, ve spektrálním rozsahu 399 – 990 nm a spektrálním rozlišením 9.1 nm v 65 spektrálních pásech (viz obr.č. 9.).

Obr.č. 10.: Výsledný rastr ve 3 barevných provedeních. a) R40 (0.7538 nm), G30 (0.6611 nm) a B7 (0.4517 nm), tato kombinace vhodně zvýrazní okraje korun b) skutečné barvy R28 (0.6425 nm), G18 (0.5502 nm), B8 (0.4606 nm)



Při zaměřování stromů pomocí GPS během pozemní kampaně bylo vinou lidské chyby zaměřeno pouze 14 jedinců. Z toho při 6 měřeních nebyl zaznamenán žádný satelitní signál. Celkem bylo tedy úspěšně zaznamenáno $n_1=8$. Minimální doba měření routrem v koruně byla 3 m 40 s (ID 507) a maximální 42 m 55 s (ID 504). Při prvním opakovaném měření bylo zaznamenáno celkem 14 bodů (na každý strom 2 body), celkem bylo zaznamenáno $n_2=7$ jedinců. Doba měření byla cca 25 min. Při druhém opakovaném měření bylo zaměřeno 16 bodů, z toho 12 bodů offline a 4 body online do zafixování. Celkem bylo zaznamenáno 8 jedinců, ovšem pouze $n_3=4$ jedinci noví a 4 jedinci jako kontrolní měření prvního korunového měření. Doba měření byla kolem 20 minut. Celkem tak bylo zaměřeno $N = n_1+n_2+n_3= 19$ stromů.

Při následném dohledávání korun však bylo s pravděpodobností alespoň 75% dohledáno pouze 16 stromů. Nebyly určeny ID 503, 504, 511.

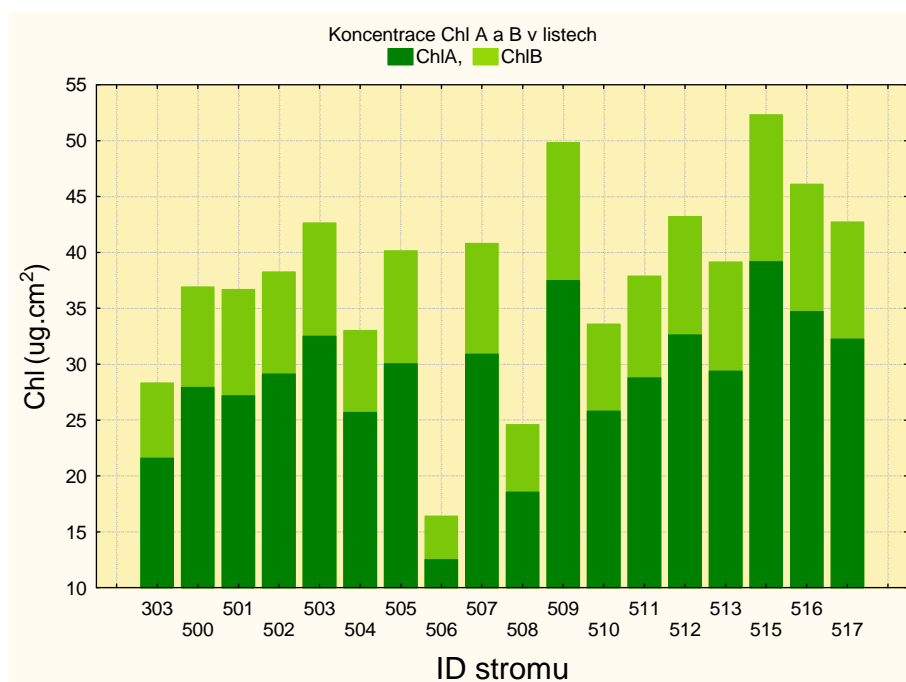
V laboratoři byla určena koncentrace chlorofylu u 18 z 19 vzorků (resp. 90 z 95 vzorků). Nebyly určeny vzorky ze stromu ID=514. Čili celkem do regrese vstupuje $N - 3 - 1 = 15$ jedinců.

Průměrná koncentrace chlorofylu A + B v listech byla 37.93 ug.cm^2 . Nejmenší koncentraci měl jedinec 506 a to 16.41 ug.cm^2 , nejvíce měl jedinec 515 s 52.31 ug.cm^2 . Průměrná odchylka koncentrace chlorofylu byla $\sigma = 9.39$.

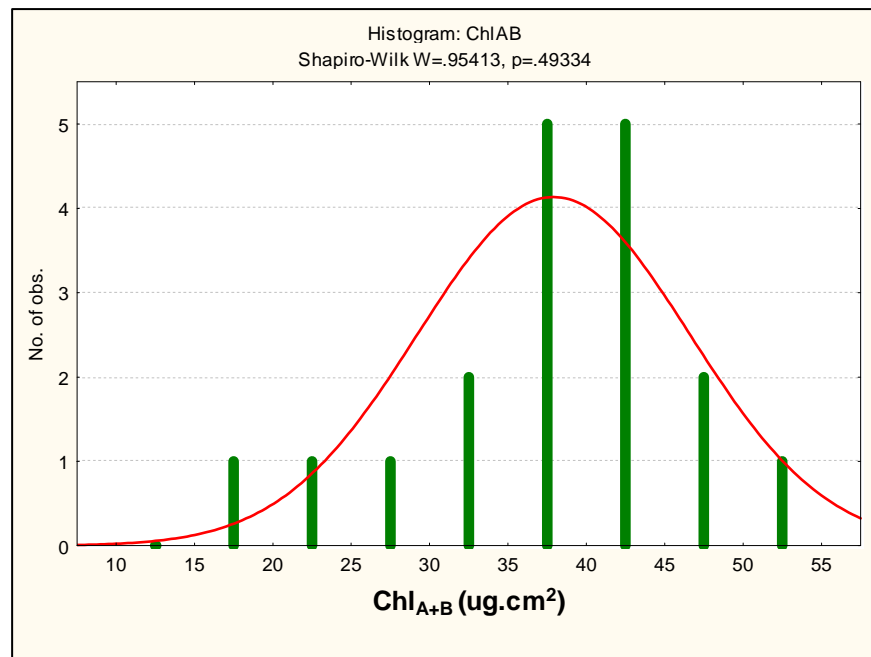
Normalita dat byla testována pomocí Shapiro – Wilkova testu normality (obr.č.11 b). Testoval jsem nulovou hypotézu H_0 že koncentrace Chl_{A+B} pochází ze základního souboru s normálním rozdělením oproti alternativě H_1 že tomu tak není. Hladina významnosti byla zvolena $\alpha = 0.05$. Hodnota S-W testu byla 0.95, $p = 0.49 > \alpha = 0.05$. Na základě výsledku se H_0 přijímá, předpokládáme tedy, že soubor hodnot má normální rozdělení.

Obr.č.11: Graf (a) histogram průměrné koncentrace chlorofylu v listech vzorků sebraných v koruně (b) Shapiro – Wilkův test normality koncentrace Chl_{A+B} . H_0 se nezamítá, soubor pochází z normálního rozdělení.

a)



