

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE
Přírodovědecká fakulta
Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie



NORMALIZACE ČASOVÝCH ŘAD DAT LANDSAT METODOU IR-MAD

Diplomová práce

NORMALIZATION OF TIME SERIES DATA OF LANDSAT

Master degree thesis

Bc. Jan Svoboda

Červenec 2019

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Přemysl Štych, Ph.D

Zadání diplomové práce

pro Jana Svobodu

obor Kartografie a geoinformatika

Název: NORMALIZACE ČASOVÝCH ŘAD DAT LANDSAT METODOU IR-MAD

Zásady pro vypracování

Zpracování dlouhých časových řad dat Landsat může přinést problém srovnávání snímků pořízených různými spektrometry. V případě této práce se bude jednat o spektrometry Thematic Mapper (TM) a Operational Land Imager (OLI). Ty měří v podobných pásmech ale s jinou citlivostí a rozmezím vlnových délek. Snímky ze dvou různých misí tak nemohou být považovány za zcela srovnatelné, přestože se konstruktéři pokoušeli zachovat kontinuitu mezi snímky TM a OLI.

Jak atmosférická korekce LEDAPS pro TM, tak LaSRC pro OLI vychází z atmosférické korekce 6S. Řadu parametrů získávají tyto korekce z externích zdrojů. Nepřesnost vstupních parametrů může způsobit problémy při analýze časových řad. Konkrétním nedostatkem těchto korekcí je, že počítají jen s jedním příchodím úhlem slunce a úhlem mezi normálou povrchu a pozorovatelem. Tyto úhly jsou ale pro každý pixel na povrchu odlišné (MASEK et al., 2006; DONINCK, TUOMISTO, 2017).

Vzájemné srovnání snímků v průběhu dlouhých časových řad také negativně ovlivňuje stárnutí senzorů. Sensory mohou ke konci mise měřit odlišně než na počátku. Zejména se to týká snímků TM z Landsatu 5. Tento nosič snímkoval téměř 29 let a několikrát překonal svoji životnost. Porovnání dat pořízených od začátku mise po 23. rok jejího trvání ukázalo, že degradace se projevila hlavně ve viditelné části spektra. Citlivost na modrou se snížila o 19 %, na zelenou o 16 % a u červené o 8 %, u dalších pásem již degradace nebyla prokazatelná (CHANDER, G., 2007).

Pokud chceme zpracovávat dlouhé časové řady satelitních snímků s různými typy senzorů, je vhodné kvůli výše zmíněným důvodům data normalizovat, respektive vytvořit vzájemně porovnatelnou časovou řadu s eliminací různých podmínek během pořízení snímků a odlišných radiometrů.

Tato práce volně navazuje na diplomovou práci LAŠTOVIČKA (2016), kde byly rozebrány základní metody normalizace. Tato diplomová práce naváže s komplexnější a sofistikovanější normalizační metodou IR-MAD, jenž je v současnosti z RRN metod jednou z nejvíce užívaných. Cílem bude prokázání významu normalizace pomocí invariantních prvků vybraných pomocí IR-MAD.

Normalizace se bude aplikovat na časovou řadu snímků Landsat 5 a Landsat 8 s provedenými atmosférickými korekcemi.

Konkrétní cíle DP jsou následující:

- Seznámení se s metodami a datovými vstupy MAD a IR-MAD a jejím využitím v procesech normalizace družicových dat
- Využití a rozvoj metod relativní radiometrické normalizace (pomocí pseudoinvariantních ploch vybraných pomocí metody IR-MAD) na časovou řadu snímků Landsat 5 a Landsat 8 (CDR data Level 2) s cílem vytvoření komparativní časové řady.
- Vyhodnocení vlivu použité normalizace porovnáním s původní časovou řadou.
- Na základě testování výše uvedených metod a dat navrhnout dílčí metodické vylepšení vedoucí k lepším výsledkům normalizace
- Navrženou metodu/algorithmus otestovat na vybraném území Česka

Konkrétními výstupy práce budou:

- rešerše relevantní odborné literatury, přehled používaných metod normalizace
- vytvoření normalizované časové řady dat Landsat 5 a Landsat 8 za období 1984 - 2017
- na základě testování použitých metod a dat navrhnout dílčí metodické vylepšení vedoucí k lepším výsledkům normalizace
- statistické zpracování získaných výsledků, zhodnocení vlivu normalizace na zpracovaná data a vyhodnocení přesnosti navržené metody
- stanovení míry vlivu jednotlivých zkoumaných faktorů (atmosférická korekce/ příchodí úhel slunce a úhel mezi normálou povrchu a pozorovatelem, stárnutí senzoru) na dlouhodobou časovou řadu Landsat

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: 40-80 stran

Seznam odborné literatury:

- CANTY, M. J., NIELSEN, A. (2008). Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. *Remote Sensing of Environment*, 112, s. 1025-1036.
- CANTY, M. J., NIELSEN, A. A., & SCHMIDT, M. (2004). Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 91(3-4), s. 441-451.
- DONINCK, V. J., TUOMISTO, H. (2017). Evaluation of directional normalization methods for LandsatTM/ETM+ over primary Amazonian lowland forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58, s. 249-263.
- FURBY, S. L., CAMPBELL, N. A. (2001). Calibrating images from different dates to 'like-value' digital counts. *Remote Sensing of Environment*, 77, 186-196.
- HALOUNOVÁ, L., PAVELKA K. (2008). *DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ*. ČVUT, 1. vydání, 192 s. ISBN: 978-80-01-03124-7.

