

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE



FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A ÚZEMNÍHO PLÁNOVÁNÍ

VYUŽITÍ SPEKTRÁLNÍCH INDEXŮ PRO SLEDOVÁNÍ
ZMĚN V KRAJINĚ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.

Bakalant: Jan Vavřín

2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Vavřín

Krajinářství

Název práce

Využití spektrálních indexů pro sledování změn v krajině

Název anglicky

The use of spectral indices for land changes monitoring

Cíle práce

Zpracovat rešerši k problematice spektrálních indexů a popsat nejvýznamnější změny, které lze sledovat v rámci monitorování krajiny.

Na základě rešerše vyhodnotit, jaké spektrální indexy jsou nejvhodnější ke sledování změn v krajině a určit, které indexy jsou nejvhodnější a nejvíce využívané k různým typům krajiny.

Metodika

Nejprve se autor seznámí s problematikou metod dálkového průzkumu Země a jejich využití v monitorování krajiny. V rámci literární rešerše dále popíše nepoužívanější spektrální indexy a následně z nich vybere ty, které se hodí pro popis změn v krajině. V rámci rešerše autor také určí, jaké změny v krajině jsou nejlépe detekovatelné, jak je mohou vybrané indexy identifikovat a proč se vybrané indexy hodí k detekci daných problémů v krajině.

Doporučený rozsah práce

30-50 stran

Klíčová slova

Spektrální indexy, dálkový průzkum Země, krajina, Land Use

Doporučené zdroje informací

- Dobrovolný, P. (1998). Dálkový průzkum Země, digitální zpracování obrazu. Masarykova univerzita v Brně, 210 s.
- Dymond, C. C., Mladenoff, D. J., Radeloff, V. C. (2001). Phenological differences in Tasseled Cap indices improve deciduous forest classification. *Remote Sensing of Environment*, 80 (2002), 460–472.
- Halounová, L. & Pavelka, K. (2008). Dálkový průzkum Země. Vydavatelství ČVUT, Praha, 192 s.
- Jones, H. G. & Vaughan, R. A. (2010). *Remote sensing of vegetation: Principles, techniques, and applications*. Oxford University Press, Oxford, New York.
- Julien, Y., Sobrino, J. A. & Jiménez-Muñoz, J.-C. (2011). Land use classification from multitemporal Landsat imagery using the Yearly Land Cover Dynamics (YLCD) method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 711-720.
-

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FŽP

Vedoucí práce

Mgr. Jitka Kumhálová, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 17. 4. 2017

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 18. 4. 2017

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 21. 04. 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Mgr. Jitky Kumhálové, PhD. a že jsem uvedl veškeré literární prameny, ze kterých jsem čerpal informace.

V Praze dne 25. dubna 2017

.....
Jan Vavříň

Poděkování

Děkuji Mgr. Jitce Kumhálové, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a trpělivost projevenou při mém vypracovávání této práce. Dále děkuji Lucii W. za podporu.

Abstrakt

Cílem této práce je shrnout základní fakta z problematiky spektrálních indexů, jejich principu a využití, na základě rešerše dostupných zdrojů pojednávajících o dálkovém průzkumu Země. Užší pohled bude zaměřen na použití spektrálních indexů pro studium změn krajiny.

První část práce se zabývá rozlišením změn v krajině a možnostmi jejich detekce v disciplíně dálkového průzkumu.

Následující část popisuje fyzikální podstatu a okolnosti přenosu informací mezi snímací technikou a objekty zemského povrchu, popisem spektrálního projevu běžných materiálů v krajině. Součástí je i uvedení známějších spektrálních indexů.

V závěru práce jsou shrnuty poznatky z nastudované literatury o užívání spektrálních indexů v praxi a současných trendech tématu.

Klíčová slova

odrazivost, vegetační index, elektromagnetické záření, krajinný pokryv, vegetace

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to sum up the basic facts of the issue of spectral indices and their principles and usage, based on a research into the available sources which deal with Earth remote sensing. Further attention will be paid to the usage of spectral indices for studying the land changes.

The first part of the thesis focuses on the division of land changes and the possibilities of their detection in the field of remote sensing.

The next part describes the physical essentials and circumstances of the transmission of information between the sensing technique and the objects of the Earth surface. It also describes the spectral characteristics of common materials of landscape. Another part states the most known spectral indices.

The work is concluded by a summary of knowledge gained from the studied literature about the usage of spectral indices in praxis and about the current trend of this issue.

Key words

reflectance, vegetation index, electromagnetic radiation, land cover, vegetation

Obsah

1	Úvod	12
	Uvedení do problematiky práce	13
2	Změny krajiny	13
2.1	Analýza multitemporálních dat DPZ	14
2.1.1	Diference obrazů	15
2.1.2	Obrazové podíly	15
2.1.3	Regresní závislost dvou obrazů	16
2.1.4	Multitemporální barevná syntéza	16
2.1.5	Porovnání výsledků klasifikace	16
2.1.6	Analýza vektoru spektrální změny	16
2.2	Kvantitativní změny krajiny	17
2.3	Kvalitativní změny krajiny	18
3	Principy dálkového průzkumu Země	19
3.1	Elektromagnetické záření	19
3.2	Interakce elektromagnetického záření s látkami	22
3.2.1	Vliv atmosféry	23
3.3	Pořizování dat DPZ	24
4	Zářivé vlastnosti krajinných prvků	25
4.1	Spektrální projev vody	27
4.2	Spektrální projev povrchů bez vegetace	28
4.2.1	Půda	28
4.2.2	Horniny a minerály	29
4.3	Vegetace	29
4.3.1	Spektrální vlastnosti listové plochy	29
	Oblast pigmentační absorpce	30
	Oblast vysoké odrazivosti	31

	Oblast vodní absorpce	31
5	Vegetační indexy	32
5.1	Poměrové indexy	32
5.1.1	Simple Ratio (SR).....	33
5.1.2	Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	33
5.1.3	Transformed Vegetation Index (TVI).....	35
5.1.4	Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)	35
5.1.5	Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI).....	36
5.1.6	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI).....	36
5.1.7	Atmospherically Resistent Vegetation Index (ARVI)	37
5.1.8	Normalizovaný Red-edge Index (NRERI)	37
5.1.9	Enhanced Vegetation Index (EVI).....	37
5.2	Ortogonální indexy	38
5.2.1	Leaf Area Index (LAI).....	38
5.2.2	Difference Vegetation Index (DVI)	38
5.2.3	Weighted Difference Vegetation Index (WDVI)	38
5.2.4	Perpendicular Vegetation Index (PVI).....	39
5.2.5	Transformace Tasseled Cap.....	40
5.3	Úzkopásmové vegetační indexy	41
5.3.1	MERIS Terrestrial Chlorophyll Index.....	41
5.3.2	Pigment-Specific Normalized Simple Ratio (PSNDa).....	42
5.3.3	Photochemical Reflectance Index (PRI)	42
5.3.4	Cellulose Absorption Index (CAI).....	42
5.4	Vodní indexy.....	42
5.4.1	970 Water Band Index (WBI).....	42
5.4.2	Leaf Water Index (LWI).....	43
5.4.1	Normalized Difference Water Index (NDWI ₁₂₄₀)	43
6	Závěr a Diskuze.....	44
7	Citovaná literatura.....	46

Přehled použitých zkratk

DPZ – dálkový průzkum Země

RGB – model Red Green Blue

VI – vegetační index

LC – land cover, krajinný pokryv

IR – infrared, infračervené záření

NIR – near infrared, blízké infračervené záření

IČ – infračervené záření

Red – červené viditelné záření

Green – zelené viditelné záření

Blue – modré viditelné záření

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration, americká vědecká agentura

AVHRR – Advanced very-high-resolution radiometer, typ družicového senzoru

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, družicový systém

1 Úvod

Dálkový průzkum Země a s ním spojené užívání spektrálních indexů přináší velkou škálu možností práce s daty o zemském povrchu, jeho využívání, struktuře a dynamice v zemědělství, lesnictví, územním plánování, environmentálním modelování, logistice a mnoha dalších disciplínách.

Spektrální indexy jsou poměrně jednoduchým nástrojem, který z dat získaných distančními či pozemními metodami umí zvýraznit vegetační složku krajiny. Ta je jako všudypřítomný objekt klíčová pro zkoumání stavů a funkcí jednotlivých lokalit.

Vědecká komunita zná přes 150 různých vegetačních indexů (Křížová, 2016). Cílem této práce je uvést širěji známou část z nich a popsat jejich význam laické veřejnosti.

V návaznosti na teoretickou rešerši je provedeno shrnutí získaných poznatků o užívání indexů napříč literaturou.

Uvedení do problematiky práce

2 Změny krajiny

Krajina jako soubor mnoha krajinných složek prodělává přirozeně řadu změn v čase. Změny krajiny jsou podle Lipského (1998) působeny krajino tvornými procesy: vnitřními, vnějšími, biotickými, abiotickými, přírodními i antropogenními. Mohou nastat během minut (zemětřesení, protržení hráze, požár aj.), může k nim docházet během delšího období – vlivem odlesňování, desertifikace, rozšiřování sídel, též vlivem sukcese, eroze a jiných geomorfologických procesů (Lipský, 1998).

Změny kulturní krajiny jsou v největší míře závislé na aktuální činnosti člověka i výsledcích jeho historických aktivit. Dynamiku nezpůsobují pouze jeho záměrné zásahy, nýbrž i události na ně navázané. I lehce ovlivněné lokality prodělávají snáze disturbance. (Burel, a další, 2003)

Sledování změn krajiny v čase spočívá v sledování jednotlivých krajinných složek, jejich prostorové konfigurace, zastoupení a dynamiky (expanze nebo regrese) (Lipský, 1998).

„Z hlediska dostatečně podrobného pozorování změn krajiny a její časové proměnlivosti jsou nejvýhodnější a nejčastěji používány stacionární a distanční metody sběru dat,“ konstatuje se v publikaci (Metody studia změn krajiny, 2007 str. 85). Výhodami prvních sledává autor příspěvku vysokou podrobnost, rozmanitost a frekvenci pozorování. Nevýhodou jejich vztah k omezené ploše. U metod distančních vyzdvihuje přehlednost, širší záběr pro rozsáhlejší teritoria, nižšími náklady. Oproti tomu přisuzuje metodám *„zpravidla nižší podrobnost (danou rozlišovací schopností materiálů, která však díky technickému pokroku mimořádně rychle vzrůstá) a potřebu složité interpretace pořízené "surové" informace.“*

„Celkové změny v krajině a ve způsobu využívání krajiny se nejvýhodněji monitorují pomocí časové řady leteckých, případně družicových snímků, které nejlépe zobrazují narušení, plošné devastace, změny krajinné struktury, velikosti zrna, mozaikovitosti, proměny krajinné matrice, dynamiku vývoje enkláv a další parametry krajinné struktury,“ uvádí Lipský (1998 str. 78).

Maťašová (2015 ex Feranec, 1992) rozčleňuje změny sledovaných objektů v dálkovém průzkumu Země (dále jen DPZ) v čase na tři základní skupiny:

1. Kvantitativní změny – minimální změny spektrálních charakteristik, změny prostorové
2. Kvalitativní změny – změny ve spektrálních charakteristikách, prostorové charakteristiky zachovány
3. Kvantitativní i kvalitativní změny – změny ve spektrálních i prostorových charakteristikách

Uvedené typy změn jsme schopni sledovat na základě změny odrazivosti/ emisivity (viz kapitolu *Principy dálkového průzkumu Země*) totožného objektu napříč snímky. Ne vždy ale pozorovaná změna spektrálních vlastností souvisí s jevy, které sledujeme. Může jít jen o změnu vlhkosti, geometrie pohledu či osvětlení scény. V procesu je tedy důležité rozpoznat změny podstatné od nepodstatných (Dobrovolný, 1998).

Obrazová data pořizovaná distančními metodami je možné pro dané místo získávat opakovaně, tím vytvořit časovou řadu. Taková data označujeme jako multitemporální.

2.1 Analýza multitemporálních dat DPZ

Podle Jensena (2005) mají data k multitemporální analýze splňovat několik podmínek: Obrazy minimálně dvoučlenné chronologické řady mají být pořízeny snímacím zařízením pravidelné periody přeletu snímacího zařízení, být pořízeny ve stejnou denní a roční dobu, ve stejném měřítku, nasnímány pod stejným úhlem, ve stejných spektrálních pásmech a se stejným radiometrickým rozlišením. V dalších kapitolách práce zmiňované atmosférické korekce (kapitola 3.2.1) jsou též neopomenutelným krokem.

Techniky analýzy analogových multitemporálních dat sestávají zejména z vizuálního porovnávání snímků. Jsou to metody časově náročné, jejich výsledky nelze kvantifikovat. Výhodou je schopnost lidského myšlení hodnotit kontext objektů, jejich tvar i polohu komplexněji než umělá inteligence. Analogová data lze pro jiná použití digitalizovat.