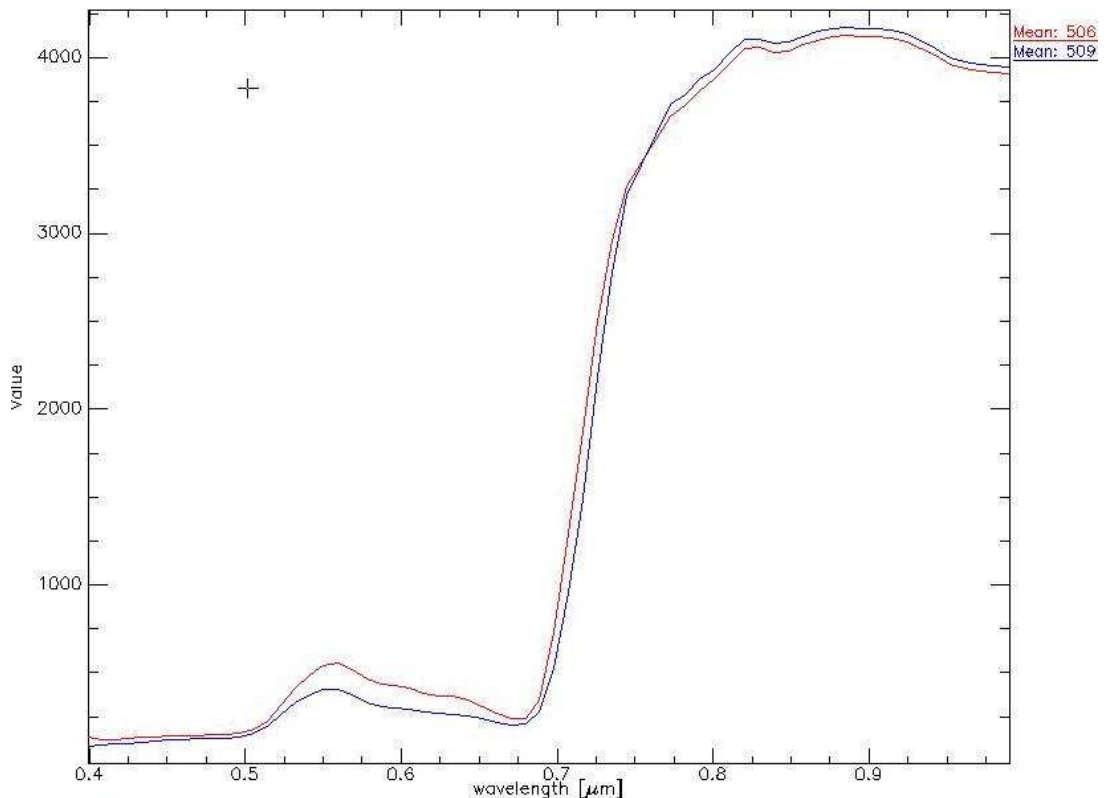
b)



Při porovnání křivek odrazivosti stromu s nejnižší hodnotou koncentrace Chl_{A+B} (ID 506) se stromem s relativně vysokou hodnotou koncentrace koncentrace Chl_{A+B} (ID 509) zjistíme, že vliv koncentrace pigmentů v rostlině má vliv na výslednou reflektanční křivku. Čímž můžeme potvrdit I. hypotézu, že se změnou biochemických či strukturálních vlastností se mění i spektrální vlastnosti (viz obr.č.12).

Jako kvantitativní parametr pro hodnocení zdravotního stavu porostů byl zvolen vegetační index. V rámci práce byly přednostně využity předvolené indexy v programu ENVI, vyjma indexu R735/R700 ze studie Gitelson et al. (1999). Celkově byl testován vztah koncentrace chlorofylu se šesti vegetačními indexy: NDVI (Tucker 1979), ND₇₀₅ (Gitelson et Merzylak 1993), REIP (Vogelmann 1993), R_{735/R700} (Gitelson et al. 1999), mND₇₀₅ a mSR₇₀₅ (Sims et Gamon 2002).

Obr.č.12: Průměrná reflektanční křivka stromu s nízkou hodnotou Chl_{A+B} (ID 506) a relativně vysokou hodnotou Chl_{A+B} (ID 509).

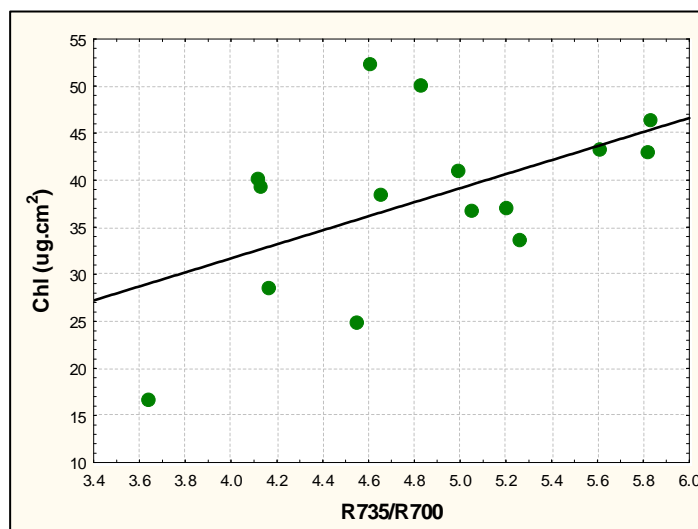
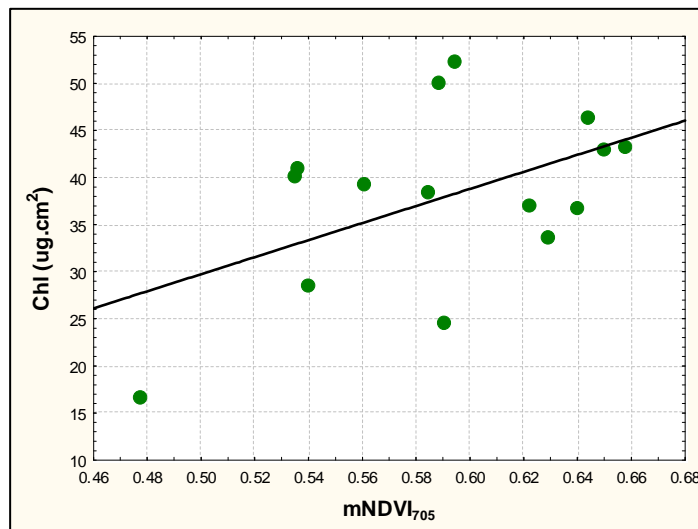
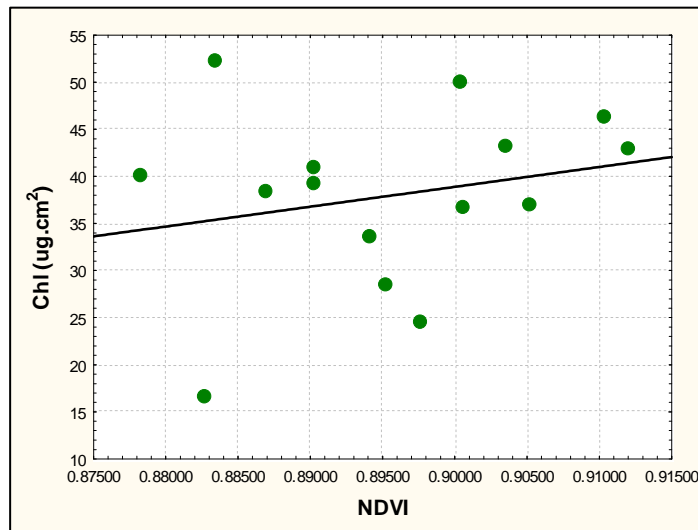