- CHANDER, G., MARKHAM, L. B., BARSİ A. J. (2007). Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 4, s. 490-494
- CHANDER, G., MARKHAM, L. B., HELDER, L. D. (2009). Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, s. 893-903.
- LAŠTOVIČKA, J. (2016). *HODNOCENÍ ČASOVÝCH ŘAD DRUŽICOVÝCH SNÍMKŮ K POZOROVÁNÍ DISTURBANCÍ V OBLASTI NÍZKÝCH TATER*, Univerzita Karlova v Praze, diplomová práce.
- MASEK G. J. et al. (2006). A Landsat Surface Reflectance Dataset for North America, 1990–2000. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 3, s. 68-72.
- MISHRA, N., HELDER, D., BARSİ, J., MARKHAM, B. (2016). CONTINUOUS CALIBRATION IMPROVEMENT: LANDSAT 5 THROUGH LANDSAT 8. *Remote Sensing of Environment*, 185, S. 7-15.
- NIELSEN, A. A. (2007). The Regularized Iteratively Reweighted MAD Method for Change Detection in Multi- and Hyperspectral Data. *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING*, 16, s. 463-478.
- SCHOTT, J. R., SALVAGGIO, C., & VOLCHOK, W. J. (1988). Radiometric scene normalization using spseudo-invariant features. *Remote Sensing of Environment*, 26, s. 1– 16.
- SONG, C., WOODCOCK, C., SETO, K., LENNEY, M., MACOMBER, A. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment*, 75, s. 230-244.
- VERMOTE, E. et al. (2006). Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector (6SV). 6S User Guide Version 3. Dostupné z: http://6s.ltdri.org/files/tutorial/6S_Manual_Part_1.pdf.

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Přemysl Štych, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Mgr. Josef Laštovička

Datum zadání diplomové práce: 30/11/2018

Termín odevzdání diplomové práce: 31/07/2019

.....
 RNDr. Přemysl Štych, Ph.D.
 Vedoucí diplomové práce

.....
 Doc. .Ing. Jan Kolář, CSc
 Garant studijního program

V Praze dne

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citoval.

Jsem si vědom toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 25. dubna 2016

.....

Jan Svoboda

Poděkování

Velké poděkování patří panu doc. RNDr. Přemyslu Štychovi Ph.D., vedoucímu této práce a Mgr. Josefu Laštovičkovi, konzultantovi této práce, za jejich pomoc, rady, trpělivost a veškerý čas, který mi věnovali při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mojí rodině, především mému tátovi za jeho ochotu mi pomoci kdykoliv jsem to potřeboval a v neposlední řadě i mé přítelkyni.

Obsah

1	Úvod	6
2	Úvod do problematiky	8
2.1	Mise Landsat a předzpracovatelské úlohy.....	8
2.1.1	Multispektrální senzory misí Landsat	8
2.1.2	Atmosférické korekce pro mise Landsat	12
2.1.3	Problémy při zpracování časových řad dat Landsat.....	16
2.2	Relativní radiometrické normalizace (RRN).....	19
2.2.1	Ridge	20
2.2.2	Pseudoinvariant Features (PIF) metody.....	20
2.2.3	Normalizace pomocí metody MAD a její rozšíření.....	21
3	Metodika	24
3.1	Použitá časová řada snímků Landsat a její předzpracování.....	24
3.2	Výběr zájmových lokalit.....	25
3.3	Metoda IR-MAD.....	29
3.3.1	Základní principy metody.....	29
3.3.2	Aplikování skriptů iMad.py a radcal.py na časovou řadu snímků	30
3.4	Statistické vyhodnocení výsledků	31
3.4.1	Vyhodnocení celé časové řady.....	32
3.4.2	Rozdělení časové řady na dva výběry, jejich vyhodnocení a porovnání	33
3.4.3	Rozdělení časové řady na čtyři výběry, jejich vyhodnocení a porovnání.....	34
4	Výsledky.....	35
4.1	Zastoupení záporných hodnot v původní a normalizované časové řadě	35
4.2	Vyhodnocení celé časové řady	36
4.3	Rozdíl mezi senzory TM a OLI	38
4.4	Vliv pozice WRS-2 na hodnoty senzorů TM	41
4.5	Vliv stáří snímků na časovou řadu ze senzoru TM	44
4.6	Vliv kombinace pozice WRS-2 a stáří senzoru TM	47
5	Diskuze	50
6	Závěr	53
7	Zdroje	54
8	Seznam příloh	58

Abstrakt

Spektrální odrazivost zemského povrchu získaná z družicových snímků by měla být nezávislá na vnějších faktorech a měla by vypovídat pouze o vlastnostech povrchu, konkrétně o podílu spektrální záře odražené od objektu. V časové řadě 63 snímků družice Landsat 5 bylo v rámci práce prokázáno, že některé vnější faktory se zřetelně projevují i u snímků, které již prošly atmosférickou korekcí. Konkrétně se jednalo o stáří snímku a pozici WRS-2, ze které byl snímek pořízen. Stáří snímku se projevovalo postupným poklesem hodnot spektrální odrazivosti povrchu u neměnných lokalit především ve viditelné části elektromagnetického spektra a souvisí s degradací senzoru. Pozice WRS-2 se projevuje především v infračervených pásmech. Západní části snímků jsou světlejší (vyšší hodnoty spektrální odrazivosti), než východní části. To může způsobovat rozdíl v hodnotách při pozorování jedné lokality ze dvou překrývajících se pozic WRS-2. Aplikováním metody určené původně pro relativní radiometrickou normalizaci IR-MAD na normalizaci dat spektrální odrazivosti povrchu byly tyto problémy korigovány tak, že se v datech již přestaly jednoznačně projevovat.

Pokud potřebujeme prodloužit časovou řadu družicových snímků, můžeme toho dosáhnout kombinací snímků z vícero družic. V takovém případě je nutné brát v úvahu možné rozdíly v konstrukci senzorů různých družicových misí. V této práci bylo porovnáváno 63 snímků ze senzoru TM (Landsat 5) s řadou 18 snímků ze senzoru OLI (Landsat 8). V časových řadách těchto snímků pro konkrétní neměnné lokality byl prokázán statisticky významný rozdíl mezi daty z těchto družic. Aplikováním normalizační metody IR-MAD na tato data, byly snímky upraveny tak, že tento rozdíl již nebyl prokazatelný a všechny snímky odpovídaly spektrální odrazivosti povrchu ze senzoru TM.