Analýza multitemporálních dat v digitální formě skýtá řadu výhod. Především, vzhledem k charakteru rastrových dat, je to snadnost a rychlost, možnost zjištěné změny kvantifikovat. Nutností je, aby byly srovnávané snímky geometricky korigovány s přesností minimálně $\frac{1}{2}$ pixelu (Dobrovolný, 1998). Následující odstavce představí techniky, jimiž se sledují změny na digitálních snímcích:

2.1.1 Diference obrazů

Principem této techniky je odečítání radiační hodnoty jednoho snímku od druhého u odpovídajících si obrazových prvků. Výsledné nenulové hodnoty značí změnu, nulové prvky beze změny. Tupin a kol. (2014) uvádí vzorec této techniky, který na rozdíl od vzorce obecného, skýtá výhody vyhlazení odchylek a potlačení šumu:

$$\tilde{D}_{(I_1 I_2)}(m, n, \lambda)^{diff} = \frac{1}{K \times L} \sum_{k=-K/2}^{K/2} \sum_{l=L/2}^{L/2} [I_1(m-k, n-l, \lambda) - I_2(m-k, n-l, \lambda)] \quad (1)$$

Kde $\tilde{D}_{(I_1 I_2)}(m, n)^{diff}$ je hodnota změny obrazového elementu

k, l – určují rozměry vyhlazovacího pole

$I(m-k, n-l, \lambda)$ – radiační hodnota snímku

m, n – souřadnice obrazového elementu

λ – hodnota spektrálního indexu

Uvedenou technikou je možné pořídít obraz změn v každém pásmu. Hodnoty mají přibližně normální rozdělení. Důležitým krokem je následné stanovení prahových hodnot mezi změněnými a nezměněnými obrazovými elementy (Dobrovolný, 1998). Jensen (2005) konstatuje, že pro jejich úspěšné nalezení je nutnou podmínkou detailní znalost studovaného území.

2.1.2 Obrazové podíly

Postup této techniky, vyjádřené obecným vzorcem níže, skýtá výhody v eliminaci změněných podmínek snímání, například změny polohy Slunce. Takový přístup zvyšuje pravděpodobnost přesnějšího určení podstatných změn. Matematický zápis obrazových podílů je následující:

$$\tilde{D}_{(I_1 I_2)}(m, n, \lambda)^{diff} = \frac{I_1(m-k, n-l, \lambda)}{I_2(m-k, n-l, \lambda)} \quad (2)$$

kde je význam symbolů analogický jako v předchozím vzorci.

Tentokrát značí změnu pixelu hodnota různá od 1,0. Pixely výsledného obrazu mají opět normální rozdělení.

2.1.3 Regresní závislost dvou obrazů

Principem metody je vytvoření třetího „pracovního“ snímku tak, že je hodnota každého obrazového bodu prvního snímku přepočítána metodou nejmenších čtverců. Vzniká tak snímek z bodů o hodnotách, které se diferencí korespondujících bodů v novém snímku s těmi v druhém porovnávají.

2.1.4 Multitemporální barevná syntéza

Dalším způsobem je vizualizovat obrazy v systému RGB (Red Green Blue). Odpovídající pixely beze změn vlastností v čase budou vyvedeny v odstínu šedi, barevně pak ty, které se změnily. Je třeba správně definovat barevné odstíny pro jednotlivé třídy velikosti změn. Jako vstupní hodnoty pixelů se často užívají transformovaná pásma nebo hodnoty vegetačního indexu (dále jen VI, viz *Vegetační indexy* dále) (Dobrovolný, 1998).

2.1.5 Porovnání výsledků klasifikace

Nezávislou klasifikací, seskupením dat datového souboru podle vzájemné podobnosti do tříd, stejného území v čase podle stejného klasifikačního schématu získáme přehled o oblastech změn i o podstatě těchto změn. Přesnost techniky limituje přesnost užití klasifikace. Do procesu mohou vstupovat pixely již klasifikované do tříd krajinného pokryvu, pixely nesoucí informaci o odrazivých vlastnostech území (v takovém případě je vhodné redukovat počet vstupujících pásem), VI aj.

2.1.6 Analýza vektoru spektrální změny

Poslední z uvedených metod staví opětovně na předpokladu, že se změna objektů v krajině projevuje změnou jejich spektrálních charakteristik. Vyneseme-li do souřadnicového systému dvě proměnné snímku (např. data ze dvou pásem nebo spektrální indexy) pro dva snímky stejného území (lišící se datem pořízení), získáme spojením vzniklých bodů vektor spektrální změny. Ten popisuje velikost a charakter změny ve spektrálním chování mezi dvěma časovými horizonty. Charakter je popsán směrem vektoru, určený úhlem mezi počátečním směrem a oním vektorem, velikost změny je definována jako velikost vektoru ze vzorce:

$$V = \sqrt{[DN1(T1) - DN1(T2)]^2 + [DN2(T1) - DN2(T2)]^2}$$

(3)

Kde V – velikost vektoru, hodnota pixelu výsledného obrazu

$DN1(T1)$ – hodnota pixelu 1 v prvním použitém pásmu

DN2(T2) – hodnota pixelu 2 v druhém použitém pásmu

T1 – první zpracovávané datum

T2 – druhé zpracovávané datum

(Dobrovolný, 1998)

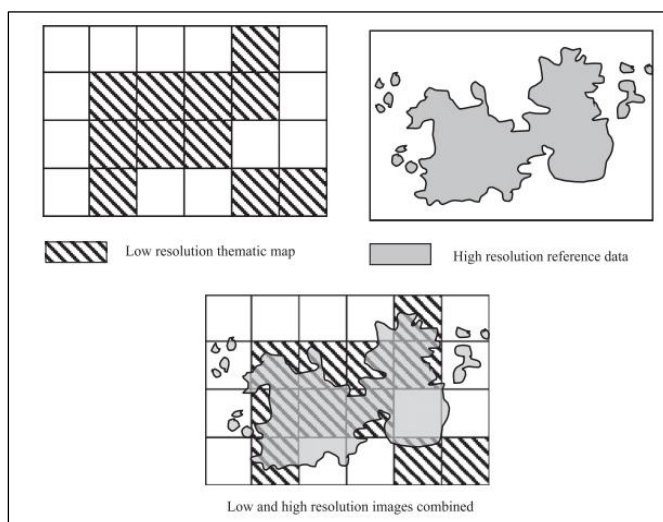
2.2 Kvantitativní změny krajiny

V souladu s rozdělením změn krajiny dle Ferance (viz kapitolu *Změny krajiny*) pojmám kvantitativní změny jako změnu výskytu určitého typu krajinného pokryvu (land cover) na sledované lokalitě, potažmo snímku.

Mapa krajinného pokryvu CORINE Land Cover, vytvořená na podkladě snímků v hodnotách NDVI, vydaná Evropskou komisí, obsahuje 44 tříd. Mimo informace o rozložení krajinného pokryvu, obsahuje i vrstvy jeho změn v průběhu let.

Jak uvádí autor příspěvku v publikaci (Multi-temporal Remote Sensing Analytics Approaches for Characterizing Landscape Change, 2001), charakterizace typů land cover (dále jen LC), jejich rozlohy a rozložení v čase, je důležitým prvkem pro studium podmínek ekosystémů. Minulé, jakož i současné technologie snímání jsou cenově dostupným zdrojem dat pro sledování těchto charakteristik. Doposud se vědecké výzkumy zabývaly základními otázkami problematiky s výstupy malého měřítka. Nyní se již mnoho výzkumníků zabývá detekcí změn na úrovni regionů. Jsou dvě překážky, které při tom musejí překonat:

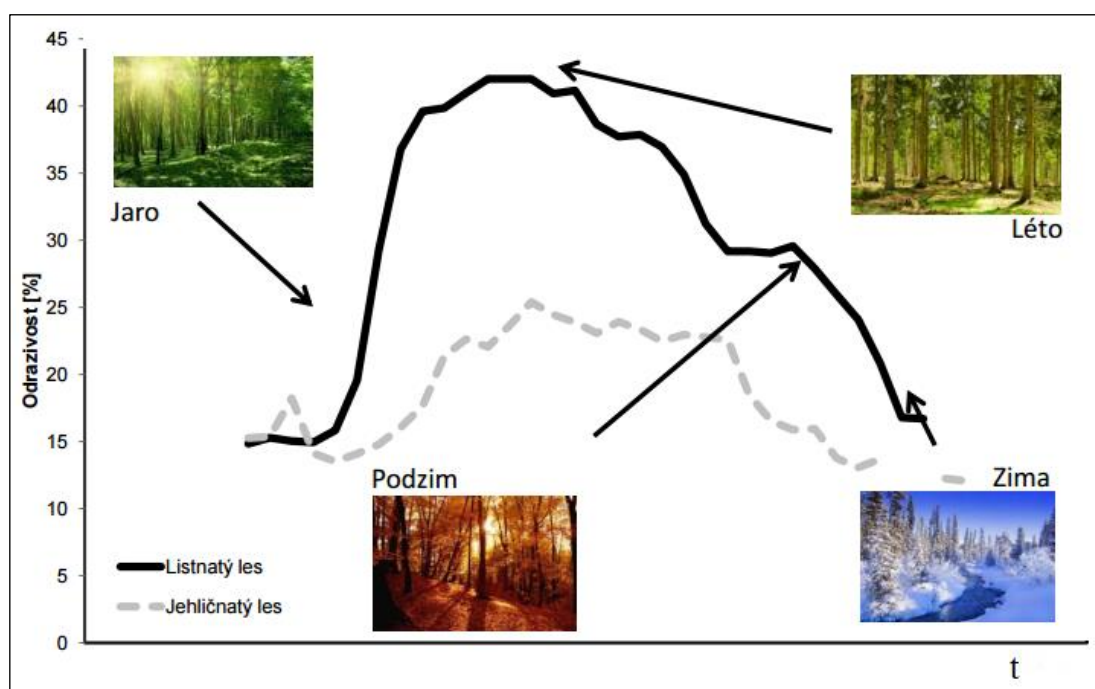
- Odstranit nebo dostatečně potlačit chyby z opomenutí a nesprávného zařazení (chyby nesprávného zařazení pixelů při porovnávání výsledků klasifikace dvou obrazů odlišného rozlišení, naznačeno na *obrázku 1* níže)
- Zlepšit metody pro získání přesnějších výsledků



Obrázek 1: Princip vzniku chyb z opomenutí a nesprávného zařazení při srovnávání snímků různého rozlišení. Zdroj: (Boschetti, a další, 2004)

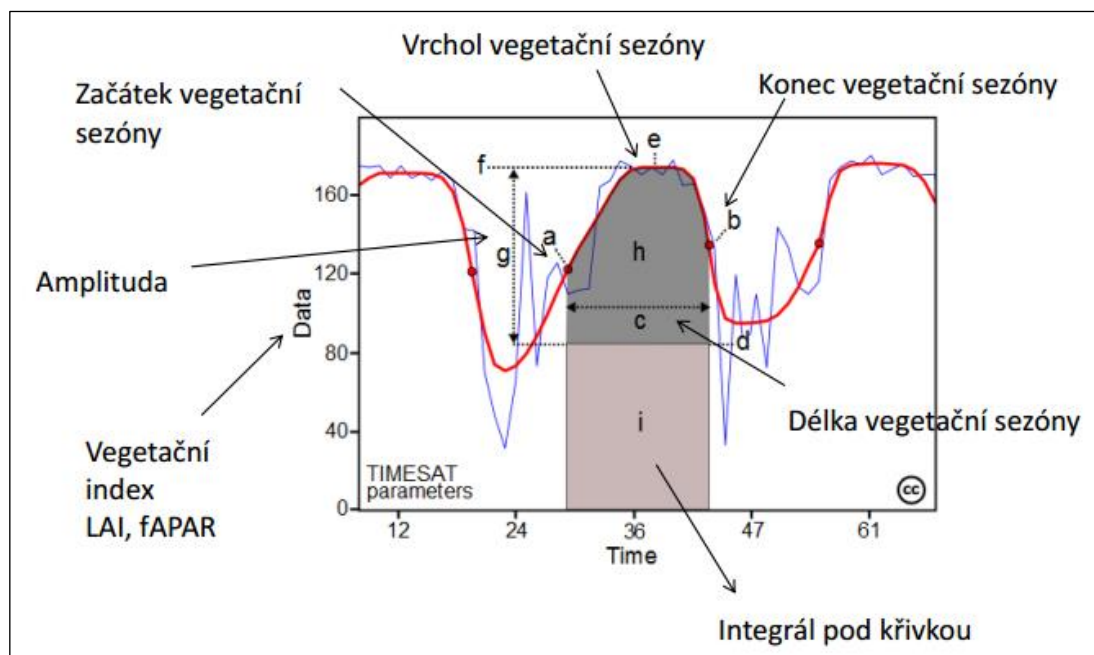
2.3 Kvalitativní změny krajiny

Kvalitativní změnu krajiny představuje (při naplnění definice kvalitativní změny uvedené výše) dynamika vegetace, kterou pozorujeme v průběhu roku (předmět zájmu vědy fenologie). Nejvýznamnějšími faktory těchto přirozených změn jsou teplota a sluneční záření. Ve vyšších zeměpisných šířkách udává vývoj teplota a délka slunečního osvětlení, zatímco v aridních oblastech jižních zeměpisných šířek doba osvětlení a výskyt srážek. V průběhu různých fází růstu rostlin se jejich struktura a zastoupení rostlinných pigmentů mění. Spolu s tím se mění i spektrální projevy, čehož využívá DPZ (Multi-temporal Remote Sensing Analytics Approaches for Characterizing Landscape Change, 2001).



Obrázek 2: Graf odrazivosti vegetace v průběhu roku.

Zdroj: http://copernicus.gov.cz/documents/19/53042/10_LUKES_Petr.pdf/5f3fa86d-507d-496c-830b-ec2c35364d29, upraveno



Obrázek 3: Fenologické parametry.