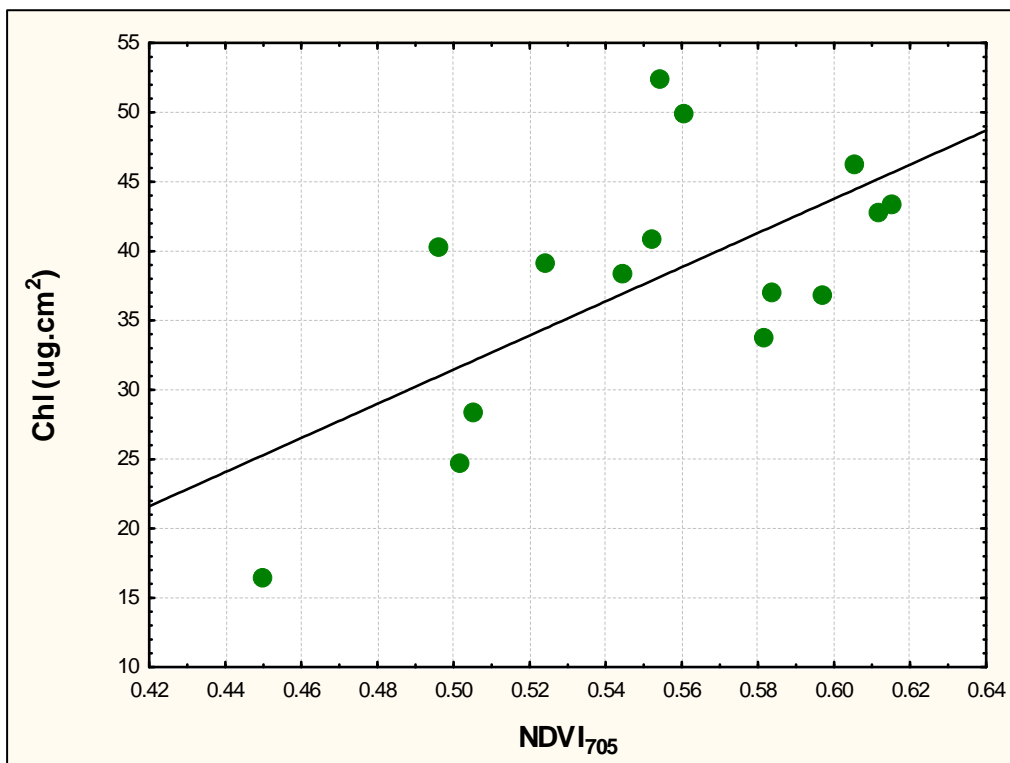
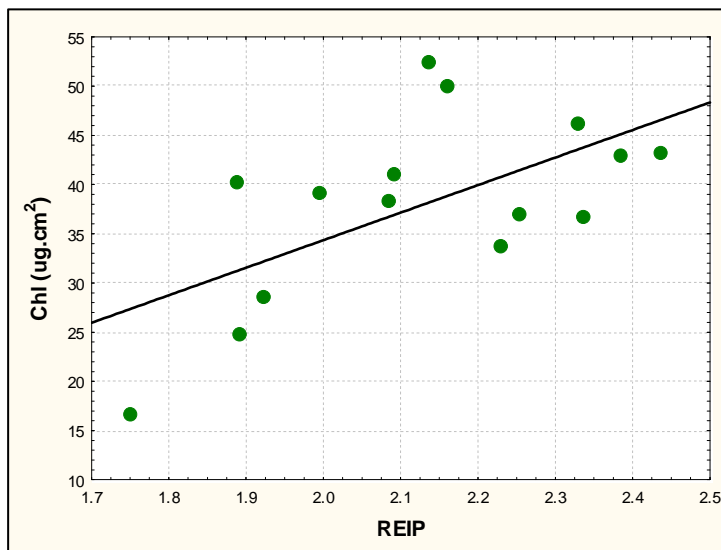
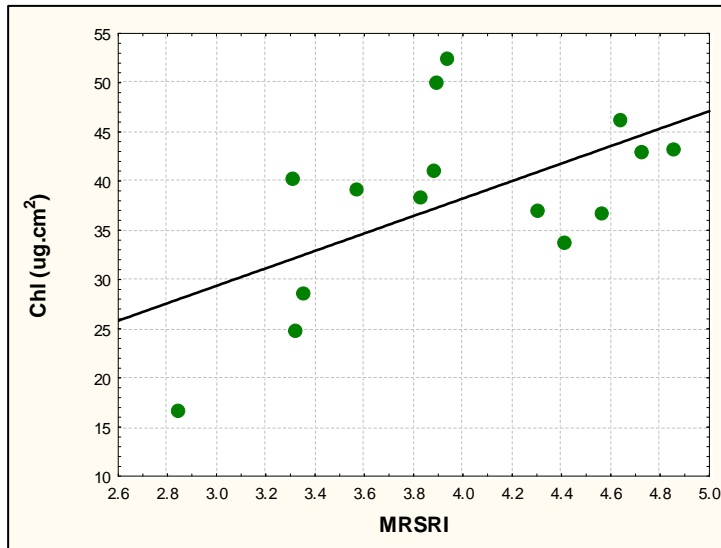
Tab.č. 2: Seznam použitých indexů a výsledky regrese mezi VI a koncentrací Chl_{A+B} .

	r	P - value	ρ
ND705	0.642	0.010	0.412
REIP	0.613	0.015	0.376
mSR705	0.574	0.025	0.330
R735/R700	0.521	0.046	0.271
mND705	0.503	0.056	0.253
NDVI	0.228	0.420	0.050

Statisticky průkazný vztah ($p < 0.05$) mezi koncentrací chlorofylu a VI byl zjištěn u 4 indexů. Neprůkazně s $p = 0.42$ vyšel výsledek u indexu NDVI. Těsně za hranicí průkaznosti s $p = 0.056$ byl index mND₇₀₅. Naopak nejtěsnější vztah vykazoval index NDVI₇₀₅, a to $r = 0.642$ s $p = 0.01$.

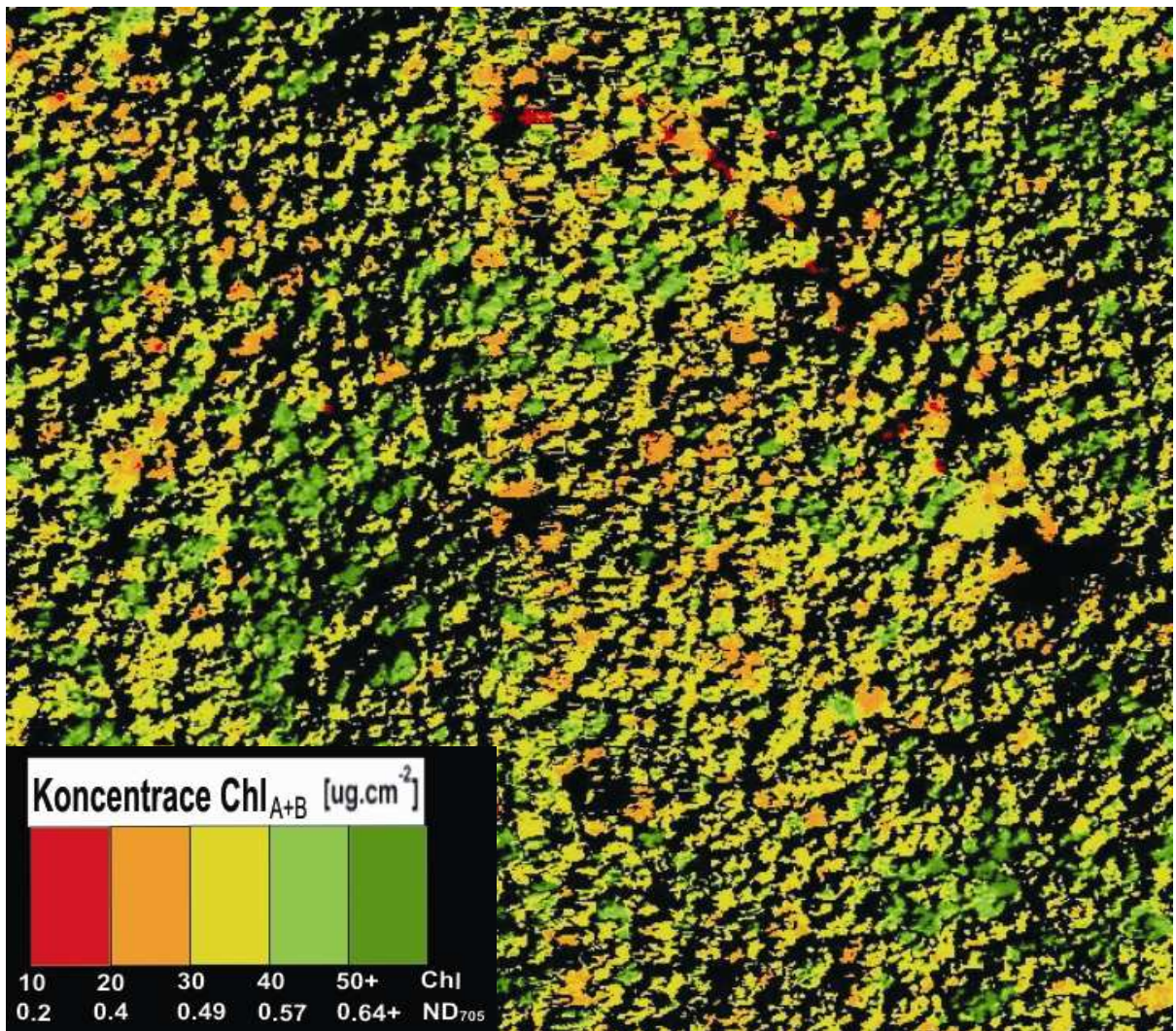
Obr.č.13: Grafy vztahu mezi použitými VI a koncentrací Chl_{A+B} v listech. Grafy jsou srovnané od nejnižší po nejvyšší hodnotu regrese. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. č. 2.





Chlorofylová mapa byla vytvořena na základě indexu ND_{705} , který z použitých indexů vykazoval nejlepší regresi: $r = 0.642$. Obr. č. 14 je výřez zkoumaného území. Mapa celého území je v příloze č.1.

Obr.č.14: Výřez chlorofylové mapy zkoumaného území. Na snímku jsou barevně vyznačeny pouze osvětlené pixely, klasifikované do 5ti kategorií podle koncentrace Chl_{A+B} , resp. hodnoty indexu ND_{705} .