Klíčová slova

Časové řady, Landsat Level-2, IR-MAD, Thematic Mapper, Operational Land Imager, invariantní prvky, relativní normalizace

Abstract

Spectral reflectance of the Earth surface, obtained from the satellite images, should be independent from the external influences and should reflect the surface properties, specifically the proportion of the radiance reflected from the object. It was proved in this paper that the time series of the 63 images from the Landsat 5 satellite were visibly influenced by the external factors even in the case of the images already atmospherically corrected. These external factors were age of the image and WRS-2 position from which the image was obtained. Age of the image was documented with the steady decrease of the spectral reflectance values of the invariant features, especially in the visible part of the electromagnetic spectrum, caused by the sensor degradation. The influence of the WRS-2 position was documented especially in the infrared bands. The western parts of the images are lighter (have higher values of the surface reflectance) than the eastern parts. That may cause the difference between values when monitoring one spot in two overlapping WRS-2 positions. The method originally used for the relative radiometric normalization IR-MAD was here applied to normalize the surface reflectance data, and resulted in the fact that these influences did not show up any more.

In order to extend the time series of the satellite images it is possible to combine the data from more satellites. In such a case it is important to consider the possible differences in the sensor design of the different satellites. Here the 63 images from the TM sensor of the Landsat 5 satellite were compared with 18 images from the OLI sensor of the Landsat 8 satellite. In the time series of these images of the invariant features the statistically significant difference was proved by applying the normalization IR-MAD method on these data. The images were modified so, that the differences diminished and all the normalized images had the surface reflectance values corresponding to those from the TM sensor.

Key words

Time series, Landsat Level-2, IR-MAD, Thematic Mapper, Operational Land Imager, invariantní prvky, relativní normalizace

Seznam použitých zkratek

6S	Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
AOT	Aerosol Optical Thickness
CDR	Climate Data Records
CLC	Corine Land Cover
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DN	Digitatal Numbers
DOS	Dark Object Subtraction
ESA	European Space Agency
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
IDL	Interactive Data Language
IR-MAD	iteratively reweighted Multivariate Alteration Detection
LaSRC	The Landsat 8 Surface Reflectance Code
LEDAPS	Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing Systém
MAD	Multivariate Alteration Detection
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSS	Multispectral Scanner Systém
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared
OLI	Operational Land Imager
PCA	Principal Component Analasis
PIF	Pseudo Invariant Features
RBV	Return Beam Vidicon
RGB	Red, Green, Blue
RRN	Relative Radiometric Normalization
SR	Surface Reflectance
SWIR	Short-wavelength infrared
TIRS	Thremal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
TOA	Top Of Atmosphere
USGS	United States Geological Survey
WRS-2	Worldwide Reference Systém 2

1 Úvod

Prostřednictvím časových řad satelitních snímků je možné dokumentovat vývoj celé řady procesů na zemském povrchu. Například se jedná o dopady klimatických změn, nebo sledování rozlohy různých kategorií krajinného pokryvu, jako je pokrytí povrchu ledovci (BAUMAN, P. R., 2011), nebo lesním porostem (SOUZA et al., 2013).

Pokud chceme zpracovávat časové řady satelitních snímků je vhodné data normalizovat. Normalizované, neboli vzájemně porovnatelné časové řady, se většinou docílí výpočtem odrazivosti povrchu. Pro výpočet odrazivosti povrchu slouží různé atmosférické korekce, mezi kterými existují podstatné rozdíly a tak přináší rozdílné výsledky (SONG et. al., 2001).

Atmosférické korekce 6S a jiné, které z 6S vychází (nejčastěji aplikované u misí Landsat, MODIS i Sentinel 2), nemusí správně určit vliv atmosféry na naměřenou radiaci a jiných vnějších faktorů. Pro správný průběh těchto korekcí je zapotřebí velké množství údajů, které by měly být co nejpřesnější, mezi takové údaje patří zejména přítomnost ozónu, vodní páry, oblačnosti, sklon povrchu, orientace povrchu atd. Tyto korekce berou informace o vnějších parametrech z různých přesných zdrojů a často také z různě velkých gridů.

Vzájemné srovnání snímků je v průběhu dlouhých časových řad také negativně ovlivněno stárnutím senzorů. Sensory mohou ke konci mise měřit jinak, než na jejím počátku. Zejména se to týká snímků TM z Landsatu 5, protože několikrát překonal svoji plánovanou životnost a snímkoval téměř 29 let (CHANDER, G., 2007).

Další výzvu představuje porovnávání snímků pořízených různými senzory z více misí Landsat, konkrétně senzory TM a OLI. Spolu s technologickým vývojem jsou totiž družice osazovány stále vyspělejšími spektrometry. Ty většinou měří v poněkud odlišném rozmezí vlnových délek a také s jinou citlivostí na různé vlnové délky, než je tomu u senzorů používaných u starších misí. Zároveň jsou na takto odlišně získaná data aplikovány i odlišné atmosférické korekce.

Výše zmíněné problémy výzkumníci berou více či méně v potaz a je vyvinutá celá řada metod, jak je řešit. Jedna z těchto metod je například Cross-Calibration. Výsledkem metody je nový Gain a Bias navržený pro jednotlivá pásma jednoho ze senzorů tak, aby vypočtené spektrální záře (TOA) byly porovnatelné se spektrálními zářemi pásem z druhého senzoru. Metoda byla například použita k tomu, aby TOA vypočtená ze snímků senzoru TM (Landsat 5) byla srovnatelná se spektrální září, vypočtenou ze snímku ETM+ (TEILLET et al., 2001).

Další možnou metodou, jak učinit dva různé satelitní snímky, nebo produkty z nich srovnatelnější, jsou relativní radiometrické normalizace (RRN). Tyto metody jsou založeny především na výskytu stejných invariantních prvků mezi scénami. Invariantní prvky jsou povrchy, u kterých neproběhla mezi pořízením dvojice referenčního a cílového snímku žádná změna. Hodnoty spektrální záře se vykreslí do korelačního diagramu, kde jedna osa bude představovat snímek referenční a druhá cílový. Vztah, který vychází z tohoto diagramu (obvykle lineární regrese), slouží k úpravě cílového snímku na produkt odpovídající referenčnímu snímku, tato úprava tedy minimalizuje radiometrické rozdíly způsobné atmosférickou absorpcí, rozdílnou pozicí Slunce v době snímkování atd. (YANG, LO, 2000). Tyto metody se od sebe liší především výběrem invariantních bodů. Jednou takovou metodou výběru invariantních bodů jsou MAD a IR-MAD. Tyto

metody je možné aplikovat na data (DN, TOA), pro která není znám dostatek vnějších parametrů, aby z nich mohla být vypočtena odrazivost povrchu. Pokud existuje jiný snímek stejné lokality, pro který jsou známy vnější parametry nutné pro výpočet odrazivosti povrchu, je možné snímek této odrazivosti použít jako referenční a na jeho základě znormalizovat snímky, pro které vnější parametry chybí (CANTY, 2014). RRN tak často nahrazovaly atmosférické korekce (například SCHROEDER, T. A., et al., 2006).