Zdroj: http://copernicus.gov.cz/documents/19/53042/10_LUKES_Petr.pdf/5f3fa86d-507d-496c-830b-ec2c35364d29, upraveno

Definici Feranec pro zařazení do skupiny kvalitativních změn splňuje taktéž změna land use. Pojem land use vymezuje (Lambin, a další, 2006) jako účel využívání land use, tedy nakládání s jeho biofyzikálními parametry. Jde např. o nakládání s jeho produkčním potenciálem (pěstování plodin, pasení, těžba dřeva, těžba nerostů) nebo jeho prostorovou charakteristikou (přistávání letadel, pojezd techniky, sportoviště aj.).

Změny land use tedy představuje sklizení plodiny z pole, přeměna pastviny na golfové hřiště nebo přeměna hospodářského lesa na park, odbahnění a osazení rybníku rybami aj. Jak je zřejmé, zdaleka ne všechny změny land use lze pomocí DPZ sledovat.

3 Principy dálkového průzkumu Země

„Dálkový průzkum Země získává informace o objektech a jevech prostřednictvím elektromagnetického záření“ (Dobrovolný, 1998 str. 12).

Informace může být nesena ve frekvenčním obsahu, intenzitě, nebo polarizaci elektromagnetické vlny.

3.1 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření vzniká při pohybech atomů v molekulách látek, a to při pohybech rotačních, tak i kmitavých. Vlnová délka vzniklého záření je závislá na

druhu atomů i na druhu chemické vazby. Další podstatným zdrojem záření jsou i jednotlivé atomy. Zde vzniká za změny energie elektronů při jejich přechodech mezi oběžnými drahami kolem jádra atomu (Halounová, a další, 2005). Změny ve větší vzdálenosti od jádra atomů jsou spojeny s menšími změnami energie a s většími vlnovými délkami emitovaného záření (Horák, 2014).

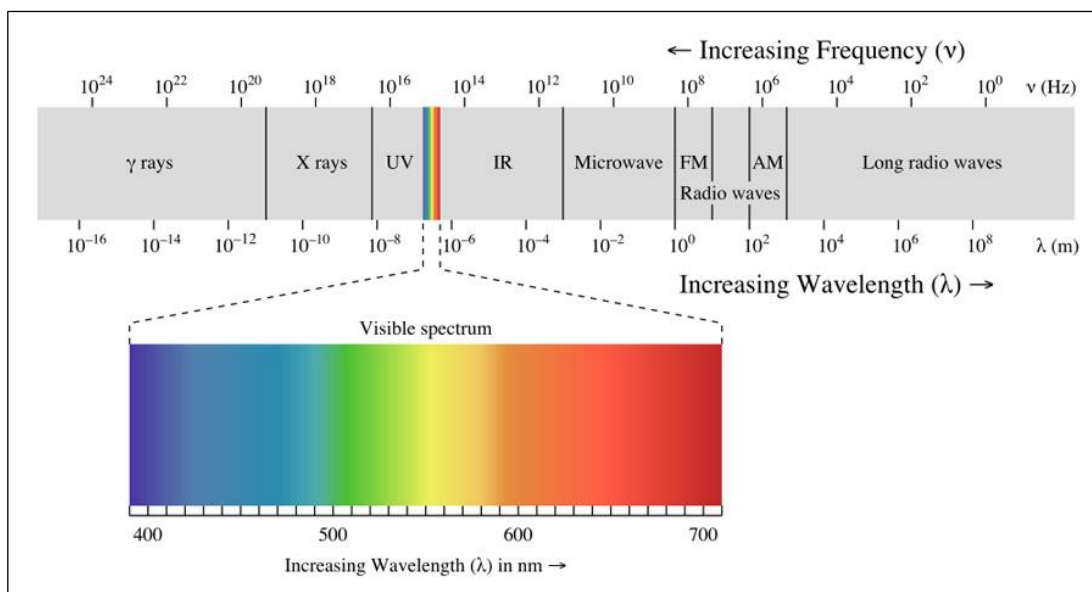
Energie záření spočívá ve vlnění, šíří se prostorem ve tvaru tzv. elektromagnetické vlny. Ta je, dle Maxwellových rovnic, zvláštním případem elektromagnetického pole, v němž se periodicky mění velikost intenzity elektrického a velikost magnetického pole. Počet těchto periodických změn za jednu sekundu vyjadřuje frekvence f [Hz].

Energie záření pohledem vlnového charakteru, zastoupená intenzitou záření M ($W \cdot m^2$), je úměrná druhé mocnině intenzity magnetického pole, pohledem částicového charakteru pak úměrná frekvenci záření.

Záření označujeme jako nepolarizované, pokud vektor intenzity elektromagnetického pole E kmitá ve všech směrech, jako polarizované v případě, že je vektor E rovnoběžný s místní normálou nebo odkloněný od vertikály.

Rychlost postupu vlny závisí na elektrických a magnetických vlastnostech prostředí, kterým se šíří. Ty popisuje *relativní permitivita* ϵ , *relativní permeabilita* μ , a *měrná vodivost* σ (Kolář, a další, 1997).

Celý rozsah vlnových délek je označován jako elektromagnetické spektrum. Díky pestrosti jevů v přírodě, vedoucích k emisi záření, se toto vyskytuje ve spojitém spektru širě 20 řádů (Kolář, 1990). Toto spektrum se rozděluje podle vlnové délky do několika základních oblastí, daných například odlišnými způsoby měření v jednotlivých částech (Dobrovolný, 1998).



Obrázek 4: Spektrum elektromagnetického záření.

Zdroj: http://img.ceskatelevize.cz/program/porady/10391317150/foto09/212382553450027_7.jpg

Pro účely DPZ se však užívají jen některé vlnové délky.

Jak píše Kolář (1990 str. 16):

„V dálkovém průzkumu Země se využívají především vlnové délky viditelného, infračerveného a mikrovlnného záření.“

Jako viditelné se označuje záření s vlnovou délkou 380 nm až 720 nm, tedy v rozsahu citlivosti lidského oka.

Oblast infračerveného záření je zvykem dělit na pásma uvedená v tabulce:

pásma	vlnový rozsah (μm)
blízké IČ, near-infrared (NIR)	0,72-1,3
střední IČ	1,3-4
daleké IČ	4-25

Tabulka 1: Rozdělení IR záření. Zdroj: (Kolář, a další, 1997)

Mikrovlnné záření pokrývá rozsah od 1 mm do 1 m. V praxi je vytvářeno umělým způsobem pro užití mikrovlnnými radiometry, spektroskopy a radarovými systémy. Pro praktické použití je zvykem odlišovat pásma:

pásma	frekvence [GHz]	vlnový rozsah [cm]
Ka	40-26,5	0,8-1,1
K	26,5-18	1,1-1,7
Ku	18-12,5	1,7-2,4

X	12,5-8	2,4-3,8
C	8-4	3,8-7,5
S	4-2	7,5-15
L	2-1	15-30
P	1-0,3	30-100

Tabulka 2: Rozdělení mikrovlnného záření. Zdroj: (Kolář, a další, 1997)

Radiové záření, mající vlnovou délku od 10 cm do 3 km užívají zobrazující radary, altimetry a v menší míře i pasivní radiometry. Vlny tohoto záření jsou generovány uměle pohybem elektronů v anténě přístroje (Kolář, a další, 1997).

3.2 Interakce elektromagnetického záření s látkami

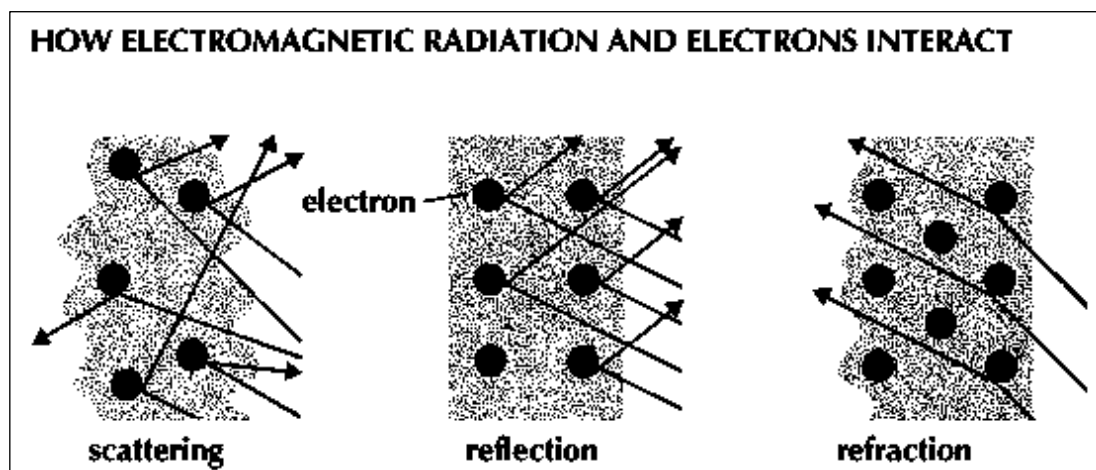
V reálném nehomogenním prostředí interaguje záření na rozhraní mezi dvěma různými prostředími a svým dopadem indukuje v povrchu oscilační pohyb volných a méně vázaných elektrických nábojů. Ty poté produkují sekundární elektromagnetickou vlnu, která se může lišit v popisujících parametrech, tedy intenzitě, energii, směru, vlnové délce i polarizaci. Směr postupu záření určuje úhel lomu Θ_T v závislosti na indexu lomu obou prostředí. Tento jev popisují Snellovy zákony lomu a odrazu. V příslušných vzorcích figurují absolutní indexy lomu prostředí n_i , které jsou dány elektromagnetickými vlastnostmi prostředí. Mezi tyto patří permitivita, permeabilita, vodivost aj. (Kolář, 1990)

Podle druhu postupu sekundární vlny rozlišujeme:

Odražené záření – vrací se do prostředí, odkud přicházelo záření primární

Záření prošlé – absorpce tělesem

Záření rozptýlené – důsledek malé nehomogenity prostředí

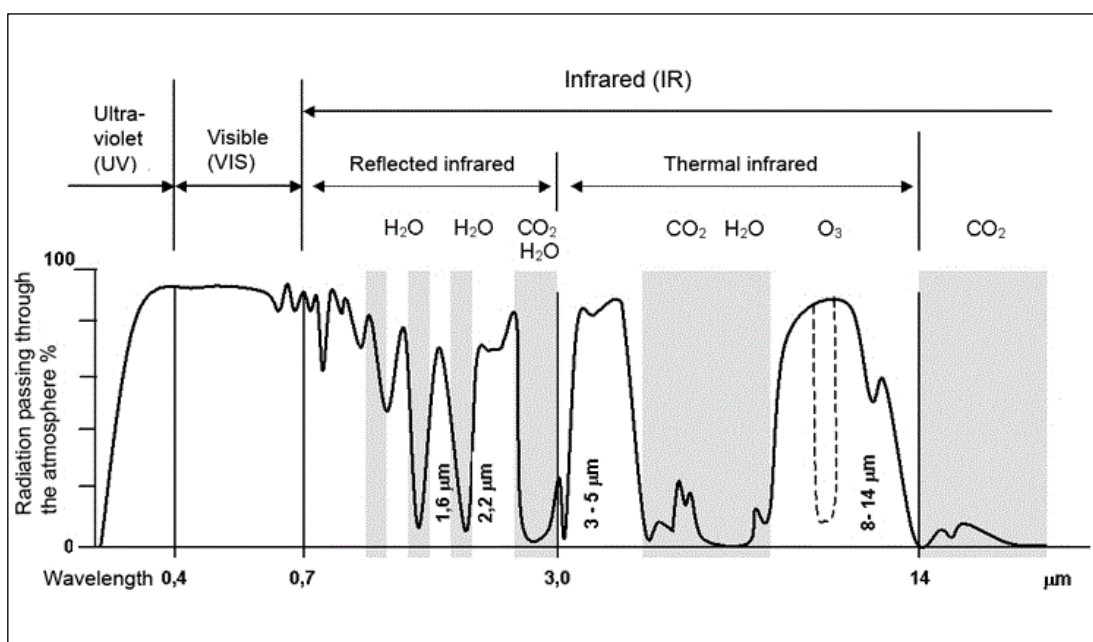


Obrázek 5: Interakce dopadajícího elektromagnetického záření s objekty.

Výskyt těchto jevů po dopadu primárního záření v konkrétním látkovém prostředí je závislý na vlastnostech materiálů, popsatečných termíny spektrální pohltivost a spektrální propustnost (Kolář, 1990).

3.2.1 Vliv atmosféry

Měřená elektromagnetická vlna překonává při své cestě k detektoru DPZ dráhu atmosférou, v níž dochází ke všem již zmíněným interakcím. Míra modifikace spektrální intenzity záření měřeného objektu bude narůstat se vzdáleností objektu a detektoru, stejně tak s hustotou prostředí. Sama atmosféra je též zdrojem záření, protože na obsažených částicích plynů, kapalin i pevných látek, které se interakcí stávají oscilátory, dochází k rozptylu. Zejména plynné složky (nejvíce vodní pára, ozón a oxid uhličitý) způsobují absorpci záření za zvýšení své vnitřní energie. Tím je způsobena neprostupnost v širokém pásmu vlnových délek 20–1000 μm . Vlivem absorpce dalšími plyny atmosféry, je její propustnost omezena na několik atmosférických oken, **patrných z obrázku 3:**



Obrázek 6: Graf propustnosti zemské atmosféry v závislosti na vlnové délce. Zdroj: 1url.cz/NtsjY

Pro užití dat získaných dálkovým průzkumem musí být, ze skutečností výše popsaných, odstraněn vliv atmosféry. (Kolář, 1990) a (Richter, 1997) konstatuje, že hlavními proměnlivými ovlivňujícími parametry atmosféry v rámci zmíněných atmosférických oken jsou obsah vodní páry, typ aerosolu a optická tloušťka obecně.