Tabulka č. 3 naměřených a očekávaných hodnot nám dává bližší představu o použitelnosti vegetačního indexu ND_{705} pro hodnocení koncentrace Ch_{A+B} , resp. zdravotního stavu zájmového lesního porostu. Naměřené a očekávané hodnoty koncentrace chlorofylu se shodují pouze u 5ti vzorků z 15. Naopak u indexu se průměrná hodnota ROI polygonu neshoduje s očekávanou hodnotou pouze jednou, což je uspokojivý odhad.

Tab.č. 3: Naměřené a očekávané hodnoty chlorofylu a indexu ND₇₀₅ pro každý strom, resp. ROI. Očekávané hodnoty jsou rozdělené do pěti klasifikačních skupin.

number of trees	Chlorophyll _{A+B}		INDEX ND ₇₀₅				count pix
	measure	expected	Min	Mean	Max	expected	
303	28.32	30-40	0.45	0.5058	0.54	0.49-0.57	71
500	36.89	40-50	0.51	0.5837	0.64	0.57-0.64	107
501	36.68	40-50	0.58	0.5976	0.64	0.57-0.64	18
502	38.25	30-40	0.51	0.5450	0.59	0.49-0.57	56
505	40.13	30-40	0.44	0.4965	0.54	0.49-0.57	59
506	16.41	20-30	0.39	0.4504	0.5	0.4-0.49	49
508	24.58	30-40	0.45	0.5522	0.54	0.49-0.57	33
509	49.82	30-40	0.53	0.5018	0.59	0.49-0.57	62
507	40.80	30-40	0.51	0.5608	0.63	0.49-0.57	50
510	33.58	30-40	0.54	0.5820	0.63	0.49-0.57	53
512	43.20	50+	0.58	0.6158	0.66	0.57+	71
513	39.13	30-40	0.51	0.5242	0.56	0.49-0.57	29
515	52.31	30-40	0.53	0.5547	0.58	0.49-0.57	21
517	42.71	50+	0.58	0.6056	0.65	0.57+	24
516	46.10	50+	0.56	0.6122	0.64	0.57+	37

7 Diskuse

7.1 *Pozemní kampaň*

Sběr listoví z korun stromů byla fyzicky nejnáročnější a nejrizikovější část výzkumu. Zároveň jsem po skončení práce tuto část zpětně vyhodnotil jako velmi málo efektivní. Časově nejnáročnější byla instalace lana do koruny a samotný výstup. Pro příští výzkum je třeba zvolit jiný pracovní postup tak, abychom za stejný čas sebrali několikanásobně větší počet vzorků.

Jako nejvhodnější by bylo vytvořit transekt. Stromolezec by pak na začátku dne vylezl pouze jednou do koruny, a pak by se posouval postupně ve směru transektu z koruny na korunu, čímž by se vyloučily časově nejnáročnější části sběru, tj. instalování lana do koruny a výstup. Možností jak se posouvat mezi stromy je několik (Beranek 1998): 1) Postupně, kdy jsou vždy dva jistící body (tzv. double tie-ins), jeden zajištěn v koruně stromu ze kterého se leze a druhý v koruně kam se leze. Výhodou je, že si lezec může volit vlastní cestu dle situace přímo v koruně. Nevýhodou je neustálé rušení a opětovné obnovování jistících bodů. 2) Vytvořením dlouhého traverzu (tzv. the long traverse), statické lano se zajistí na dvou stromech ležících na začátku a konci transektu (dle délky lana) a pomocí stahováku se vypne,

tím vznikne lanová lávka, po které se může lezec pohybovat pomocí kladky. Přesouvání je jednodušší, protože lezec se po celou dobu posouvá po jednom laně. Nevýhodou je, že lano je nataženo v přímce. Může se tak stát, že některé stromy jsou mimo tuto přímku a tudíž se budou muset vynechat nebo slézt zvlášť. Ideální bude využít kombinaci obou stromolezeckých technik.

Zaměření polohy koruny stromů pomocí geodetické GPS bylo uspokojivé. Při manipulaci s GPS v koruně vstupuje do procesu několik dalších faktorů jako vítr, zavětvení stromu, mechanické nebo biotické poškození, množství družic nad horizontem, které ovlivňují úspěšnost zaměření. Z toho důvodu není možné absolutně vyloučit ani lidskou chybu - při instalaci a zapínání samotného routru GPS.

Pro zlepšení dohledávání korun stromů by bylo vhodné využití Field-Map (Malenovský 2013). Je to počítačem podporovaný nástroj pro sběr dat v terénu, kdy je v jednom přístroji zahrnut digitální dálkoměr a sklonoměr, digitální kompas, GPS a terénní počítač se specializovaným lesnickým mapovacím softwarem, který vyvinul Výzkumný ústav lesních ekosystémů (IFER, s.r.o.). Přístroj by při pozemní kampani zaznamenával doplňující údaje o stromu. Zejména horizontální korunový profil, podle kterého by se pak daly stromy lépe dohledat na leteckých snímcích.

Dalším nástroj, který by zjednodušil zpracování dat, by bylo použití algoritmu na automatické vylišení korun. Ke et Quackenbush (2011) popisují dvě kategorie algoritmů pro určování korun: tree-crown detection a tree crown delineation. Díky těmto algoritmům by se snížila časová náročnost zpracování dat, především při dohledávání, označování a výpočtu statistik, ale také by se rychleji dohledali zájmové stromy při následné verifikaci měření.

Obecně je sběr vzorků ze stromů a jejich zaměření, spolu se správně zpracovanými leteckými snímky část, která nejvíce ovlivňuje přesnost výsledků. Špatně zaměřený a určený strom je pro následnou regresi a práci s daty velmi negativní prvek, který může značně skreslovat výsledné hodnoty. Proto bychom měli této části výzkumu věnovat zvýšenou pozornost.

7.2 Koncentrace chlorofylu

Koncentrace chlorofylu se od ostatních studií významně nelišila. Rozpětí koncentrace chlorofylu (A+B) v našem výzkumu se pohybuje v rozmezí 16.4 – 52.31 ug.cm². U jiných autorů, např. Gitelson et al. (1999) je to 6.3 - 68.3 ug/cm², le Maire et al. (2008) uvádí 35.2 -107 ug.cm². Demarez (1999), který zkoumal sezónní změnu koncentrace zvláště osvětlených a zastíněných listů, na stromech podobné dimenze, uvádí průměrnou koncentraci 43.5 ug/cm² pro osvětlené listy. V porovnání s naší průměrnou koncentrací 37.93 ug/cm² je rozdíl minimální.

Demarez (1999) dále uvádí, že nejvyšší koncentrace Chl je 170 den v roce, poté dochází k senescenci (stárnutí). Kodani et al. (2002) studoval sezónní změnu koncentrace u jiného druhu buku - *Fagus crenata*. V jejich případě docházelo k senescenci až 240 den, kdy byla průměrná koncentrace Chl cca 40 ug/cm². To poukazuje na to, že sběr asimilačních orgánů v mém případě je na hranici nebo za hranicí počátku senescence, protože sběr byl prováděn 220 den v roce. Zároveň je i průměrná koncentrace nižší v porovnání s oběma autory. K této interpretaci se přikláním i z toho důvodu, že poloha naší výzkumné plochy má kontinentální charakter a vyšší nadmořskou výšku než u zmíněných dvou prací. Vliv kontinentality a nadmořské výšky způsobuje dřívější nástup senescence.

7.3 Vegetační indexy

V práci jsem přednostně využil předvolené indexy z programu ENVI. V této části výzkumu spektrálních vlastností *Fagus silvatica* L. bylo cílem dokázat závislost mezi spektrálními vlastnostmi vegetace (pořízenými letecky pomocí spektrometru) a fyziologickými vlastnostmi. Kde spektrální vlastnosti byly sdruženy do vegetačního indexu a fyziologický stav určovala koncentrace chlorofylu v listech konkrétních dohledaných jedinců *Fagus silvatica* L..

Indexy NDVI a mND₇₀₅ vyšly neprůkazně. Jak uvádí Lichtenthaler et al. (1998) index NDVI je málo citlivý ke středním a vysokým hodnotám koncentrace pigmentů. To by mohlo vysvětlovat vysokou odchylku od naměřených hodnot.