Přestože metody obdobné RRN byly používány například pro získání převodního vztahu mezi vypočtenými spektrálními indexy z různých senzorů (konkrétně například vztah pro převod ETM+ NDVI na MODIS NDVI v GAN et al., 2014), nebyly relativní normalizace využity pro úpravu spektrální odrazivosti jednoho snímku tak, aby byl porovnatelnější se spektrální odrazivostí jiného snímku. Právě takové užití použil LAŠTOVIČKA (2016), když metody používané jako RRN, konkrétně PIF: Linear Based a Ridge aplikoval pro normalizaci odrazivosti povrchu časové řady snímků Landsat 4, 5, 7 a 8. Tato práce volně navazuje právě na zmiňovanou diplomovou práci LAŠTOVIČKA (2016). Současná práce rozšiřuje doposud získané znalosti pomocí komplexnější a sofistikovanější normalizační metody IR-MAD. Cílem bude prokázání významu normalizace pomocí invariantních prvků, automaticky vybraných pomocí IR-MAD. Normalizace se bude aplikovat na časovou řadu snímků Landsat 5 a Landsat 8 s provedenými atmosférickými korekcemi. Důvodem, proč se bude normalizace aplikovat na SR data, je především to, že atmosférické korekce mohou v rámci rozsáhlejších lokalit brát v potaz nehomogenitu vnějších faktorů v rámci rozsáhlejších oblastí. Mezi takové faktory může například patřit vlhkost, teplota povrchu, nebo úhel Slunce.

Hypotézy

Zejména se jedná o přínosy, které by mohly přinést RRN u CDR časových řad dat Landsat:

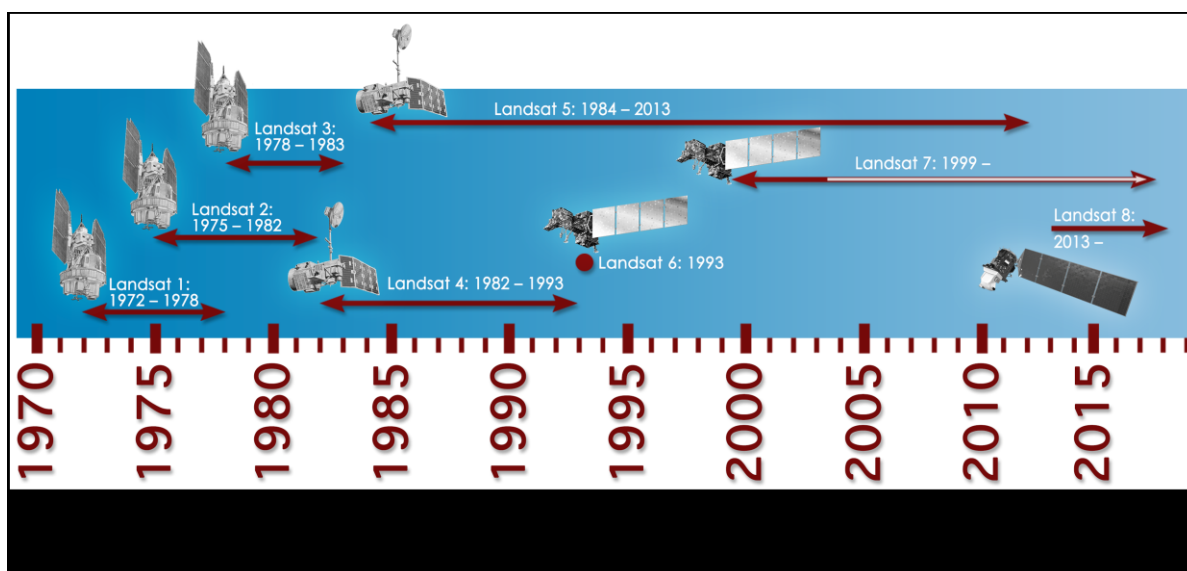
1. Normalizování multisenzorových dat na srovnatelný produkt a získání kompatibilní, lépe porovnatelnější časové řady. Konkrétně se bude jednat o snímky ze senzorů TM a OLI.
2. Korekce vnějších faktorů jako je vliv stárnutí senzorů, nebo korekce atmosférických podmínek, které nemusely být adekvátně zahrnuty do algoritmů atmosférických korekcí.

2 Úvod do problematiky

2.1 Mise Landsat a předzpracovatelské úlohy

V průběhu 20. století byla do vesmíru vyslána řada nosičů s multispektrálními radiometry (mezi nejvýznamnější patří mise Landsat, Sentinel a Modis). Většina snímků těchto misí byla obtížně dostupná a to vedlo k nízkému využití tohoto typu dat. Skutečný průlom ve vědeckém bádání v oblasti DPZ znamenal vznik volně dostupných archivů snímků (WULDER et al. 2012), distribuovaných prostřednictvím internetových stránek. Největší takovou databází mají bezesporu mise Landsat.