Naopak, je-li předmětem zájmu měření atmosféra, je nezbytné odstranit příspěvek zemského povrchu pod ní (Kolář, 1990).

3.3 Pořizování dat DPZ

Sběr dat metodou DPZ spočívá, jak již bylo uvedeno, v měření množství zářivé energie emitované či odražené objekty v krajině. Jako nosiče detektorů jsou užívána letadla, družice a nově též drony. Přístrojové vybavení obecně, doznalo od počátků v sedmdesátých letech značného pokroku. Od počátečních nedokonalých fotografií k panchromatickým systémům s rozlišením necelého metru, k multispektrálním snímačům s rozlišením 1,24 metru (Tupin, a další, 2014).

Vzhledem k zaměření této práce není podstatné popisovat historické ani současné družicové systémy DPZ, následujících odstavce stručně nastíní princip snímání:

Tupin a kol. (2014) rozlišuje dvě skupiny satelitních snímačů: optické senzory a radary. První zmíněné jsou pasivní senzory, měřící odražené sluneční záření nebo vlastní radiaci objektů. Druhá skupina pak funguje na bázi příjmu odražené elektromagnetické vlny, kterou anténa přístroje proti zemskému povrchu vyslala. Horák (2014) rozděluje pořízená data na konvenční (analogová) a nekonvenční (digitální).

Konvenční snímání pracuje na obecně známém principu chemické reakce fotografické složky po ozáření, výstupem je fotografie, v dnešní době skenovaná pro další užití. Výhodami této metody jsou vysoká prostorová rozlišovací schopnost, geometrická kvalita, lehká aplikace fotometrie. Touto metodou je možno snímat v pásmu viditelného záření a kraje blízkého NIR. Do stejné skupiny řadíme i snímání pomocí kamer, dnes kamer digitálních.

Pod nekonvenční metodu snímání spadá celá škála přístrojů. Pro snímání v oboru viditelného a IR záření platí, že záření výseku zemského povrchu, zacílené mechanickým nebo elektronickým skenerem nosiče, bývá snímáno v širším pásmu vlnových délek pro vznik panchromatického snímku, nebo děleno a filtrováno optickými filtry pro vznik multispektrálních snímků. Dále postupuje na detektor. Ten může být tepelný, reagující na změnu teploty, a fotonový, pracující na principu změny vodivosti jeho polovodičových součástí dopadem fotonů. Získaný signál je kalibrován, případně digitalizován a zasílán k zpracování. Záření mikrovlnné (viz kapitolu *Elektromagnetické záření*) je snímáno radary. Ty získávají údaje o měřených objektech v rozdílných charakteristikách vyslaného a přijatého záření. Jejich

přednostmi je schopnost pronikat mlhou, jemným deštěm, mrakem i smogem (Halounová, a další, 2005).

4 Zářivé vlastnosti krajinných prvků

V DPZ zkoumáme záření vyzářená, odražená a rozptýlená objekty, coby nositele informací o nich samých. Předpokládá to měření změny intenzity záření dopadajícího a záření odraženého. Tuto změnu vyjadřuje odrazivost. Pro konkrétní vlnovou délku tedy platí vzorec:

$$\rho(\lambda) = \frac{M_r(\lambda)}{M_i(\lambda)} * 100[\%]$$

(4)

Kde M_r – intenzita odraženého záření,

M_i – intenzita záření dopadajícího.

Stanovit odrazivost povrchu lze analyticky či experimentálně. Analytické určení umožňují Fresnelovy rovnice odrazu, jejichž platnost je podmíněna dvěma předpoklady. Povrch rozhraní musí být ideálně rovný a obě prostředí dokonale homogenní. Za splnění těchto předpokladů je odrazivost ρ vyjádřena vzorcem:

$$\rho = R^2 \sqrt{\frac{\varepsilon_2 \mu_1}{\varepsilon_1 \mu_2}}$$

(5)

Kde R je Fresnelův koeficient odrazu (poměr velikosti intenzity elektrického pole E vlny odražené k velikosti E vlny dopadající),

ε_i je permitivita prostředí

μ_i permeabilita prostředí.

Výpočet odrazivosti pro obecné povrchy (nesplňující podmínky Fresnelových rovnic) je pro obtížnost zjištění jeho elektrických a strukturálních charakteristik mnohem složitější. Proto se odrazivost určuje převážně experimentálně (Halounová, a další, 2005). Ani tento úkon není zdaleka jednoduchý, neboť přístroj měří jen část odraženého záření vymezenou zorným polem a orientací. Naměřená hodnota záře povrchu musí tedy být modifikována konkrétními geometrickými podmínkami měření (Kolář, 1990).

Znalost odrazivosti různých objektů a přírodních i umělých materiálů je základním stavebním kamenem metod dálkového průzkumu. Slouží nám nejen k vlastnímu rozpoznání objektů, ale též pro odhad a kvantifikaci některých jejich vlastností (Dobrovolný, 1998). Příslušnost k nějakému druhu vyjadřují druhové parametry, které mají kvalitativní povahu (např. louka, stavení, silnice, vodní plocha atp.), zatímco stav měřené látky vyjadřují stavové parametry. Ty jsou spíše kvantitativní (např. vlhkost, příměs, výška, stáří, hustota aj.). Zářivé vlastnosti zkoumaného objektu popisuje jeho spektrální charakteristika – průběh závislosti odrazivosti/emisivity na vlnové délce (Kolář, a další, 1997). Tato je více méně pro daný objekt charakteristická.

Princip rozeznávání typů objektů zemského povrchu DPZ je tedy tento: V hypotetickém případě, kdy máme na snímku dva sousední objekty odrážející stejné množství záření, bude problém je odlišit. Díky tomu, že se odrazivost těchto (stejně tak všech materiálově rozdílných) objektů s vlnovou délkou mění, lze teoreticky nalézt takový interval vlnových délek, v němž se jejich odrazivost liší, což nám umožní jejich rozpoznání.

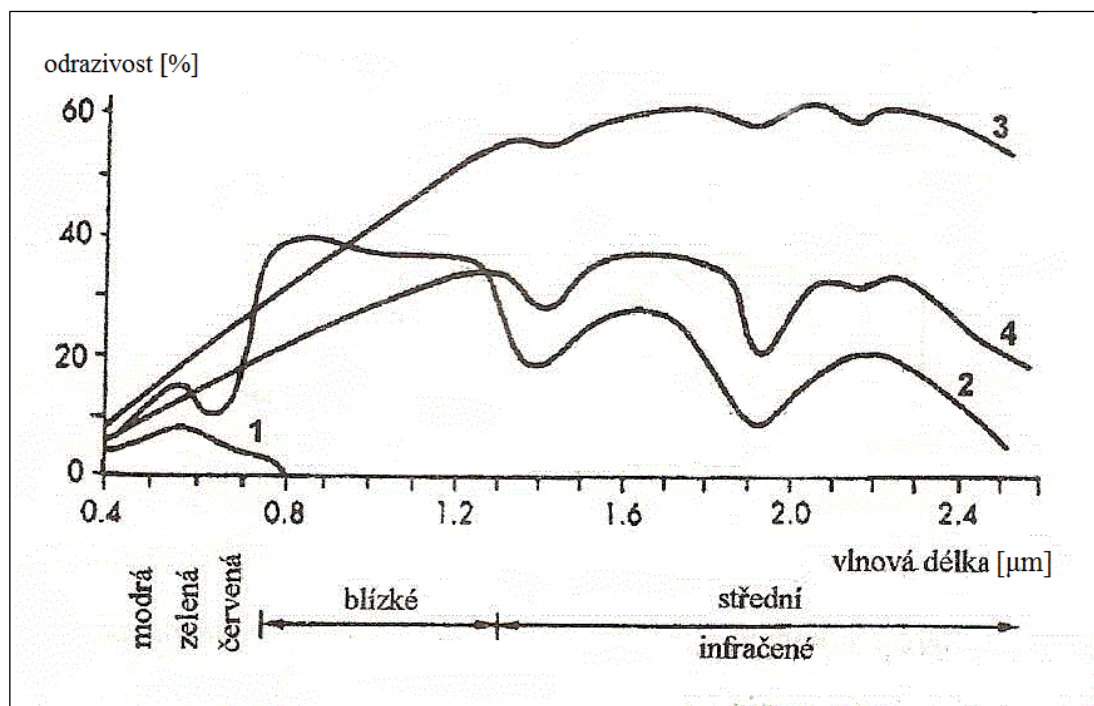
A jak, k tématu této práce stěžejně, uvádí Kolář (1990 str. 94):

„Ze znalosti vztahu mezi spektrální charakteristikou a příslušnými stavovými parametry lze odvodit nejvýhodnější spektrální pásma pro měření. Stejně tak je tato znalost důležitá pro stanovení optimální zpracovatelské procedury, která naměřené hodnoty spektrální intenzity převede na hodnoty druhových nebo stavových parametrů.“

Spektrální charakteristiky se mění v čase spolu se stavovými parametry. V některých případech je průběh změny spektrálního projevu dokonce typický a stává se dalším rozpoznávacím znakem. Tehdy potřebujeme ke stanovení látkových parametrů údaje o denní/ roční době pozorování (Kolář, a další, 1997).

Reálná rozmanitost nám však neumožňuje sestavit popis spektrálních vlastností všech možných objektů. Jones a Vaughan (2010) informují o mnohaleté existenci „knihoven“ spektrálních vlastností hornin a minerálů a o tom, že ekvivalentní knihovny projevů vegetace jsou v počátcích vývoje. Přestože se projevy různých objektů liší, je zvykem je rozčleňovat do základních skupin majících podobné specifické vlastnosti:

- Plynné látky,
- voda,
- povrch bez vegetace,
- vegetační povrch.



Obrázek 7: Spektrální charakteristika vody (1), vegetace (2), suché půdy (3) a vlhké půdy (4).
Zdroj: (Kolář, a další, 1997)

4.1 Spektrální projev vody

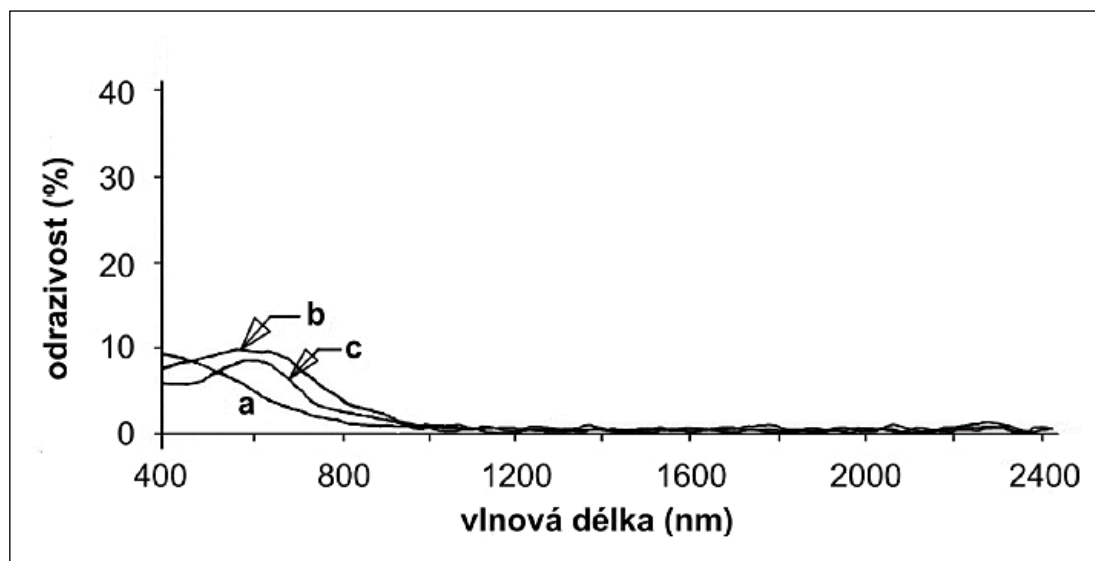
Voda ve svých skupenstvích je všudypřítomnou látkou v krajině a nalézá se téměř na každém snímku vzniklém v DPZ. Jak se dozvídáme v (Horák, 2014 str. 6):

„..., výrazně odlišnou permitivitu má voda (o řád větší než většina ostatních materiálů), proto má také voda výrazně odlišné chování při interakci s elektromagnetickým zářením a její přítomnost výrazně ovlivňuje společný projev s jiným materiálem.“

Coby příměs jiných složek krajiny působí složité a doposud plně nepoznané změny v spektrálních projevech těchto materiálů, v podobě vodních ploch oceánů, toků a nádrží je jednoduchým předmětem.

Díky své vlastnosti absorbovat pod hladinou sluneční záření se vyznačuje nízkou odrazivostí (tedy vysokou propustností) na všech vlnových délkách. Maximum propustnosti je na 0,48 μm, s vlnovou délkou klesá. Ona vyšší propustnost na krátkých vlnách viditelné části spektra (0,5–0,6 μm) poskytuje možnost zkoumání dna do hloubky až 15 metrů. Rozpuštěné látky nebo plankton odrazivost zvyšují. Plankton navíc uděluje vodě typickou odrazivost chlorofylu v oblasti pigmentační absorpce, tedy její prudké snížení v modré a zvýšení ve žlutozelené oblasti (viz kapitulu

Spektrální projev vegetace). Vedle chlorofylu a suspenzí se spektrálně projevují i další přírodní nebo umělé příměsi jako železo a olejové skvrny.