Použití indexů ND₇₀₅, mND₇₀₅, NDVI, mSR₇₀₅ vychází ze studie Sims and Gamon (2002). Ti porovnávali koncentraci chlorofylu (mmol.m⁻²) s daty naměřenými

pomocí polního spektrometru LI-COR, tím byl jejich výzkum jen minimálně ovlivněn vnějšími vlivy. Dále jim do regrese vstupovalo řádově více dat (okolo 400 listových vzorků z 53 druhů rostlin). Stejně jako v našem případě jim neprůkazně vyšel vztah s NDVI. Ostatní indexy měli významně silnější korelaci než je tomu v našem případě. Nejtěsnější vztah jim vykazoval index mND_{705} : $R^2=0.83$ (u nás $r^2=0.25$). I přesto, že se tato studie od studie Sims et Gamon (2002) liší použitými daty i výsledky, oboje výsledky ukazují průkazný vztah mezi indexy mND_{705} , ND_{705} , mSR_{705} a koncentrací chlorofylu.

Mišurec et al. (2012) použil při hodnocení zdravotního stavu porostů *Picea abies* na Sokolovsku mj. indexy ND_{705} a REIP. V rámci trénovacích množin pro validaci modelu radiativního transferu dostal u obou indexů oproti našim velmi příznivé hodnoty: ND_{705} – $R^2=0.72$ (0.41); REIP - $R^2=0.83$ (0.38). Mišurec et al. (2012) sbíral data letecky pomocí senzoru HyMap, a proto jsou jeho výsledky v porovnání se studií Sims et Gamon (2002), který používal pro získávání spektrálních dat polní spektrometr, nižší.

Index $R735/R700$ byl do této práce zařazen na základě studie Gitelson et al. (1999). Ten vychází z předpokladu, že absorpce a odrazivost mezi 700 nm – 710 nm je více senzitivní k obsahu chlorofylu. Naopak od vlnové délky 735 nm je senzitivita reflektance i absorpce minimální. Poměrem těchto dvou hodnot vznikl algoritmus, který je podle uvedené studie citlivý k celkovému obsahu chlorofylu listech. To bylo i dokázáno, kdy regrese mezi indexem $R735/R700$ a koncentrací chlorofylu dosahovala u vzorků z *Fagus sylvatica* L. $R^2=0.96$ (0.27). Měření odrazivosti bylo prováděno pomocí polního spektrometru, nikoli letecky. Opět je zde tedy těsnější výsledek vlivem použité metody snímání spektrálních vlastností.

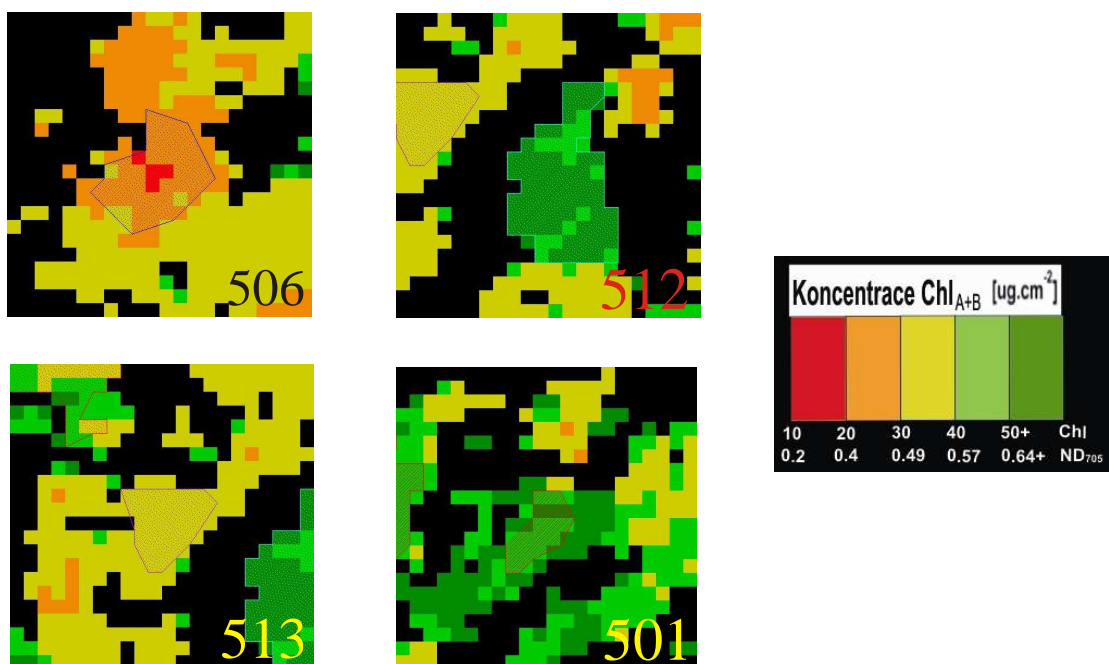
V práci nebyl kladen důraz na výběr indexu, který by byl nejvíce senzitivní k obsahu chlorofylu, ani na vývoj nového algoritmu, který by byl zaměřen na *Fagus sylvatica* L. Vycházel jsem z předpokladu, že červená část spektra (mezi 685 a 765nm) je nejvíce citlivá ke stresu, a tedy ke koncentraci chlorofylu v listech (Treitz et Howarth 1999). Mnou použité algoritmy pracují s červenou částí spektra, výsledky u většiny z nich jsou signifikantní a tím tento předpoklad o pozitivním vztahu mezi červenou částí spektra a koncentrací chlorofylu v listech potvrzují.

7.4 Chlorofylová mapa

Chlorofylová mapa byla vytvořena na základě indexu ND_{705} , který vykazoval nejvyšší korelaci, a to $\rho = 0.412$. Výsledná korelace není ve srovnání s jinými studii příliš těsná (Sims and Gamon 2002, Mišurec et al. 2012), přesto výsledek vyšel průkazně a je možné s ním dále pracovat. Hodnoty v předložené chlorofylové mapě odpovídají těsnosti vztahu mezi indexem a koncentrací chlorofylu.

Konkrétní jedince v chlorofylové mapě můžeme vidět na obr.č.14. Zájmové polygony ROI většinou neobsahují pouze jednu kategorii pixelu, ale většinou 2-3 kategorie. Vždy však jedna kategorie v polygonu převládá.

Obr.č.14: Dohledané koruny promítnuté na výslednou chlorofylovou mapu. Čísla v rohu jsou ID stromů. Podle barev pixelů je možné odhadnout, jaký je jejich zdravotní stav.



Predikovat hodnoty mimo danou škálu by nám umožnily metody radiativního transferu popsané např. v Blackburn (1998b), Zarco-Tejada et al. (2001) nebo Haboudane et al. (2002), z kterých vyzdvihují zejména metodu PROSPECT, DART a SAIL. Tyto metody jsou komplexní a využívají pro odhad několika kritérií. Např. PROSPECT počítá s koncentrací N (dusík), koncentrací Chl_{A+B}, ekvivalentem vodního sloupce (obsah vody) C_w a obsahem sušiny C_m . Pomocí těchto metod bychom mohli dosáhnout lepších výsledků a to nejen na lokální úrovni.

8 Závěr

V práci byla pomocí obrazové spektroskopie dokázána statistická závislost mezi spektrálními vlastnostmi vegetace a koncentrací chlorofylu A+B v listech, a to za použití spektrálních snímků s vysokým spektrálním i prostrovým rozlišením. Bylo dosaženo cílů práce v podobě popsané funkční metodiky, odhadu zdravotního stavu porostu a vytvořením chlorofylové mapy.

Práce též testovala stanovené hypotézy a na základě výsledků došla k těmto závěrům:

I) Spektrální vlastnosti se mění se změnou biochemických vlastností. Na základě sebraných vzorků bylo dokázáno, že koncentrace chlorofylu má vliv na výslednou reflektanční křivku. Strukturální vlastnosti nakonec nebyly zkoumány.

II) Vegetační indexy vypočítané ze spektrálních křivek korelují s koncentrací chlorofylu v listech, nejtěsnější vztah vykazují indexy založené na odrazivosti v červené části spektra.

III) Index ND705 měl ze všech indexů nejtěsnější regresi. Byl aplikován na celý porost v podobě chlorofylové mapy, která byla klasifikována do 5. kategorií. Jako ověření pravdivosti byly použité hodnoty vzorků, na jejichž základě byla mapa vytvořena. Toto ověření není dostatečné, protože nebyly použity nezávislé veličiny. Ověření pravdivosti této hypotézy může být provedeno až při opakovaném leteckém snímání a sběru vzorků.