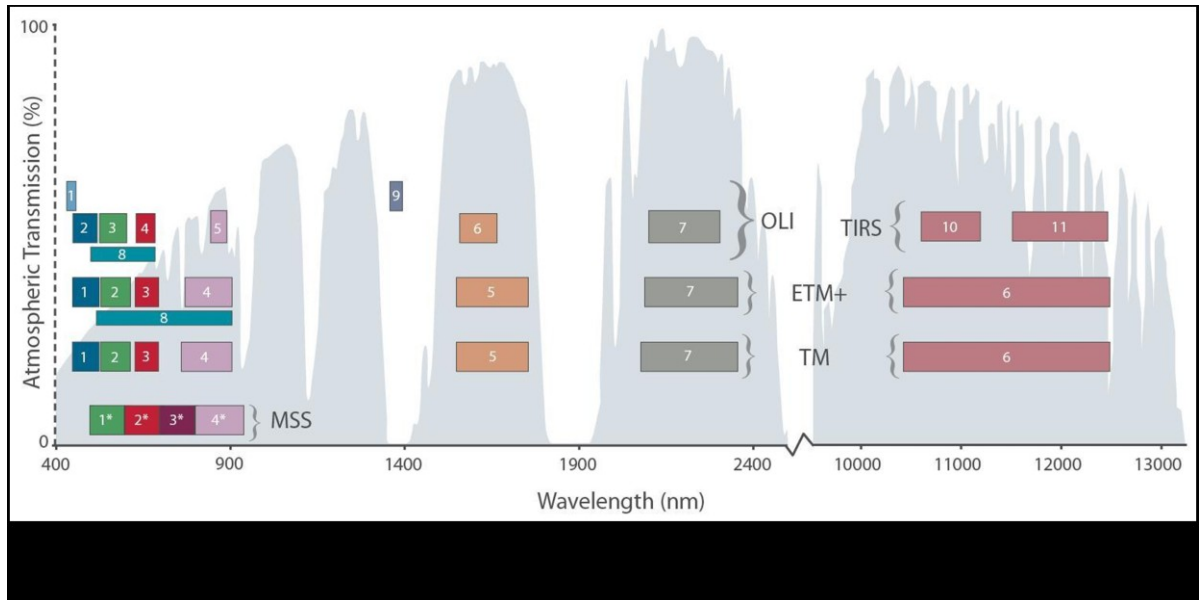
První mise Landsat přinesla multispektrální snímky zemského povrchu v červenci roku 1972. Postupem času následovalo dalších 7 misí a na rok 2020 se chystá v pořadí již devátá mise Landsat. To znamená, že pro řadu míst máme téměř půl století dlouhou řadu snímků, dostupnou široké veřejnosti. Snímky jsou dostupné prostřednictvím serveru <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Posloupnost jednotlivých misí je zobrazena na Obr. 1.



2.1.1 Multispektrální senzory misí Landsat

V průběhu času byly jednotlivé družice Landsat vybaveny různými spektrometry, schopnými měřit v různých vlnových délkách, s různou citlivostí na nejrůznější vlnové délky a s různým prostorovým rozlišením. Rozsah vlnových délek jednotlivých pásem sensorů, kterými byly osazovány nosiče v průběhu mise Landsat, je vidět na Obr. 2. Změna sensorů byla motivována buďto technickým pokrokem, nároky vědců, nebo snahou vyhnout se zaznamenávání vlnových délek, které podléhají absorpci v atmosféře. Přesto se inženýři vždy snažili, aby snímky z nových radiometrů byly porovnatelné se snímky ze starších misí. Jedním takovým faktorem je například zachování 30 metrového rozlišení pixelů u multispektrálních sensorů, které v podobných pásmech snímkovaly již dříve (USGS, 2013). Ostatní multispektrální družicové mise nemají oproti misím Landsat srovnání. European Space Agency (ESA) vyslala do kosmu dvě družice Sentinel-2, ty sice mají ve všech multispektrálních pásmech, srovnatelných s misemi Landsat, lepší rozlišení (10, 20 a 60 m), ale první

z družice začala snímkovat teprve v roce 2015. Snímky z této družice tak nepředstavují porovnatelný zdroj s misemi Landsat. Další porovnatelnou misí je Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Výhodou této mise je to, že dokáže získat snímek povrchu každý, nebo alespoň každý druhý den celkově v 36 pásmech. Snímkování probíhá od roku 1999, ale nevýhodou je oproti misím Landsat prostorové rozlišení, které se pohybuje od 250-1000 m.



Multispectral Scanner (MSS)

Jednalo se o první používaný mechanický skener misí Landsat. Využívá oscilujícího zrcátka a čidel ve čtyřech řádcích po šesti. Každý z těchto čtyř řádků odpovídá jednomu spektrálnímu pásmu a čidlo jednomu pixelu. MSS obsahoval pásma 0,5 - 0,6 μm (žlutá); 0,6 - 0,7 μm (červená) a dvě infračervená pásma o vlnových délkách 0,7 - 0,8 μm a 0,8 - 1,1 μm viz Tab. 1. V jeden okamžik dokáže tento skener ve směru snímání nasnímat 480 m povrchu (6 pixelů s velikostí 80 metrů). Pohybem oscilujícího zrcátka se při snímání postupně pokryje celá scéna, která dosahuje rozměru přibližně 185 x 185 km. Celá doba snímání trvá 25 sekund a to v kombinaci s rotací Země kolem své osy a pohybem nosiče způsobuje lichoběžníkový tvar scény. Tím se liší od zařízení RBV (Return Beam Vidicon), které nasnívalo celou scénu v jeden okamžik a snímek odeslalo na zem, kde byl vyvolán. Dalším významným rozdílem oproti RBV bylo zaznamenávání naměřených hodnot, jako digitálního čísla v 6 bitové struktuře. To oproti snímkům ze skenerů RBV (používaných u prvních misí Landsat spolu s MSS, které fungovaly na principu přenosu signálu z televizních kamer a na zemi se vyvolávaly na film) představuje možnost naměřené hodnoty zpracovávat digitálně pomocí výpočetní techniky bez toho, aniž by se musely oskenovat (EARTH OBSERVATION PORTAL).

Těmito senzory byly osazeny mise Landsat 1. generace (Landsat 1, 2 a 3) spolu se senzory RBV. Dále kromě modernějších TM senzorů byly těmito senzory osazeny i Landsat 4 a 5 v zájmu zachování kontinuity s misemi Landsat 1 - 3. Na Landsatu 5 tento skener snímkoval až do roku 1999, kdy už byla časová řada snímků TM natolik rozsáhlá, že bylo rozhodnuto skončit se snímkováním pomocí MSS. Tím překvapivě kariéra tohoto senzoru ještě neskončila, když roce 2011 vypověděl službu skener TM na nosiči Landsat 5, bylo rozhodnuto uvést znovu do provozu skener MSS a v průběhu let 2012 a 2013, bylo pořízeno dalších 15 000 snímků (USGS, 2018 a). To pomohlo zacetit

mezeru v časových řadách satelitních snímků Landsat do doby, než byl uveden do provozu Landsat 8 se skenery OLI a TIRS.