Obrázek 8: Spektrální charakteristika vody mořské vody (a), kalné vody (b) a vody s chlorofylem (c). Zdroj: (Horák, 2014)

Spektrální vlastnosti vody v pevném skupenství se výrazně liší. Led a sníh vykazují ve viditelné a NIR oblasti spektra vysokou odrazivost, která klesá s tím, jak stoupá jejich vlhkost (Horák, 2014).

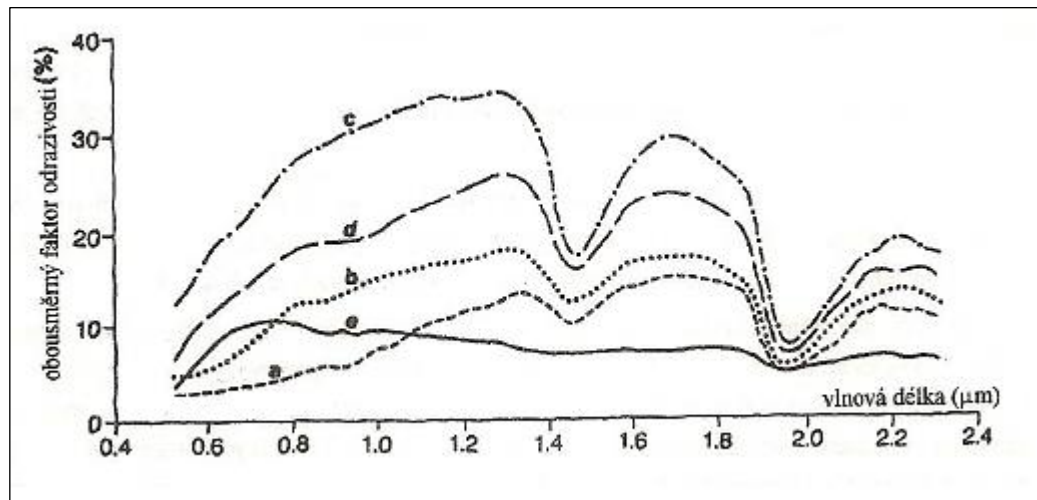
4.2 Spektrální projev povrchů bez vegetace

Odrazivost pevných povrchů je v pásmu viditelného záření přímo úměrná vlnové délce. U minerálů a hornin má vliv zejména jejich chemické složení, projevující se typickými absorpčními pásy jejich prvků (nejvíce v IR oblasti). Naopak u půdy je určujícím faktorem mechanické složení.

4.2.1 Půda

Výrazné deprese, v oboru viditelného a NIR, na stoupající křivce odrazivosti půd všemožných druhů a typů představují absorpční pásy vody. Jak je patrné z obrázku 9, dalšími ovlivňujícími faktory jsou obsah humusu, minerální složení obecně, mechanická struktura, vlhkost aj. Vlhkost půdy je přímo úměrná absorpci záření v ní, tedy nepřímo úměrná její odrazivosti. Projevuje se též chemicky vázaná voda v jílových minerálech, hydroxylový aniont, přítomnost oxidu křemičitého v křemenném písku. Výrazný efekt má nárůst velikosti půdních částic, též nepřímo úměrný odrazivosti (Kolář, a další, 1997).

Výsledná křivka odrazivosti půdy je nejprve tvořena superpozicí křivek zastoupených minerálů, a dále tvarována především zmíněnou vlhkostí a drsností povrchu (zejména v oblasti mikrovln) (Dobrovolný, 1998).



Obrázek 9: Spektrální charakteristika půdy s vysokým obsahem humusu (a), s nízkým obsahem humusu (b), bez příměsí (c), s nízkým obsahem železa (d), s vysokým obsahem železa (e).
Zdroj: (Kolář, a další, 1997)

4.2.2 Horniny a minerály

Rozpoznávání hornin se dle užití literatury děje na základě znalosti křivek jednotlivých minerálů, které horniny tvoří. Například křivka SiO_2 , mající minimum na 9 μm, charakterizuje horniny křemičité, křivky MgO, CaO a $(\text{CO}_3)^{2-}$ uhličitanové. Dalším užívanou vlastností je rozdílná tepelná kapacita hornin, zjištělná jako rozdíl zářivé teploty v denní a noční době. V neposlední řadě je užíváno měření v mikrovlnné části spektra k detekci permitivity materiálu, která je nepřímo úměrná zastoupení nekovových prvků.

4.3 Vegetace

Stejně jako voda, je rostlinstvo nejrůznějších druhů zastoupeno na většině snímků DPZ. Obvykle je zaznamenáváno jako celek určitých odrazivých vlastností, protože velikost rostliny je menší než plošná jednotka měření (Halounová, a další, 2005). Jednotlivé rostlinné druhy nebo příbuzné skupiny mají v mnoha případech charakteristickou spektrální odrazivost použitelnou pro nástin mapy zobrazující příslušnosti zeleně k definovaným typům (Bonham, 2013).

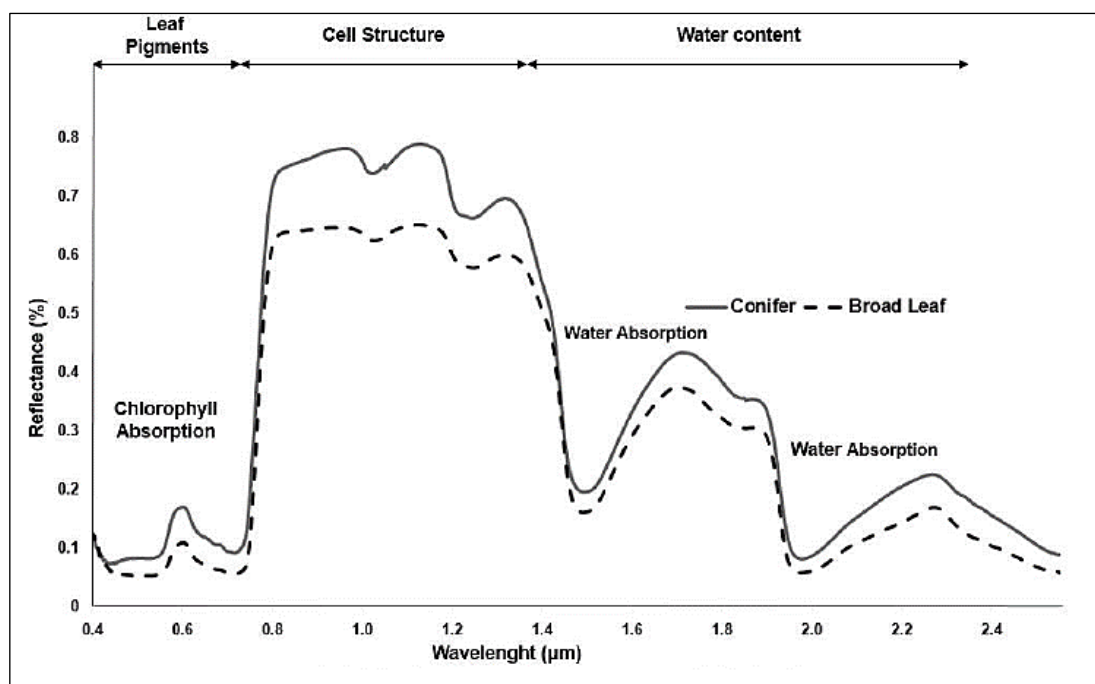
4.3.1 Spektrální vlastnosti listové plochy

Spektrální vlastnosti listu určují jeho stavební látky jako cukry, tuky, bílkoviny, celulóza a buněčná tekutina. Celé množství známých rostlin vykazuje vesměs

společně určité projevy, které se v praxi měří experimentálně. Odrazivost listu závisí na úhlu dopadu záření, což je zapříčiněno strukturou listu a jeho stářím. U každého rostlinného druhu však nalezneme úhel zrcadlového odrazu (Halounová, a další, 2005).

Podle hlavních ovlivňujících činitelů dělíme průběh křivky odrazivosti vegetace na:

1. Oblast pigmentační absorpce v pásmu 0,4–0,7 μm ,
2. oblast vysoké odrazivosti mezi 0,7–1,3 μm ,
3. oblast vodní absorpce v intervalu 1,3–3,0 μm .



Obrázek 10: Spektrální charakteristika listové plochy jehličnanu (plná čára) a listnáče (přerušovaná čára). Zdroj: 1url.cz/dtsjZ

Oblast pigmentační absorpce

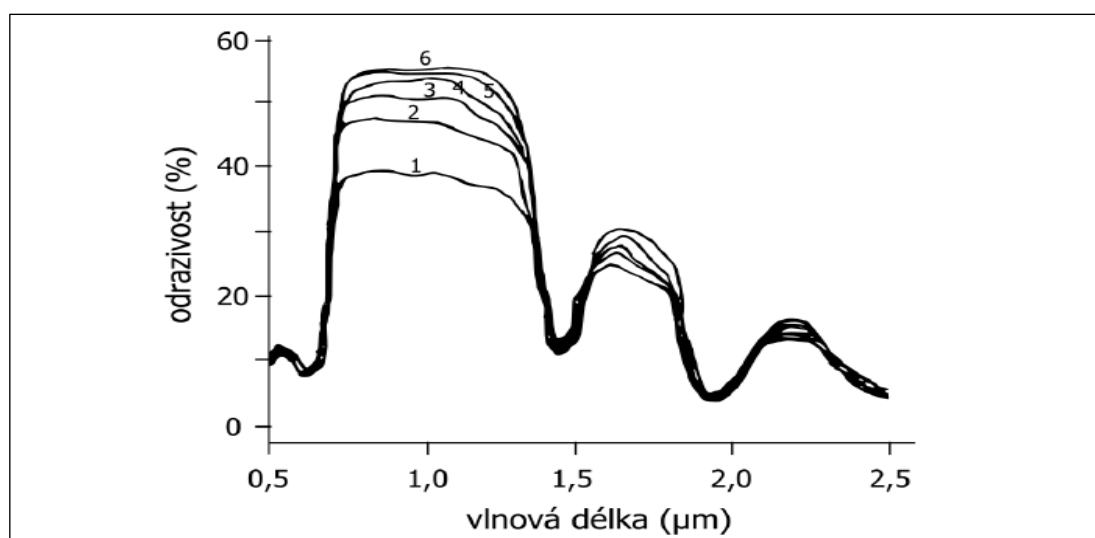
Oblast pigmentační absorpce patří do pásma viditelného spektra. V něm se významně projevuje chlorofyl, zelený listový pigment, sloužící rostlině k fotosyntéze. Ten pohlcuje energii modrého (0,45 μm) a červeného světla (0,65 μm), maximum odrazivosti má v zelené barvě (0,54 μm). Množství chlorofylu ovlivňuje tvar křivky, větší obsah ji prohlubuje v 0,68 μm a posouvá do větších vlnových délek, za snížení maxima odrazivosti v zelené.

Žluté rostlinné pigmenty, karoten a xantofyl, pohlcují v modrém světle. Jejich projev a zastoupení v rostlinách stoupá při stárnutí, napadení či stresu rostliny, nebo v období rozpadu chlorofylu před podzimním opadem olistění. Se zmíněnými stavy

vegetace souvisí i pokles obsahu chlorofylu a vody, což je základním rozpoznávacím znakem.

Oblast vysoké odrazivosti

Tato oblast odpovídá pásmu NIR. Lze se shledat též s označením oblast buněčné struktury, neboť je to právě morfologická struktura listu coby hlavní faktor. Uplatňuje se tu jak vícenásobný odraz uvnitř pletiva, tak mezi listy společenství rostlin, díky nízké pohltivosti rostlinné buňky v této oblasti spektra. Příspěvek odrazivosti spodních vrstev listů na celkovou odrazivost je značný, a to až do šesté vrstvy.



Obrázek 11: Navýšení odrazivosti záření na více vrstvách vegetace. Zdroj: (Horák, 2014)

Jak se dočteme v (Horák, 2014 str. 35):

„Prudký nárůst odrazivosti z nízkých hodnot v červené části spektra do vysokých hodnot v blízké infračervené části spektra je nejdůležitějším příznakem zelené vegetace a je na něm založena řada vegetačních indexů“.

Oblast vodní absorpce

Tato oblast náleží pásmu středního IR (viz kapitolu *Elektromagnetické záření*). Jak název napovídá, hlavní ovlivnění dává obsažená voda, projevujíc se svými absorpčními pásy na 1,4 μm, 1,9 μm, 2,7 μm, slaběji pak na 0,96 μm a 1,1 μm.

Absorpce listů je značná v pásmu nad 3,0 μm, zároveň klesá odrazivost, stoupá emisivita (na hodnoty 0,95–0,98) (Halounová, a další, 2005).

5 Vegetační indexy

Účelem této kapitoly je stručně představit hlavní, v literatuře zmiňované a užívané VI z hlediska jejich podoby, fungování a vlastností.

„Měření absolutních hodnot odrazivosti je zkreslováno úhlem, pod kterým dopadá záření na měřený povrch a také rychlými změnami spektrálních charakteristik dopadajícího záření v důsledku oblačnosti. To vedlo k vývoji různých indexů s cílem eliminovat vlivy postavení Slunce a oblačnosti a na základě znalostí o spektrální odrazivosti zvýraznit vlastnosti rostlinného pokryvu“ (Klem, a další, 2014 str. 15).