I přesto, že neproběhla opakovaná verifikace, můžeme konstatovat, že výsledky statistické metody vyšly průkazně a pro další výzkum v oblasti hodnocení vitality listnatých porostů by mělo být přistoupeno k některým z metod radiativního transferu (PROSPECT, DART,...).

Na základě vyhodnocení proběhlého výzkumu mám pro jeho pokračování tato doporučení:

- 1) Načasování letecké, resp. pozemní kampaně na měsíc červen nebo červenec, kdy jsou stromy v plném vegetačním období (Kodani et al. 2000) a nehrozí sběr rostlinných orgánů v senescenci.
- 2) Využít některou z doporučovaných stromolezeckých technik pro sběr asimilačních orgánů (viz diskuse).
- 3) Na základě vytvořené chlorofylové mapy vyznačit potenciální transekty kde proběhne sběr vzorků.
- 4) V rámci pozemní kampaně použít technologii Field-Map (IFER,s.r.o.) pro zaznamenání dalších, zejména fenologických, charakteristik stromu.
- 5) Zjistit potenciál algoritmů zaměřujících se na automatické vylišení korun (rešerše).
- 6) Použít letecké snímání též pro korekci některých družicových systémů a zaměřit se na potenciální využití družic, nesoucích hyperspektrální senzory, pro zjišťování zdravotního stavu lesa.

Předložená práce potvrzuje využití leteckých hyperspektrálních snímků a metod obrazové spektroskopie k hodnocení zdravotního stavu listnatého lesa. Přesto, že byla použita jedna z nejjednodušších metod, výsledky jsou průkazné, chlorofylová mapa je na lokální úrovni použitelná a je třeba její hodnoty v budoucnu ověřit. Budoucí výzkum by měl pro zefektivnění prací do metodiky zahrnout má doporučení a dále se zaměřit především na využití metod radiativního transferu.

9 Literatura

Beck, P., S., A., Atzberger, C., Høgda, K., A., Johansen, B., Skidmore, A., K., Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*. 100:321-334.

Beranek, G.,F., 1998: The Fundamental of General Tree Work. Beranek Publications. California, 1996. ISBN 0-9654167-1-2.

Blackburn, G.,A., 1998: Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. *J. Remote Sensing*. 19(4): 657-675.

Blackburn, G. A., & Steele, C., M. 1999: Towards the remote sensing of matorral vegetation physiology: Relationships between spectral reflectance, pigment, and biophysical characteristics of semiarid bushland canopies. *Remote sensing of Environment*, 70(3), 278-292.

Blackburn, G.,A., 2007: Hyperspectral remote sensing of plant pigments. *Journal of Experimental Botany*, 58(4), 855-867.

Borengasser, M., Hungate, S., W., Watkins, R., 2008: *Hyperspectral Remote Sensing – principles and Applications*. CRC. ISBN 13: 978-1-56670-654-4.

Boyd,D., S., Danson, F., M., 2005 : Satellite remote sensing of forest resources : three decades of research development. *Progress in Physical Geography*, 29, 1-26.

Buschmann, C., Lenk, S., Lichtenthaler,H.,K., 2012: Reflectance spectra and images of green leaves with different tissue structure and chlorophyll content. *Israel Journal of Plant Sciences*, 60: 49-64.

Campbell, N.,A.,Reece, J.,B., 2002: *Campbell Biology*. San Francisco, Calif: Benjamin Cummings. ISBN 0805366245.

Carter, G. 1993: Response of leaf spectral reflectance to plant stress. *American Journal of Botany*, 80(3): 239-243.

Carter, G., A., Knapp, A., K., 2001. Leaf optical properties in higher plants: Linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany*. 88 (4): 677-684.

CNES, 2010: Spot satellite technical data. Online: http://www.astrium-geo.com/files/pmedia/public/r329_9_spotsatellitetechnicaldata_en_sept2010.pdf

Coppin, P.,R., Bauer, .,E., 1996: Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote Sensing Reviews*, 13, 3-4.

Curran, P. J., Dungan, J. L., Macler, B. A., & Plummer, S. E., 1991: The effect of a red leaf pigment on the relationship between red edge and chlorophyll concentration. *Remote Sensing of Environment*, 35(1), 69-76.

Damesin, C. (2003) Respiration and photosynthesis characteristics of current-year stems of *Fagus sylvatica*: from the seasonal pattern to an annual balance. *New Phytologist*, 158, 465–475.

Dell'Endice, F., Ničme, J., Koetz, B., Schaepman, M., E., Itten, K., 2009: Improving radiometry of imaging spectrometers by using programmable spectral regions of interest. *ISPRS*. 64(6): 632-639.

Demarez, V., Gastellu-Etchegorry, J., P., Mougin, E., Marty, G., Proisy, C., Dufrene, E., le Danec, V., 1999: Seasonal variation of leaf chlorophyll content of temperate forest. Inversion of the PROSPECT model. *International Journal of Remote Sensing* 20.5 (1999): 879-894.

Dobrovolný, P., 1998: Dálkový průzkum země, digitální zpracování obrazu. PF Masarykovy Univerzity, Katedra geografie. Brno 1998. ISBN 80-210-1812-7.

Doubrava, P., Jirásková, L., Petruřhová, J., Rouřhárová, ř., řeřicha, J., Suchánek, Z., 2011: Metody dálkového průzkumu země v projektu Národní inventarizace kontaminovaných míst. CENIA, Praha 96 p.. ISBN 978-80-85087-91-8.

Drake, N.A., Mackin, S., Settle, J.,J., 1999: Mapping Vegetation, Soils, and Geology in Semiarid Shrublands Using Spectral Matching and Mixture Modeling of SWIR AVIRIS Imagery. *Remote Sens. Environ.* 68:12-25.

Fairbanks, D. H., & McGwire, K. C., 2004: Patterns of floristic richness in vegetation communities of California: regional scale analysis with multi - temporal NDVI. *Global Ecology and Biogeography.* 13(3): 221-235.

Fischer, Ch., Kakuolli, I., Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications. *Studies in Conservation.* 1:3-16(14).

Franklin, S. E., 2001: Remote sensing for sustainable forest management. CRC. ISBN: 1-56670-394-8.

Folkman, M. A., Pearlman, J., Liao, L., & Jarecke, P. J., 2001: EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration. In *Proc. SPIE (Vol. 4151, pp. 40-51).*

Forshaw, M., R., B., Haskell, A., Miller, P., F., Stanley, D., J., Townshend, J.,R.,G., 1983: Spatial resolution of remotely sensed imagery A review paper. *International Journal of Remote Sensing.* 4(3): 497 – 520.

Gamon, J.,A., Field, C.,B., Goulden, M., L., Griffin, K., L., Hartley, A., E., Peñuelas, G.,J.,J.,Valentin, R., 1995: Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Application.* 5(1):28-41.

Gary, D., 2011: History of the NOAA Satellite Program, NOAA, online: <http://www.osd.noaa.gov/download/JRS012504-GD.pdf>.

Gates D.M., Keegan H.J., Schleter V.R., and Weidner V.R. 1965: Spectral properties of plants, Appl. Opt., 4(1), 11-20.

Gitelson, A., A. and Merzlyak, M., N., 1994: Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. Journal Plant Physiology. 143: 286 – 292.

Gitelson, A. A., Buschmann, C., & Lichtenthaler, H. K., 1999: The Chlorophyll Fluorescence Ratio F_{735}/F_{700} as an Accurate Measure of the Chlorophyll Content in Plants. Remote Sensing of Environment, 69(3), 296-302.

Gitelson, A., A., Gritz, Y., Merzlyak, M., N., 2002: Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. Journal of Plant physiology. 160, 271-282.

Gitelson, A., A., 2004: Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. Journal of Plant Physiology. 161: 165-173.

Glenn, E., P., Huete, A., R., Nagler, P., L., Nelson, S., G., 2008: Relationship Between Remotely-sensed Vegetation Indices, Canopy Attributes and Plant Physiological Processes: What Vegetation Indices Can and Cannot Tell Us About the Landscape. Sensors. 8:2136-2160.

Goetz, A., F., H., Vane, G., Solomon, J., E., Rock, B., N., 1985: Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. Science. 288 (4704), 1147 – 1153.

Gould, W. ,2000: Remote sensing of vegetation, plant species richness, and regional biodiversity hotspots. Ecological Applications. 10(6): 1861-1870.