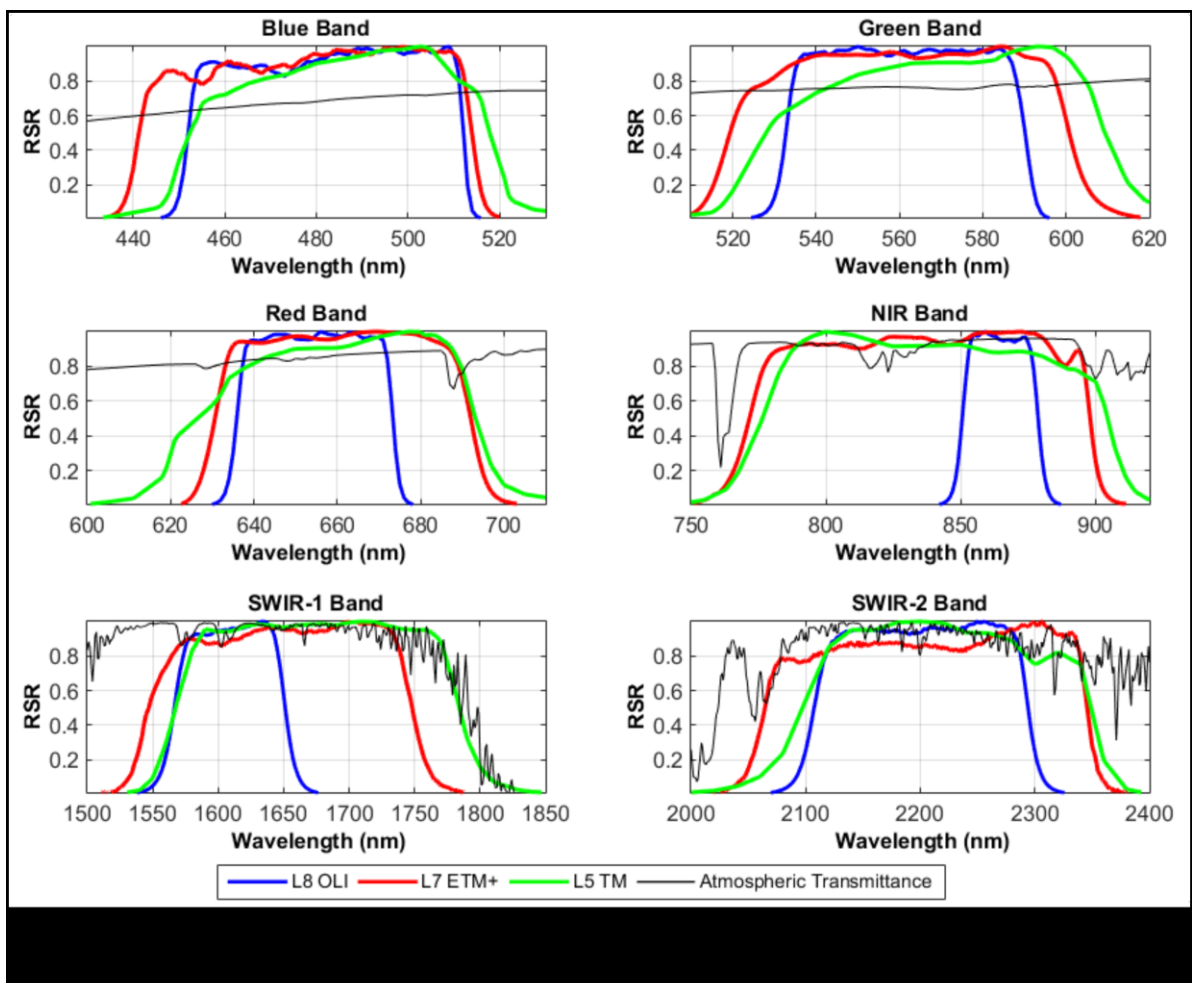
Landsat MSS Band	Wavelength	Useful for mapping
Green	0.5 - 0.6	Sediment-laden water, delineates areas of shallow water
Red	0.6 - 0.7	Cultural features
Near Infrared	0.7 - 0.8	Vegetation boundary between land and water, and landforms
Near Infrared	0.8 - 1.1	Penetrates atmospheric haze best, emphasizes vegetation, boundary between land and water, and landforms

Tab. 1 Jednotlivá spektrální pásma MSS

(Zdroj: <https://landsat.usgs.gov/what-are-best-spectral-bands-use-my-study>)

Thematic Mapper (TM) a Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)

Těmito senzory byly osazeny družice Landsat 4 a 5 (TM) a také Landsat 7 (ETM+). Senzory TM snímají celkem 7 pásmy. První tři pásma snímají ve viditelném světle (RGB). 4. pásmo je v blízkém infračerveném záření, 5. a 7. pásmo jsou v krátkých vlnových délkách infračerveného záření. V pásmu šest je zaznamenáváno IR záření středních vlnových délek. ETM+ je navíc ještě vybaven panchromatickým osmým pásmem v rozmezí od zeleného po infračervené elektromagnetické spektrum, které umožňuje pomocí pan-sharpeningu získat data s rozlišením až 15 m. Pásma 1, 2, 3, 4, 5 a 7 jsou v rozlišení 30 metrů. Termální pásmo 6 má rozlišení 120 metrů. Základní charakteristiky



jednotlivých pásem jsou v Tab 2. Snímaná oblast dosahovala 185 x 172 km. Digitální hodnoty jsou zaznamenávány do 8-bitové struktury. Ze všech senzorů misí Landsat má právě tento na svědomí nejdelší nepřetržitou časovou řadu snímků a to od roku 1984 (Landsat 4) do roku 2011, než se tento senzor porouchal na Landsatu 5. Landsat 7 nesoucí ETM+ bohužel takové štěstí neměl, protože 31. 5. 2003 došlo k poruše skenovacího zrcátka, což se projevuje pruhy v pořízených snímcích, které nenesou žádnou hodnotu (GISAT 2018).