Za účelem zvýraznění sledované složky krajiny ve snímcích pořízených pasivním snímacím zařízením zavádí disciplína DPZ spektrální/ vegetační indexy (dále jen VI). Jedná se o skupinu aritmetických operací s hodnotami odrazivosti ve dvou či více pásmech multispektrálního obrazu, která nám na základě experimentálně zjištěných korelací umožňuje rozpoznání dalších kvalitativních i kvantitativních znaků objektů. Užívaná pásma jsou vybrána tak, aby se zvýraznila nízká odrazivost v červené viditelné části spektra, a vysoká odrazivost v blízké infračervené části, jak to vychází ze spektrálního chování vegetace (viz kapitolu *Spektrální vlastnosti listové plochy*). Tímto principem je dosaženo zvýšení kontrastu odrazivosti vegetačního krytu a holých ploch (Honková, 2008).

Širokou škálu benefitů přináší užívání VI disciplínám, které se zabývají odhadem biomasy, zdravotním stavem rostlin, výnosy zemědělských pozemků nebo vodním hospodářstvím (Jackson, a další, 1991). Své místo mají též v ekologii, klimatologii, systémech včasného varování, urbanismu aj. (Honková, 2008)

Křížová (2016) uvádí, že vědecká literatura poskytuje popis více než 150 VI, z nichž však jen některé mají podstatný biofyzikální základ a byly systematictěji testovány.

Rozlišují se dvě základní skupiny VI, založené na způsobu jejich výpočtu (Dobrovolný, 1998) (Jackson, a další, 1991).

5.1 Poměrové indexy

Poměrový VI může být prostým podílem dvou pásem, nebo podílem sum či rozdílů dvou a více pásem. (Jackson, a další, 1991) Poměrem jednoduchým nebo normalizovaným dává do vztahu odrazivost povrchů v červené viditelné (dále Red) a blízké infračervené (dále NIR) části spektra. Indexy této skupiny mohou významně korelovat s jinými parametry vegetace, například indexem listové pokrývnosti (Leaf area index, dále jen LAI, viz kapitolu *LAI* níže).

Hodnoty indexů této skupiny, uvedené níže, mohou být porovnávány navzájem po předešlé korekci vstupních dat na veškeré vnější vlivy (Dobrovolný, 1998). (Názvy VI mnohdy nemají svůj ekvivalentní český název, jsou tudíž uvedeny v anglickém znění)

5.1.1 Simple Ratio (SR)

Tento jednoduchý a v rámci širokého rozpětí podmínek zároveň efektivní VI byl pravděpodobně první definovaný index, užitý roku 1969 C. F. Jordanem jako podíl odrazivosti na 0,800/ 0,675 μm v článku publikovaném v časopise Ecology (Křížová, 2016).

$$RVI = \frac{NIR}{Red}$$

(6)

Hustá zelená vegetace se vyznačuje minimální odrazivostí v červené. Z toho důvodu, při poklesu odrazivosti v červené k nule, blíží se hodnota RVI k nekonečnu. Očekáváme-li směrodatné výsledky, je potřeba stanovit rozumnou metodiku. Je-li v červeném pásmu měřeno s dostatečnou přesností, je index RVI dostatečně citlivý na změny vegetace v období vrcholného růstu. Naopak nepřiliš vhodný je pro sledování řídké zeleně (Jackson, a další, 1991).

5.1.2 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Index byl vyvinut na počátku 70. let (Klem, a další, 2014)

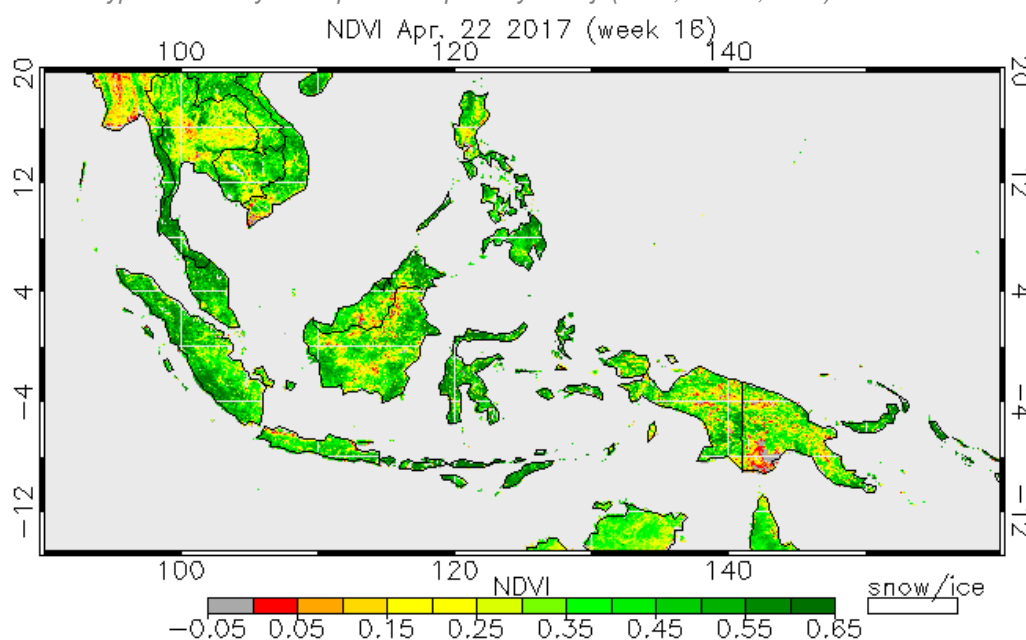
$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

(7)

Čítecitel ve zlomku vzorce dosahuje 1, zatímco jmenovatel se obvykle blíží nule (může být malé kladné nebo malé záporné číslo v závislosti na charakteristikách senzoru a vstupních veličinách) (Jackson, a další, 1991). Hodnoty indexu samotného dosahují intervalu od -1 do 1 a mají, na rozdíl od hodnot SR, normální rozdělení. Korelují zejména s obsahem zelené hmoty v ploše pixelu (Klem, a další, 2014). V průběhu roku prodělávají, pro určité povrchy, typické změny, díky čemuž nachází tento index uplatnění v lesnických a zemědělských úkonech.

povrch	NDVI
velmi hustá vegetace	0,500
středně hustá vegetace	0,140
řidká vegetace	0,090
holá půda	0,025
oblačnost	0,002
sníh a led	-0,046
voda	-0,257

Tabulka 3: Typické hodnoty NDVI pro různé povrchy. Zdroj: (Klem, a další, 2014)



Obrázek 12: Snímek jihovýchodní Asie v hodnotách NDVI.

Zdroj: http://www.ospo.noaa.gov/data/land/vegetation/vhp/MGVI.G04.0KM.C07.M1.NDVI_Oceana.png

Tupin a kol. (2014) upozorňuje, že na rozdíl od jeho dobré vypovídající funkce při cílení na řídké porosty, má tendenci se saturovat při přítomnosti husté vegetace. Podle (Bannari, a další, 1995) podhodnocuje podíl vegetačního krytu na stanovišti zkraje vegetační sezóny, a naopak jej nadhodnocuje v závěru. Je též citlivý na atmosférické podmínky, proto je žádoucí přistoupit k atmosférickým korekcím, obzvláště, když chceme porovnávat výsledky napříč studiemi. Ve stejném duchu informují Jones a Vaughan (2010), že hodnota NDVI změřená na orbitu může být až 70 % hodnoty získatelné v tutéž dobu pozemním měřením stejného území.

Coby poměrový index, skýtá NDVI výhody v minimalizaci některých druhů šumů a ovlivnění (Solano, a další, 2010). Je díky užitým pásmům použitelný pro široké spektrum úloh.

Hlavní nevýhodou tohoto, stejně tak ostatních poměrových indexů, je asymptotické chování vedoucí k „necitlivosti“ rozlišení po dosažení jistých mezí v hodnotách nezávislé proměnné – dochází k saturaci indexu.

S pomocí snímků pořízených přístroji AVHRR společnosti NOAA v hodnotách NDVI byla vytvořena klasifikace land cover v globálním měřítku, na základě ní pak mapa land cover v rozlišení jednoho zeměpisného stupně (Honková, 2008).

Jak podotýká (Ferreira, a další, 2003) , jsou zpřístupňovány snímky NDVI ze snímače MODIS družic EOS AM-1 a EOS PM-1 v rozlišení 250, 500 a 1000 metrů s 16denní periodou pořizování, mající díky více než 27leté kontinuitě potenciál pro hodnocení dynamiky vegetačního pokryvu.

5.1.3 Transformed Vegetation Index (TVI)

Jednoduchá úprava NDVI do TVI má za následek odstranění záporných hodnot, a odmocnění zmenšuje rozptyl (Jones, a další, 2010). Má však omezení, nemůže být vypočítán, pokud $NDVI < -0,5$.

$$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5}$$

(8)

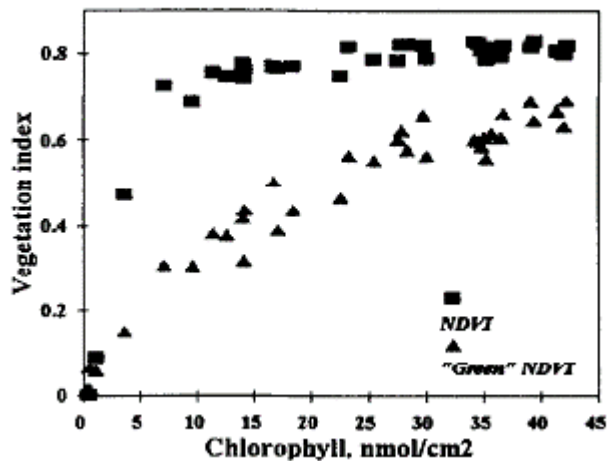
5.1.4 Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI)

Tvar GNDVI vychází z NDVI, za účelem větší citlivosti na koncentraci chlorofylu bylo pásmo červené barvy nahrazenou zelenou. Podoba vzorce podle (Gitelson, a další, 1998) je:

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green}$$

(9)

Ti ve své studii popisují lineární závislost hodnot GNDVI na koncentraci chlorofylu a na grafu (přiloženém níže) srovnává citlivost tohoto a NDVI ke koncentraci chlorofylu.



Obrázek 13: Závislost hodnot indexů NDVI a GNDVI na koncentraci roztoku chlorofylu.
Zdroj: (Gitelson, a další, 1998)

Z obrázku 13 je patrné, že GNDVI vykazuje nižší saturaci ve vyšších hodnotách koncentrace chlorofylu než základní NDVI, je pro tyto účely tedy vhodnější.

5.1.5 Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

Pro potlačení projevu holého půdního pokryvu na ploše snímku byl vytvořen tento index operující s opravným součinitelem L , který je funkcí vegetační hustoty (Křížová, 2016). Je dán vzorcem:

$$SAVI = \frac{(1 + L) \cdot (NIR - Red)}{NIR + Red + L} \quad (10)$$

Bannari a kol. (1995) informuje, že vzorec při hodnotě $L = 0,5$ vykazuje nejlepší výsledky, a že při $L = 0$ je roven NDVI.

5.1.6 Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI)

Baret a kol. (1989) vyvinul tento index dobře korespondující s LAI. Koeficienty a , b závisí na podobě linie půdy (křivce přímé úměry odrazivosti půdy ve dvou pásmech, zpravidla NIR a Red) a upravují (minimalizují vliv odrazivosti) tak hodnoty podle místních poměrů půdního podkladu.

$$TSAVI = \frac{a \cdot (NIR - a \cdot Red - b)}{a \cdot NIR + Red - a \cdot b} \quad (11)$$

5.1.7 Atmospherically Resistent Vegetation Index (ARVI)

Kaufman a Tanre (1992) dokládají studií odolnost tohoto indexu vůči atmosférickým vlivům, způsobenou užitím rozdílu odrazivosti v modré a červené části viditelného spektra a koeficientu β , závislým na typu aerosolu. Takováto technika má efekt samočinných atmosférických oprav. Stejný zdroj uvádí, že v porovnání s NDVI je ARVI průměrně 4krát méně citlivý na ovlivnění atmosférou při zachování podobné pružnosti. Autoři ukazují, že v případě řídkého vegetačního pokryvu a v situaci absence atmosférických dat, vykazuje užití $\beta = 1$ lepší výsledky. Při $\beta = 0$ ARVI = NDVI. Výpočet indexu dle (Kaufman, a další, 1992) je ze vzorce:

$$ARVI = \frac{NIR - [Red - \beta(Blue - Red)]}{NIR + Red - \beta(Blue - Red)}$$

(12)

5.1.8 Normalizovaný Red-edge Index (NRERI)

Tento index byl vyvinut, aby předčil schopnost jiných indexů užívaných k stanovení obsahu dusíku, které trpí nasycením v případě vyšší hustoty vegetace (takovým je např. NDVI). Hodnoty indexu vykazují lineární závislost na koncentraci dusíkatých živin (Normalized Red-edge Index – New Reflectance Index for Diagnostics of Nitrogen Status in Barley, 2013).

$$NRERI = \frac{RedEdge - Red}{NIR - Red}$$

(13)

5.1.9 Enhanced Vegetation Index (EVI)

Další z indexů vycházejících z tvaru NDVI využívá pásma modré:

$$EVI = 2,5 \cdot \frac{NIR - Red}{NIR + 6 \cdot Red - 7,5 \cdot Blue + 1}$$

(14)

Úkolem EVI je optimalizace vlivu spektrálního projevu půdního povrchu, redukce atmosférických vlivů (užité koeficienty ve jmenovateli) a odstranění problému saturace (viz kapitolu NDVI). Od roku 2000 je standartním poskytovaným produktem přístrojů MODIS a stal se velmi oblíbeným pro výše zmíněné přednosti. (Křížová, 2016) Snímky hodnot EVI jsou vydávány v rozlišení 250 a 500 m, s 16denní periodou (Solano, a další, 2010).