Goward S.N., Tucker C.J. & Dye D.G., 1985: North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. *Vegetatio*. 64:3-14.

Goward S.N, Davis, P.,E., Fleming, D., Miller, L., Townshend, J.,R., 2003: Empirical comparison of Landsat 7 and IKONOS multispectral measurements for selected Earth Observation System (EOS) validation sites. *Remote Sensing of Environment*. 88(1-2):80-99.

Haboudane, D., Miller, J., R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.,J., Dextraze, L., 2002: Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*. 81, 416-426.

Jacquemoud, S., and Baret, F. 1990: PROSPECT: A model of leaf optical properties. *Remote Sensing of Environment*, 34, 75–91.

Hall, F., G., Huemmrich, K.,F., 1990: Use of narrow-band spectra to estimate the fraction of absorbed photosynthetically active radiation. *Remote Sensing of Environment*. 32(1):47-54.

Hermann, S., M., Anyamby, A., Tucker, C., J., 2005: Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environmental Change*. 15: 394-404.

HONGO, D., KAJIWARA, K., & HONDA, Y., 2001: Developing ground truth measurement system using RC helicopter and BRDF model in forest area. In Paper presented at the 22nd Asian Conference on Remote Sensing. 5: 9.

Huete, A., R., Liu, H., Q., Batchily, K., van Leeuwen, W., 1997: A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 59: 440-451.

Hunt, E., R., Daughtry, C., S., T., Eitel, J., Long, D., S., 2011: Remote Sensing Leaf Chlorophyll Content Using a Visible Band Index. *Agronomy Journal*, 103(4): 1090-1099.

Chaoyang, W., Zheng, N., Juan, T., Wenjiang, H., 2008: Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148 (8-9): 1230-1241.

Ke, Y., & Quackenbush, L. J., 2011: A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 32(17), 4725-4747.

Kodani, E., Awaya, Y., Tanaka, Matsumura, N., 2002: Seasonal patterns of canopy structure, biochemistry and spectral reflectance in a broad-leaved deciduous *Fagus Renata* canopy. *Forest Ecology and Management*, 167, 233-249.

Lichtenthaler, H. K., Wenzel, O., Buschmann, C., Gitelson, A., 1998: Plant Stress Detection by Reflectance and Fluorescence. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 851(1), 271-285.

Liu, Z., Wu, J., Yang, H., Li, B., Zhang, Y., & Yang, S., 2009: Developing unmanned airship onboard multispectral imagery system for quick-response to drinking water pollution. In *Proc. of SPIE*. Vol. 7494: 74940L-1.

Lu, D., Batistella, M., Miranda, E., Moran, E., 2008: A Komparative Study of Landsat TM and SPOT HRG Images for Vegetation Classification in the Brazilian Amazon. *Photogramm Eng Remote Sensing*. 2008; 74(3): 311–321.

le Maire, G., Francois, C. & Dufrene, E. (2004). Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements.

Remote Sensing of Environment, 89, 1_28.

le Maire, G., François, C., Soudani, K., Berveiller, D., Pontailier, J. Y., Bréda, N., ... Dufrêne, E., 2008: Calibration and validation of hyperspectral indices for the estimation of broadleaved forest leaf chlorophyll content, leaf mass per area, leaf area index and leaf canopy biomass. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3846-3864.

Malenovský, Z., 2006: Quantitative remote sensing of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.): Spectroscopy from needles to crowns to Canopies. PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, 141 s. ISBN 90 – 8504 – 503 – 7.

Malenovský, Z., Homolová, L., Zužita-milla, R., Lukeš, P., Kaplan, V., Hanuš, J., Gastellu-Etchegorry, J.P., Schaepman, M.E., 2013: Retrieval of spruce leaf chlorophyll content from airborne image data using continuum removal and radiative transfer. *Remote Sensing of Environment*. 131 (2013), 85-102.

Marková, I., Pavelka, M., Tomášková, I., Janouš, D., 2012: Ročenka meteorologických měření 2010, Experimentální ekologické pracoviště Bílý Kříž (Moravskoslezské Beskydy) a Ekosystémová stanice Štítná nad Vláří (Bílé Karpaty. Centrum výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i.. Brno, 2012. ISBN 978-80-904351-4-8.

Martin, M. E., Newman, S. D., Aber, J. D., & Congalton, R. G., 1998: Determining forest species composition using high spectral resolution remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*. 65(3): 249-254.

Mehta, A., 2011: Introduction to the Electromagnetic Spectrum and Spectroscopy, PharmaXChange.info. Online: <http://pharmaxchange.info/press/2011/08/introduction-to-the-electromagnetic-spectrum-and-spectroscopy/>. cit. 25.2.2012.

Mišurec, J., Kopačková, V., Lhotakova, Z., Hanuš, J., Weyermann, J., Entcheva-Campbell, P., Albrechtová, J., 2012: Utilization of hyperspectral image optical indices to assess the Norway spruce forest health status. *Journal of Applied Remotesensing*. Vol. 6.

Moss, R., A., and Loomis, W., E., 1951: Absorption spectra of leaves. I. the visible spectrum. *Plant Physiology*. 27(2): 370-391.

Myneni, R. B. and Ross, J., 199: Photon - vegetation interactions: applications in optical remote sensing and plant ecology. Berlin, Springer-Verlag, pp. 230-250.

Němcová I., Čermáková L., Rychlovský P.: *Spektrometrické analytické metody I*, Univerzita Karlova - Karolinum, Praha 1997.

Němec, Jan, ed. a Hrib, Michal, 2009: *Lesy v České republice*. Praha: Lesy ČR:2009. 399 s. ISBN 978-80-903482-5-7.

Nishio, J., N., 2000: Why are higher plants green? Evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement. *Plant, Cell and Environment*. 23, 539 – 548.

Oupický, P., 2013: *Analýza dat a spektrálního rozlišení spektrometrů s řádkovými senzory*. Oddělení optické diagnostiky, Trutnov, ÚFP AV ČR, v.v.i.. NEPUBL. Online: <http://www.cbks.cz/upice2009/53.pdf>

Porra, R. J., Thompson, W. A., & Kriedemann, P. E., 1989: Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 975(3), 384-394.

Pearlman, J., Carman, S., Segal, C., Jarecke, P., Clancy, P., & Browne, W., 2001: Overview of the Hyperion imaging spectrometer for the NASA EO-1 mission. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS'01. IEEE 2001 International (Vol. 7, pp. 3036-3038)*. IEEE.

Porter, W. M., & Enmark, H. T., 1987: A system overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). In *31st Annual Technical Symposium . International Society for Optics and Photonics*, pp. 22-31.

Pu, R., Gong, P., Biging, G. S., & Larrieu, M. R., 2003: Extraction of red edge optical parameters from Hyperion data for estimation of forest leaf area index. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on.* 41(4), 916-921.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S., 1994: A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment.* 48: 119–126.

Richardson, A., D., Berlyn G., P., Gregore, T., G., 2001: Spectral reflectance of *Picea rubens* (Pinaceae) and *Abies balsamea* (Pinaceae) needles along an elevational gradient, Mt. Moosilauke, New Hampshire, USA. *American Journal of Botany.* 88 (4): 667-676.

Rocchini, D., Ricotta, C., & Chiarucci, A., 2009: Using satellite imagery to assess plant species richness: the role of multispectral systems. *Applied Vegetation Science.* 10(3): 325-331.

Rock, B. N., Hoshizaki, T., & Miller, J. R., 1988: Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. *Remote Sensing of Environment.* 24(1): 109-127.

Rozañov, V., V., Diebel, D., Spurr, R., J., D., Burrows, J., P., 1997: GEOMETRAN: A radiative transfer model for satellite project GOME, the plane-parallel version. *Journal of geophysical research,* 102, 683-695.

Running, S. W., Nemani, R. R., Heinsch, F. A., Zhao, M., Reeves, M., & Hashimoto, H., 2004: A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience.* 54(6): 547-560.

Sampson, P. H., P. J. Zarco-Tejada, G. H. Mohammed, J. R. Miller, and T. L. Noland. 2003: Hyperspectral remote sensing of forest condition: Estimating chlorophyll content in tolerant hardwoods, *Forest Science,* 49(3), 381–391.

Schaepman, M. E., Ustin, S. L., Plaza, A. J., Painter, T. H., Verrelst, J., & Liang, S., 2009: Earth system science related imaging spectroscopy—An assessment. *Remote Sensing of Environment*, 113: 123-137.