Přestože podle rozpětí vlnových délek odpovídá TM téměř ETM+ (jediný rozdíl v rozsahu představuje pásmo 7, které u TM začíná od 2,08 do 2,35 μm a u ETM+ začíná od 2,09 do 2,35 μm (viz Tab. 2), tak citlivost na jednotlivé vlnové délky uvnitř spektrálních pásem se liší. Je to možné vidět na Obr. 3.

Band	Wavelength	Useful for mapping
1. Blue	0.45 - 0.52	Bathymetric mapping, distinguishing soil from vegetation, and deciduous from coniferous vegetation
2. Green	0.52 - 0.60	Emphasizes peak vegetation, which is useful for assessing plant vigor
3. Red	0.63 - 0.69	Discriminates vegetation slopes
4. Near Infrared	0.77 - 0.90	Emphasizes biomass content and shorelines
5. SWIR 1	1.55 - 1.75	Discriminates moisture content of soil and vegetation; penetrates thin clouds
6. Thermal Infrared	10.40 - 12.50	Thermal mapping and estimated soil moisture
7. SWIR 2	2.08/2.09 - 2.35	Hydrothermally altered rocks associated with mineral deposits
8. Panchromatic	0.52 - 0.90	15 meter resolution, sharper image definition

Tab. 2 Jednotlivá spektrální pásma TM a ETM+

(Zdroj: <https://landsat.usgs.gov/what-are-best-spectral-bands-use-my-study>)

Operational Land Imager (OLI) a Thermal Infrared Sensor (TIR)

Těmito senzory byl osazen Landsat Data Continuity Mission (Landsat 8) a víceméně totožnými senzory bude osazen i Landsat 9. Veškerá data jsou zaznamenávána ve 12-bitové struktuře. Ve snaze zachovat kontinuitu s TM a ETM+ bylo zachováno rozlišení u většiny pásem OLI 30 metrů a i stejná mřížka pro převzorkování hodnot. Konstrukce jednotlivých čidel pro měření v jednotlivých pásmech je nicméně odlišná od TM a ETM+ a tak je u většiny pásem rozdílné rozpětí vlnových délek. Tab. 3 obsahuje stručné charakteristiky jednotlivých pásem. Změna se projevila zejména u NIR (blízké infračervené). OLI zaznamenává u NIR vlnové délky v rozpětí 0,85- 0,88 μm . Naproti tomu TM zaznamenávalo NIR pásmo v rozpětí 0,772 – 0,898. Zkrácení rozsahu zaznamenávaných vlnových délek bylo motivováno zejména tím, že v tomto rozsahu je záření mnohem méně ovlivněno při průchodu atmosférou (viz Obr. 3). Dají se tedy od něj očekávat přesnější výsledky. Oproti ETM+ je OLI obohacen o pásmo hluboké modré (pásmo 1) v rozsahu 0,43 – 0,45 μm a pásmem 9 pro rozeznávání řídké oblačnosti (cirů), které je citlivé na horní hranici blízkého infračerveného záření 1,36 – 1,39 μm . TIR senzor snímá ve dvou termálních infračervených pásmech. Pásmo 10 ve vlnovém rozpětí 10,3 – 11,3 μm a pásmo 11 v rozpětí 11,5 – 12,5 μm . Rozlišení těchto pásem je 100 metrů (LLOYD, C., 2013).

V současnosti je Landsat 8, nesoucí tyto senzory, od února 2013 až dodnes (2018) jedinou plně funkční družicí Landsat.

Band	Wavelength	Useful for mapping
1 – Coastal Aerosol	0.435 - 0.451	Coastal and aerosol studies
2 – Blue	0.452 - 0.512	Bathymetric mapping, distinguishing soil from vegetation, and deciduous from coniferous vegetation
3 – Green	0.533 - 0.590	Emphasizes peak vegetation, which is useful for assessing plant vigor
4 – Red	0.636 - 0.673	Discriminates vegetation slopes
5 – NIR	0.851 - 0.879	Emphasizes biomass content and shorelines
6 - SWIR 1	1.566 - 1.651	Discriminates moisture content of soil and vegetation; penetrates thin clouds
7 - SWIR 2	2.107 - 2.294	Improved moisture content of soil and vegetation and thin cloud penetration
8 – Panchromatic	0.503 - 0.676	15 meter resolution, sharper image definitiv
9 – Cirrus	1.363 - 1.384	Improved detection of cirrus cloud contamination
10 – TIRS 1	10.60 – 11.19	100 meter resolution, thermal mapping and estimated soil monture
11 – TIRS 2	11.50 - 12.51	100 meter resolution, Improved thermal mapping and estimated soil monture

Tab. 3 Jednotlivá spektrální pásma OLI

(Zdroj: <https://landsat.usgs.gov/what-are-best-spectral-bands-use-my-study>)

2.1.2 Atmosférické korekce pro mise Landsat

Při porovnávání vícero snímků mezi sebou je téměř vždy nutné je korigovat, aby byly mezi s sebou porovnatelné. Toho se obvykle docílí přepočtem naměřených radiometrických veličin na spektrální odrazivost povrchu (SONG et al., 2001).