5.2 Ortogonální indexy

Hodnota odrazivosti zaznamenaná senzorem DPZ pro konkrétní pixel je průměrnou hodnotou odrazivosti všech typů povrchu o ploše, kterou pixel reprezentuje. V případě, kdy vegetační pokryv není souvislý (typicky případ semiaridních a aridních oblastí), je výsledná hodnota odrazivosti pixelu ovlivněna spektrálním projevem půdy na pozadí. Principem ortogonálních indexů je koncept linie půdy, který odlišuje projevy půdy a vegetace.

5.2.1 Leaf Area Index (LAI)

Již výše zmiňovaný LAI, index listové plochy, je definován jako podíl celkové plochy vrchní strany listů a jednotky plochy. Podává informace o vývoji listoví, energetické a CO₂ výměně, úzce souvisí se zachycováním slunečního záření, fotosyntézou, akumulací biomasy, transpirací a výměnou plynů. Je skvělým indikátorem zdraví a vývoje porostů, díky čemuž je užíván jako významný parametr předpovědních modelů. V praxi je měřen optickými senzory DPZ i pozemním měřením (Chen, a další, 1992). K dispozici jsou publikovány snímky v hodnotách LAI přístrojů MODIS Aqua/Terra v 500 m rozlišení, vypočtené z hodnot NDVI (Zhangsi, a další, 1997). (Boegh, a další, 2002) uvádí metodu výpočtu LAI z hodnoty EVI:

$$LAI = 3,618 \cdot EVI - 0,118$$

(15)

5.2.2 Difference Vegetation Index (DVI)

Nejjednodušší rozdílový vegetační index. Záporné hodnoty indikují vodní plochy, nulová hodnota holou zem a kladné hodnoty vegetaci. Dostatečně citlivý na přítomnou vegetaci, nedostačující při ovlivnění atmosférou a zastíněním mraky. (Jones, a další, 2010) ukazuje, jak na rozdíl od NDVI, SAVI vykazuje lineární závislost na zastoupení vegetačního pokryvu v jednotce plochy. Výpočet probíhá podle vzorce:

$$DVI = NIR - Red$$

(16)

5.2.3 Weighted Difference Vegetation Index (WDVI)

(Mróz, a další, 2004) uvádí podobu:

$$WDVI = NIR - a \cdot Red$$

(17)

Kde a – koeficient; směrnice přímky, závislý na sklonu linie půdy

5.2.4 Perpendicular Vegetation Index (PVI)

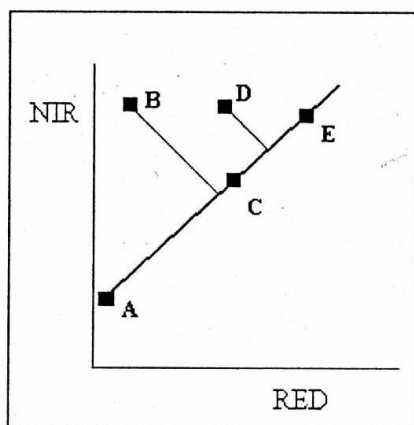
S již výše zmiňovanou linií půdy souvisí PVI index. Byl definován Richardsonem a Weigandem (Dobrovolný, 1998) jako kolmá vzdálenost pixelu, na jehož odrazivosti se určitou měrou podílí vegetace, od linie půdy, sestavitelné metodou nejmenších čtverců ze vztahu:

$$NIR_P = a \cdot RED_P + b$$

(18)

Kde NIR_P a RED_P jsou odrazivosti holé půdy v daných pásmech

a , b – koeficienty rovnice linie půdy



Obrázek 14: Princip PVI. Body A, C, E – linie půdy, body B, D – pixely s podílem odrazivosti vegetace.
Zdroj: (Dobrovolný, 1998)

(Jones, a další, 2010) pak definují PVI jako:

$$PVI = \frac{NIR - a \cdot Red - b}{\sqrt{a^2 + 1}}$$

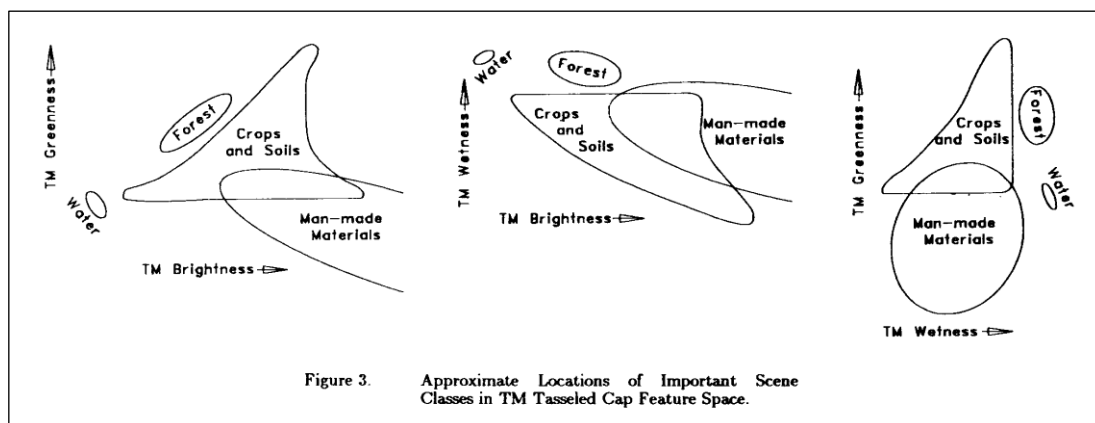
(19)

Kde a , b – koeficienty rovnice linie půdy.

Publikace (Jones, a další, 2010) předkládá tento index coby nejefektivnější index v odstranění projevů půdy při nízkém LAI. Zároveň (Bannari, a další, 1995) ho hodnotí jako neúčinný indikátor vegetačního stresu.

5.2.5 Transformace Tasseled Cap

Principem transformace Tasseled Cap je převedení původních pásem multispektrálního snímku do pásem nových, v nichž hodnoty pixelů budou lineární kombinací hodnot původních. Účelem techniky je zvýraznění odlišností ve spektrálním projevu půd a vegetace. Hodnoty jsou umístěny v novém pravouhlém souřadnicovém systému. V něm je primární osa nazývána „Brightness“, vyjadřuje sumu vážených hodnot odrazivosti ve všech pásmech, a je největším dílem zodpovědná za míru variability hodnot ve snímku. „Brightness“ je veličinou sledování holých a slabě porostlých půd, horninových výstupů, umělých povrchů (beton, asfalt aj.). Na tuto osu kolmá je osa „Greeness“, na níž vynášené hodnoty souvisí s odrazivostí zelené vegetace. Hodnoty ve směru osy „Wetness“ souvisí s vlhkostí půdy a obsahem vody v objektech obecně. Ve spojení s měřeními multispektrálních skenerů Landsat souvisí tato veličina s „žlutými“ částmi rostlin, jako jsou plodiny zralé ke sklizni či proschlé části stromů. Umístění zón odrazivosti různých druhů povrchů v soustavě zobrazuje obrázek níže:



Obrázek 15: Podoba Tasseled Cap a umístění zón odrazivosti různých povrchů v jeho rámci.
Zdroj: <http://www.ciesin.columbia.edu/docs/005-419/fig3.gif>

Uvedená tři pásma, představující osy nové soustavy, obsahují 97 % podstatné informace. Obsahem dalších pásem vzniklých transformací je šum obrazu, atmosférické ovlivnění, ovlivnění z geometrie snímání. (Environmental Systems Research Institute, 2016)

Koeficienty pro výpočet transformace Tasseled Cap mohou mít různé hodnoty podle typu použitého skeneru. Hodnoty výše uvedených indexů Brightness, Greeness a

Wetness vznikají dosazením hodnot původního snímku do vzorce (zde pro družici Landsat 7 ETM+):

$$Tasseled\ Cap_i = c_1 \cdot band_1 + c_2 \cdot band_2 + c_3 \cdot band_3 + c_4 \cdot band_4 + c_5 \cdot band_5 + c_7 \cdot band_7$$

(20)

Kde c_i je koeficient spektrálního pásma družice

$band_i$ – hodnota transformačního koeficientu pro družici.

(Mařašová, 2015)

Výhodami transformace je snížení pásem nesoucích podstatné informace, což zjednodušuje následující klasifikaci hodnot. Nevýhodou metody může být obtížné definování os v případě, že koeficienty nejsou důkladně stanoveny. Též není zaručeno, že vypuštěním dat pásma 4 (a výše) nepřicházíme o podstatnou informaci (Tso, a další, 2009).

5.3 Úzkopásmové vegetační indexy

S pokračujícím vývojem technologií na poli přístrojového vybavení DPZ, které jsou schopny rozlišovat rozdíly v odrazivostech v pásmech užších než 2 nm, a při rozšiřujících se možnostech zisku pořízených dat, narůstá zájem o užívání úzkopásmových vegetačních indexů. Ty umožňují zkoumat rostlinné pigmenty. Při jejich konstrukci je hledána vlnová délka, na které se projev cíleného pigmentu liší od pigmentů ostatních. Obecně řečeno, vlnové délky, na kterých je absorpce nízká, jsou vhodné pro sledování barviv vyskytujících se s velkou koncentrací. Naopak, vlnové délky, na kterých je absorpce značná, jsou užívány pro pigmenty o nízkých koncentracích (Jones, a další, 2010).

Bylo vyvinuto množství takových indexů, pracujících s dvěma až čtyřmi pásmy. Přinášejí zpřesnění při výpočtech v oblastech, pro které byly stvořeny, v oblastech užívání tzv. broadband indexů (širokopásmových, NDVI aj.) selhávají z důvodu většího ovlivnění vnějšími vlivy (Jones, a další, 2010). Dále jsou uvedeny některé z indexů této skupiny:

5.3.1 MERIS Terrestrial Chlorophyll Index

Vlnové délky jsou zvoleny jako středy pásem 10, 9 a 8 přístrojů MODIS.

$$MTCI = \frac{\rho_{753,75} - \rho_{708,75}}{\rho_{708,75} - \rho_{661,25}}$$

(21)

Kde ρ_λ – odrazivost na dané vlnové délce

5.3.2 Pigment-Specific Normalized Simple Ratio (PSNDa)

Pro detekci chlorofylu-A vznikl ve tvaru:

$$PSSRa = \frac{\rho_{800} - \rho_{680}}{\rho_{800} + \rho_{680}}$$

(22)

Kde ρ_λ – odrazivost na dané vlnové délce

5.3.3 Photochemical Reflectance Index (PRI)

Hodnoty tohoto indexu skrze zastoupení xantofylu zpravují o rostlinné produkci a stresu.

$$PRI = \frac{\rho_{570} - \rho_{531}}{\rho_{531} + \rho_{570}}$$

(23)

Kde ρ_λ – odrazivost na dané vlnové délce

5.3.4 Cellulose Absorption Index (CAI)

Pro účely detekce suchých rostlinných materiálů byl vyvinut v tvaru (Jones, a další, 2010):

$$CAI = \frac{\rho_{2000} - \rho_{2200}}{2 \cdot \rho_{2100}}$$

(24)

Kde ρ_λ – odrazivost na dané vlnové délce

5.4 Vodní indexy

Obecná technika sledování obsahu vody ve vegetaci je založena na existenci vodních absorpčních pásů od NIR do středního IR (viz kapitolu *Spektrální projev vody*)

5.4.1 970 Water Band Index (WBI)

$$WBI = \frac{\rho_{900}}{\rho_{700}}$$

(25)

Kde ρ_λ – odrazivost na dané vlnové délce

5.4.2 Leaf Water Index (LWI)

Nevýhodou tohoto jednoduchého indexu je ovlivňování absorpčními vlastnostmi vzdušné vlhkosti.

$$LWI = \frac{\rho_{1300}}{\rho_{1450}}$$

(26)

Kde ρ_λ – odrazivost na dané vlnové délce

5.4.1 Normalized Difference Water Index (NDWI₁₂₄₀)

Užití kratších vln středního IR snižuje vliv absorpce záření atmosférou (zejména absorpce vodní parou).

$$NDWI_{1240} = \frac{\rho_{980} - \rho_{1240}}{\rho_{1240} + \rho_{980}}$$

(27)

Kde ρ_λ – odrazivost na dané vlnové délce

(Jones, a další, 2010)

6 Závěr a Diskuze

Ač tato problematika není stanovena jako úkol mé práce, setkal jsem se několikrát v literatuře s posuzováním vhodnosti technik analýzy multispektrálních snímků. Při vědomí toho, že se posuzují snímky vyjádřené hodnotami spektrálních indexů, zařazuji tento odstavec:

Techniky analýzy změn lze rozdělit na metody pre-klasifikační a post-klasifikační. Metody post-klasifikační, založené na srovnávání výsledků stejné klasifikace dvou obrazů rozdílných v čase (viz kapitolu *Porovnání výsledků klasifikace*), byly shledány autorem příspěvku v (Multi-temporal Remote Sensing Analytics Approaches for Characterizing Landscape Change, 2001) jako nejspolehlivější. Tyto techniky však dle něho mohou vést k množení případných chyb vzniklých v průběhu procesu. Bylo vyvíjeno značné množství metod pre-klasifikačního přístupu. (Lunetta, a další, 2002) ukázal, že rozdíl obrazů v hodnotách NDVI dával stejné výsledky jako analýza vektoru změny (viz kapitolu *Analýza vektoru spektrální změny*). Zároveň ale uvádí, že obě metody vedly ke vzniku nepřijatelného množství chyb z opomenutí a nesprávného zařazení (viz *obrázek 1*). Analýza 20leté dynamiky LC území Mexika s užitím dat Landsat Multispektrálního skeneru v studii (Lunetta, a další, 2010) dospěla k zjištění, že proměnlivost ekosystémů ve spojení s chybami z klasifikace znemožnila detekci založenou na porovnání „pixel per pixel“ a „scéna od scény.“ Autoři na základě výsledků své studie doporučují užívání post-klasifikačních metod zjišťování změn v krajině. Naopak s úspěšným užitím pre-klasifikační metody obrazových podílů přichází (Todd, 1977). Ten ve své studii změn urbanizovaného území v Atlantě na podkladu dat pásma 5 družice Landsat s 92 % přesností určil všechny změny land cover. Jako ideální hodnotí metodu post-klasifikačního porovnání pro sledování změn land cover práce (Singh, 1989).