Short, N.,M.,2005: The Remote Sensing Tutorial. Federation of American Scientists. online: <http://www.fas.org/irp/imint/docs/rst/Front/tofc.html>

Sugiura, R., Noguchi, N., & Ishii, K. (2005). Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosystems engineering*. 90(4): 369-379.

Saika, A., 2009: NDVI Variability in North East India. *Scottish Geographical Journal*. 125(2): 195-213.

Sellers, P. J., 1985: Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, 6(8), 1335-1372.

Schneider, S. & McGinnis, Jr., D., 1977. Spectral differences between VHRR and VISSR data and their impact of environmental studies. In: *Proceedings Amer. Soc. Photogrammetry*, 43 Meeting 27 February to 5 March 1977. Washington, DC.

Sims, D., A., Gamon, J., A., 2002: Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote sensing of Environment*, 81 (2-3): 337-354.

Stiegler, J.,C., Bell, G.,E., Maness, N., O., 2005: Comparison of Acetone and *N,N*-Dimethylformamide for Pigment Extraction in Turfgrass. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 35, 13-14.

Sugiura, R., Noguchi, N., & Ishii, K., 2005: Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosystems engineering*,90(4), 369-379.

Treitz, P. M., & Howarth, P. J., 1999: Hyperspectral remote sensing for estimating biophysical parameters of forest ecosystems. *Progress in Physical Geography*, 23(3), 359-390.

Tucker, C., J., 1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2): 127-150.

Turner, D. P., Ritts, W. D., Cohen, W. B., Maersperger, T. K., Gower, S. T., Kirschbaum, A. A., ... & Gamon, J. A., 2005: Site - level evaluation of satellite - based global terrestrial gross primary production and net primary production monitoring. *Global Change Biology*. 11(4): 666-684.

USGS, 2012: Landsat: A Global Land-Imaging Mission, Solux Falls, online: <http://pubs.usgs.gov/fs/2012/3072/fs2012-3072.pdf> , 27.12.2012.

Verhoef, W., 1984: Light scatteringy leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16, 125-141.

VERRELST, J., 2010: Space-borne spectrodirectional estimation of forest properties. PhD Thesis. University of Zurich, Switzerland. Online: http://www.geo.uzh.ch/fileadmin/files/content/abteilungen/rs11/Publications/PhD_Theses/2010_JochemVerrelst.pdf

Vierling, L. A., Fersdahl, M., Chen, X., Li, Z., & Zimmerman, P., 2006: The Short Wave Aerostat-Mounted Imager (SWAMI): A novel platform for acquiring remotely sensed data from a tethered balloon. *Remote sensing of environment*.103(3): 255-264.

Wiegand, C. L., & Richardson, A. J. (1990). Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: I. Rationale. *Agronomy Journal*. 82(3): 623-629.

Xiao X., Boles S., Liu J., Zhuang D., Liu M., 2002: Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 82, 335-348.

Xiao, X., Hollinger, D., Aber, J., Goltz, M., Davidson, E. A., Zhang, Q., & Moore, B., 2004: Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*. 89(4): 519-534.

Xiao, X., Zhang, Q., Saleska, S., Hutyyra, L., De Camargo, P., Wofsy, S., ... & Moore, B., 2005: Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*. 94(1): 105-122.

Xie, Y., Sha, Z., Yu, Mei, 2007: Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*. 1(1): 9-23.

Yongjun, Z. H. A. N. G., 2009: Geometric Processing of Low Altitude Remote Sensing Images Captured by Unmanned Airship [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. 3: 008.

Yu, Q., Gong, P., Clinton, N., Biging, G., Kelly, M., & Schirokauer, D., 2006: Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 72(7): 799 – 811.

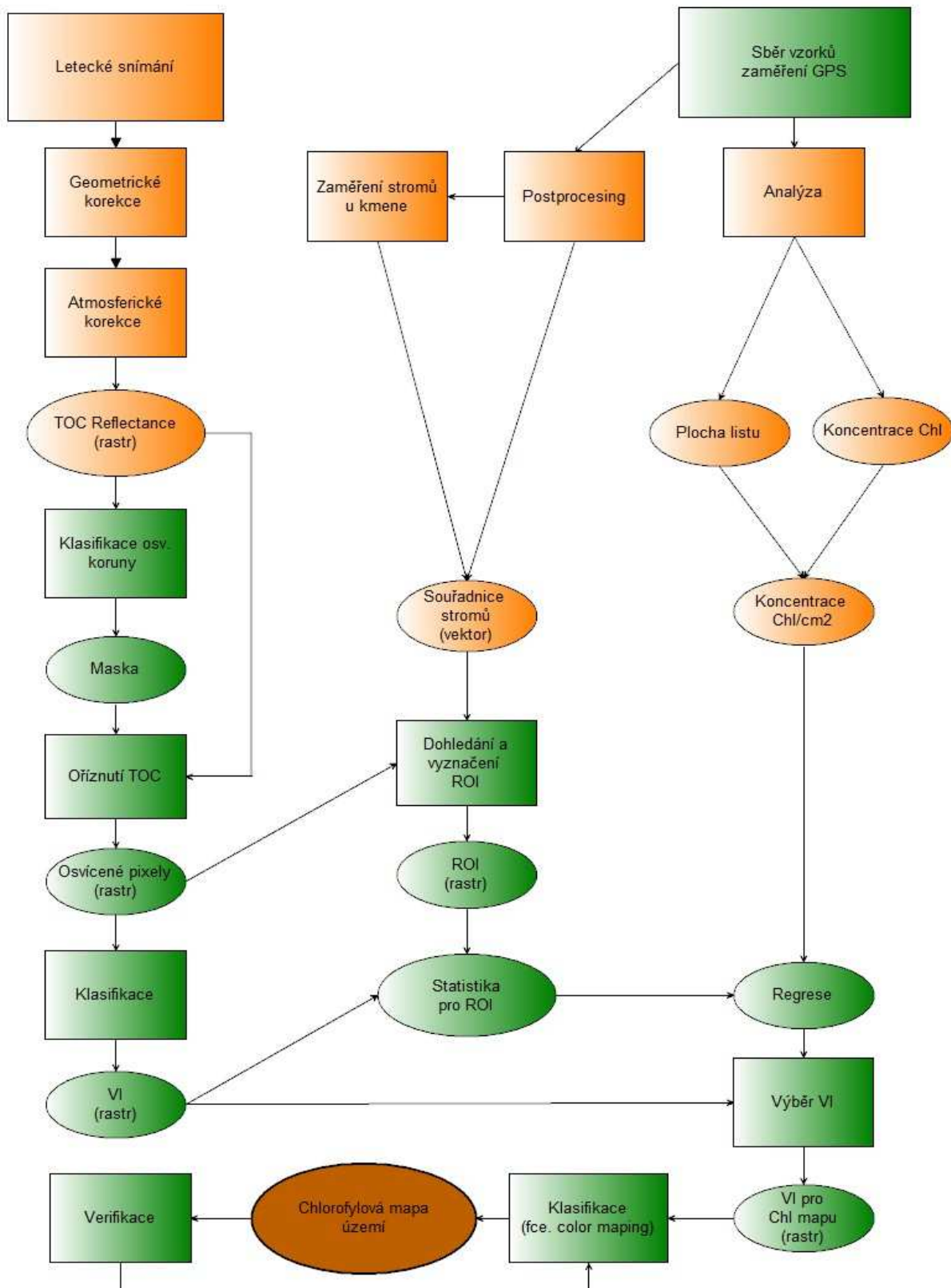
Zarco-Tejada, P. J., Miller, J. R., Noland, T. L., Mohammed, G. H., & Sampson, P. H., 2001: Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 39(7), 1491-1507.

Zhang, Y., 2008: Photogrammetric processing of low altitude image sequences by unmanned airship. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*. 37: 751-757.

Zhao, D., K Raja.,R., Kakani, V.,G., Read, J.,J., Koti, S., 2005: Selection of Optimum Reflectance Ratios for Estimating Leaf Nitrogen and Chlorophyll Concentrations of Field-Grown Citron. *Agronomy Journal*. 97(1): 89-98.

10 Přílohy

Příloha č.1 Diagram metodiky. Oranžově jsou vyznačené procesy a výstupy, které vytvářel VÚ Czechglobe. Ostatní zeleně označená okýnka jsem spracovával já.



Příloha č. 2: Chlorofylová mapa území