Sledovatelné změny krajiny jsou pouze ty, které se projevují změnou spektrálního chování povrchů v čase o dostatečné intenzitě tak, aby byla velikost změny větší než rozpoznávací schopnost přístrojového vybavení. Zároveň by měla být významně provázena změnou stavových parametrů vlastního objektu, aby bylo umožněno definování korelačního vztahu pozemním průzkumem. Ten posléze umožní kvantifikaci onoho typu změny. Celý proces vyžaduje získání multispektrálních snímků o dostatečném rozlišení. To byl donedávna omezením, neboť rozlišovací schopnost družicových systémů nemohla konkurovat leteckým. Dnes již však jsou k dispozici snímky velkého rozlišení družic Landsat 5 a 7 (rozlišení v panchromatickém režimu 15 m, 30 m v multispektrálním), SPOT 1–4 (10 a 20 m), SPOT 5 (2,5–5 a 10 m) nebo

ASTER (15–90), které dostačují pro studie zástavby. Data družic Landsat a SPOT stála při vzniku databáze land use/ land cover CORINE (Vostracká, 2008).

Zdá se být aktuálním trendem vývoj nových vegetačních indexů (Hede, a další, 2015) (Tian, a další, 2011).

Nejčastěji a nejširě užívaným spektrálním indexem je však dle mého pozorování množství dohledatelných prací, též podle (Ratan, a další, 2015) (Al-doski, a další, 2013), NDVI. Jeho využitelnost oceňují badatelé ve studiích biomasy a růstu vegetace, stejně jako pro účely získání informací o površích obecně z multispektrálního měření. Jednoduchost výpočtu a možnost interpretace rozličných dat satelitního snímání udělaly NDVI populárním indexem (Lyon, a další, 1998). Běžnou a efektivní metodou detekce změn vegetace je rozdíl snímků v hodnotách tohoto indexu. (Lu, a další, 2004)

Někteří autoři upozorňují na limitaci v podobě saturace NDVI při cílení husté vegetace, vedoucí k nelinearitě závislosti na sledovaném parametru (Barati, a další, 2011).

Práce (Ren, a další, 2014) se zabývá srovnáním, zda skupina indexů, pracujících ve svém vzorci s linií půdy, je vhodnější pro sledování semiaridních a aridních oblastí, jak by se mohlo očekávat. Výsledky studie však ukázaly, že indexy jako SAVI, MSAVI, TSAVI aj. vykazují horší výsledky v porovnání s indexy na půdě nezávislými, SR a NDVI. Autoři tedy vyvozují myšlenku, že na-půdě-závislé indexy nepřinášejí oproti jednoduchým indexům typu NDVI žádné výhody v měření proměn zelené vegetace aridních oblastí.

Z výše uvedeného, a z nakládání s odbornou literaturou v průběhu vypracovávání této závěrečné práce usuzuji, že přestože existuje trend vyvíjet a snahy zavádět nové spektrální indexy, trvá značná obliba a všestranné užívání „klasických“ indexů typu NDVI, GNDVI, SR apod. Vývoj oněch nových indexů je veden snahou minimalizovat nevýhody s klasickými indexy spojené, jakož i potřebou dosažení lepších korelačních vztahu s nově zkoumanými parametry složek krajiny.

7 Citovaná literatura

Al-doski, Jwan, Mansor, Shattri a Shafri, Helmi Z. M. 2013. NDVI Differencing and Post-classification to Detect Vegetation Changes in Hajaba City, Iraq. *Journal of Applied Geology and Geophysics*. 2013, Sv. 1, 2.

Bannari, A., Morin, D. a Bonn, F. 1995. A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*. 1995, Sv. 13, 1-2, stránky 95–120.

Barati, Susan, a další. 2011. Comparison the accuracies of different spectral indices for estimation of vegetation cover fraction in sparse vegetated areas. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2011, Sv. 14, stránky 49–56.

Baret, F., Jacquemoud, S. a Hanocq, J. F. 1993. About the Soil Line Concept in Remote Sensing. *Advances in Space Research*. 1993, Sv. 13, 5, stránky 281–284.

Boegh, Eva, a další. 2002. Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration, and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*. 2002, Sv. 81, 2-3, stránky 179–193.

Bonham, Charles D. 2013. *Measurements for terrestrial vegetation*. Fort Collins, Colorado : A John Wiley & Sons, Ltd, 2013. ISBN 978-0-4709-7258-8.

Boschetti, Luigi, Flasse, Stéphane P. a Brivio, Pietro A. 2004. Analysis of the conflict between omission and commission in low spatial resolution dichotomic thematic products: The Pareto Boundary. *Remote Sensing of Environment*. 2004, Sv. 91, stránky 280–292.

Burel, Françoise a Baudry, Jacques. 2003. *Landscape Ecology: concepts, methods, and applications*. Enfield, New Hampshire : Science Publishers, 2003. ISBN 9781578082148.

Dobrovolný, Petr. 1998. *Dálkový průzkum Země: digitální zpracování obrazu*. Brno : Masarykova univerzita, 1998. ISBN 80-210-1812-7.

Environmental Systems Research Institute, Inc. 2016. Tasseled Cap Function. [Online] 2016. [Citace: 24. 4 2017.]
<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/tasseled-cap-transformation.htm>.

Ferreira, L.G., Yoshioka, H. a Sano, E. E. 2003. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-

Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA). *Remote Sensing of Environment*. 2003, Sv. 87, 4, stránky 534–550.

Gitelson, Anatoly A. a Merzlyak, Mark N. 1998. Remote Sensing of Chlorophyll Concentration in Higher Plant Leaves. *Advances in Space Research*. 1998, Sv. 22, 5, stránky 689–692.

Halounová, Lena a Pavelka, Karel. 2005. *Dálkový průzkum Země*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03124-1.

Hede, Arie N. H., a další. 2015. A new vegetation index for detecting vegetation anomalies due to mineral deposits with application to a tropical forest area. *Remote Sensing of Environment*. 2015, Sv. 171, stránky 83–97.

Honková, Monika. 2008. *Mapování vegetace s využitím spektrálních indexů*. Geografický ústav, Masarykova univerzita: Přírodovědecká fakulta. Brno : autor neznámý, 2008. Diplomová práce.

Horák, Jiří. 2014. *Dálkový průzkum Země*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2014.

Chen, J. M. a Black, T. A. 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment*. 1992, Sv. 15, 4, stránky 421–429.

Jackson, Ray D. a Huete, Alfredo R. 1991. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*. 1991, Sv. 11, 3-4, stránky 185–200.

Jensen, John R. 2005. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Upper Saddle River : Prentice Hall, 3. vydání, 2005.

Jones, Hamlyn G. a Vaughan, R. A. 2010. *Remote sensing of vegetation: principles, techniques and applications*. New York : Oxford University Press, 2010. ISBN 978-0199207794.

Kaufman, Yoram J. a Tanre, Didier. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS–MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992, Sv. 30, 2, stránky 261–270.

Keleş, Sedat, Sivrikaya, Fatih a Çakir, Günay. 2007. Temporal Changes in Forest Landscape Patterns in Arvin Forest Planning Unit. *Environmental Monitoring and Assessment*. 1-3, 2007, Sv. 129, stránky 483-490.

Klem, Karel, a další. 2014. *Využití měření spektrální odrazivosti a odvozených specializovaných vegetačních indexů v pěstební technologii jarního ječmene*.

[Metodika pro zemědělskou praxi] Kroměříž, Brno, Havlíčkův Brod : Agrotest fyto s.r.o., 2014. ISBN 978-80-87555-12-5.

Kolář, Jan. 1990. *Dálkový průzkum Země*. Praha : SNTL, 1990. ISBN 80-03-00517-5.

Kolář, Jan, Halounová, Lena a Pavelka, Karel. 1997. *Dálkový průzkum Země 10*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1997. 80-01-01567-X.

Křížová, Kateřina. 2016. *Porovnání vybraných vegetačních indexů a určení jejich vhodnosti pro popis variability výnosu na zemědělském pozemku*. Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha : autor neznámý, 2016. Diplomová práce.

Lambin, Eric F. a Geist, Helmut. 2006. *Land-use and land-cover change: local processes and global impacts*. New York : Springer, 2006. ISBN 9783540322016.

Lipský, Zdeněk. 1998. *Krajinná ekologie pro studenty geografických oborů*. Praha : Karolinum , 1998. 80-7184-545-0.

Lu, D., a další. 2004. Change Detection Techniques. *Int. J. Remote Sensing*. 2004, Sv. 25, stránky 2365–2407.

Lunetta, R. S., a další. 2010. NALC/Mexico land-cover mapping results: Implications for assessing landscape condition. *International Journal of Remote Sensing*. 25.. 11. 2010, stránky 3129–3148.

Lunetta, Ross S., a další. 2002. Impact of vegetation dynamics on the identification of land-cover change in a biologically complex community in North Carolina, USA. *Remote Sensing of Environment*. 10. 2002, Sv. 82, stránky 258–270.

Lyon, J. G., a další. 1998. A Change Detection Experiment using Vegetation Indices. *Photogramm. Eng. Remote Sensing*. 1998, Sv. 64, stránky 143–150.

Mařašová, Martina. 2015. *Sledování změn v krajině za pomoci vegetačního indexu NDVI a transformace Tasseled Cap s využitím družicových dat Landsat*. Fakulta životního prostředí, Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha : autor neznámý, 2015. Diplomová práce.

Metody studia změn krajiny. **Kolejka, Jaromír. 2007.** Plzeň : Miscellanea Geographica: Universitatis Bohemiae Occidentalis, 2007, Sv. 13, stránky 75–90. ISBN 978-80-7043-658-5.

Mróz, Marek a Sobieraj, Anna. 2004. Comparison of Several Vegetation Indices Calculated on the Basis of a Seasonal Spot XS Time Series, and Their Suitability for Land Cover and Agricultural Crop Identification. *Technical Sciences*. 2004, Sv. 7, 7, stránky 39 – 66.

Multi-temporal Remote Sensing Analytics Approaches for Characterizing Landscape Change. **Lunetta, Ross S. 2001.** Trento : Word Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2001. Proceeding of the First International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images. stránky 339–346. ISBN 981-02-4955-1.

Normalized Red-edge Index – New Reflectance Index for Diagnostics of Nitrogen Status in Barley. **Novotná, K., a další. 2013.** Brno : Mendelova univerzita v Brně, 2013. Proceedings of International PhD Students Conference. stránky 120 –124. ISBN 978-80-7375-908-7.

Ratan, Jeevan, Nagar, J. B. a East, Andehi. 2015. GIS Resources: A Knowledge Archive. [Online] 2015. [Citace: 25.. 4. 2017.]
<http://www.gisresources.com/vegetation-indices/>.

Ren, H. a Feng, G. 2014. Are soil-adjusted vegetation indices better than soil-unadjusted vegetation indices for above-ground green biomass estimation in arid and semi-arid grasslands? *Grass and Forage Science*. 2014, Sv. 70, stránky 611–619.

Richter, R. 1997. Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 18, 1997, Sv. 5, 1099-1111.

Singh, Ashbindu. 1989. Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*. 1989, Sv. 10, 6, stránky 989–1003.

Solano, Ramon, a další. 2010. *MODIS Vegetation Index User's Guide*. [uživatelská příručka] Tuscon : The University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab, 2010.

Tian, Y. C., a další. 2011. Assessing newly developed and published vegetation indices for estimating rice leaf nitrogen concentration with ground- and space-based hyperspectral reflectance. *Field Crops Research*. 2011, Sv. 120, stránky 299–310.

Todd, W. J. 1977. Urban and regional land use change detected by using Landsat data. *Journal of Research by the US Geological Survey*. 1977, Sv. 5, stránky 527–534.

TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects On LAI And APAR Estimation. **Baret, F., Guyot, G. a Major, D. J. 1989.** Vancouver : IEEE Xplore, 1989. 12th Canadian Symposium on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symposium. stránky 1355–1358.

Tso, Brandt a Mather, Paul M. 2009. *Classification methods for remotely sensed data*. 2. Boca Raton : CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-9072-7.

Tupin, Florence, Inglada , Jordin a Nicolas , Jean-Marie. 2014. *Remote sensing imagery*. místo neznámé : Wiley-ISTE, 2014. ISBN 978-1-84821-508-5.

Vostracká, Barbora. 2008. *Mapování změn zástavby s využitím DPZ*. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, Přírodovědecká fakulta. Praha : Univerzita Karlova v Praze, 2008. Diplomová práce.

Zhangsi, Y. a Williams, T. H. L. 1997. Obtaining spatial and temporal vegetation data from landsat MSS and AVHRR/NOAA satellite images for a hydrologic model. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 1997, Sv. 63, stránky 69–77.