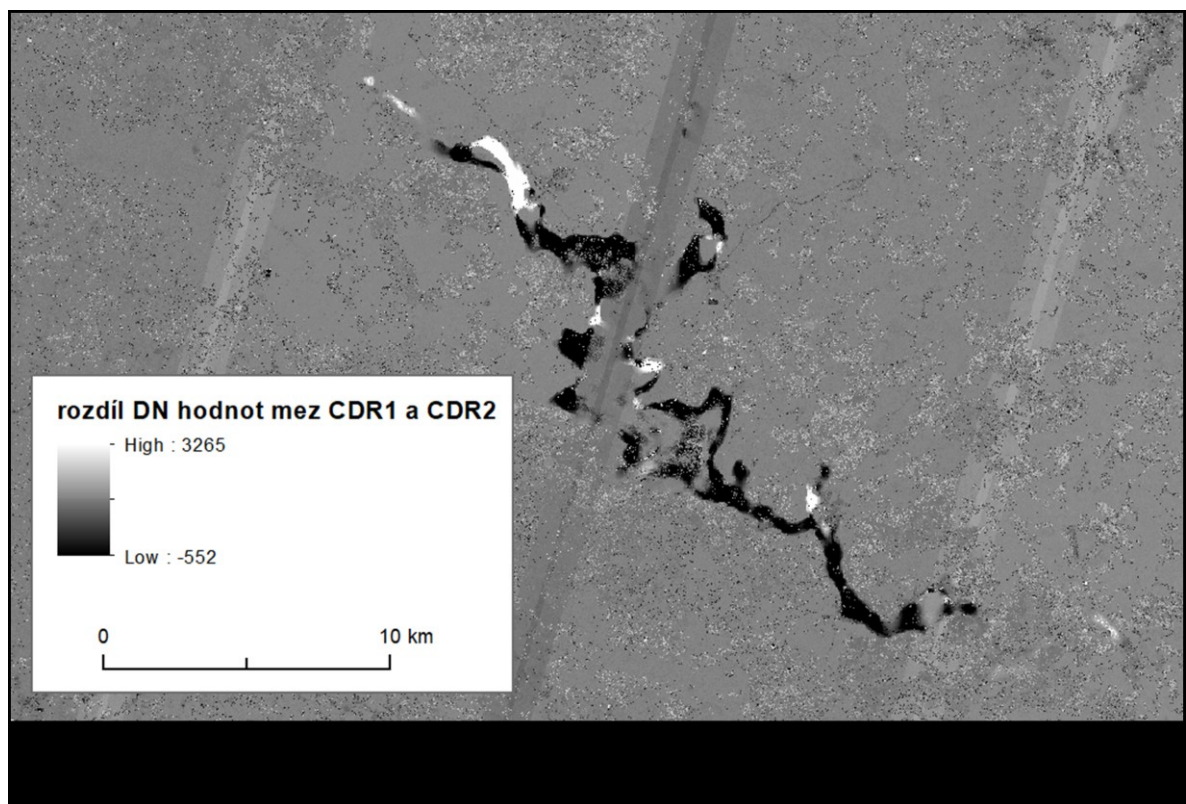
Prvním krokem k získání hodnoty odrazivosti bývá radiometrická a topografická korekce, tedy převod digitální hodnoty zaznamenané senzory na hodnotu spektrální záře, která dorazila k sensorům. Značí se symbolem L a vyjadřuje se v jednotkách $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$. Od záře se liší tím, že nevyjadřuje hustotu veškerého zářivého toku dopadajícího ze snímaného objektu na senzor, ale jen pro záření v určitém rozmezí vlnových délek (HALOUNOVÁ, PAVELKA, 2008). Vztah mezi zaznamenanou DN hodnotou a září je přímo úměrný, tedy lineární. V odborné literatuře se pro takto převedené hodnoty používá označení Top Of Atmosphere (TOA). Záření zaznamenané na okraji atmosféry je velmi ovlivněné stavy ovzduší. Částice mohou záření při průchodu atmosférou buďto rozptýlit, nebo absorbovat. Senzor tak může zaznamenat i záření, které se rozptýlilo od plynů v atmosféře a vůbec se nemuselo odrazit z povrchu, nebo naopak odražené záření nemusí zaznamenat vinou absorpce. Na těchto jevech se podílí zejména ozón, oxid uhličitý, metan, oxid dusný, tlak a teplota vzduchu, podíl par atd. Koncentrace některých částic (O_2 , CO_2 , CH_4 , a N_2O) jsou v atmosféře konstantní a při korekcích se k nim tak může přistupovat. Naopak koncentrace vodních par a ozónu jsou v průběhu času velmi proměnlivé. Ozón velmi dobře absorbuje žlutou a červenou část viditelného spektra. Vodní páry zase absorbují záření v červené a blízké infračervené části elektromagnetického spektra. Pokud chceme mít věrný model atmosféry, pomocí kterého by se

snímky upravily tak, aby je bylo možné vzájemně porovnávat, je potřeba znát stav těchto koncentrací ve scéně v době pořízení snímku. Při vývoji radiometrů se vědci pokouší nastavit jejich citlivost na takové rozpětí vlnových délek, které by bylo pokud možno co nejméně ovlivněno stavy atmosféry, leží tedy v tzv. atmosférických oknech (VERMOTE, E. et al., 2006).

Zejména modrá část elektromagnetického spektra je velmi ovlivněna rozptylem (z tohoto důvodu je nebe modré) a hodnoty záření o vlnové délce 0,45 μm naměřené senzorem představují pouze 50 % záření odraženého od povrchu. Záření některých vyšších vlnových délek dokáže atmosférou procházet úspěšněji. Podíl blízkého infračerveného záření o vlnové délce 0,85 μm , odraženého od povrchu a přijatého senzorem je již 80 %.

Snímky s aplikovanými atmosférickými korekcemi tedy představují odrazivost povrchu (surface reflectance - SR). Prostřednictvím serveru USGS Earth Explorer jsou nabízeny snímky s atmosférickými korekcemi pro skenery TM a ETM+ (korekce LEDAPS) a OLI (korekce LaSRC). Jedná se tedy o některé snímky z družic Landsat 4, 5, 7 a 8. Algoritmy korekcí jsou neustále zdokonalovány a to je důvod, proč SR snímky nejsou okamžitě k dispozici ke stažení a je potřeba si zadarmo zažádat o jejich zpracování pro konkrétní scéně. Aktuální verze atmosférických korekcí LEDAPS (k 7. 4. 2018) je verze 3.3.0 (USGS, 2018 b) a LaSRC je aktuálně ve verzi 1.4.0 (USGS, 2018 c). Pokud chceme pracovat se snímky, na kterých byly aplikovány atmosférické korekce, je vhodné si vždy znovu zažádat o nové provedení korekcí, aby použité korekce byly co nejaktuálnější. Při publikování časových řad Landsat snímků je vhodné udávat datum stažení SR snímků, nebo verzi aplikovaných korekcí, aby bylo jasné, o jaký produkt se jedná.

To, že mezi jednotlivými verzemi atmosférických korekcí mohou být podstatné rozdíly, je vidět na Obr. 5, kde je zobrazen rozdíl modrého pásma SR hodnot atmosférických korekcí LaSRC



verze 1.0.0 a verze 0.9.0. Původní snímek byl pořízen 28. srpna 2018 družicí Landsat 8 nad vodní nádrž Lipno. V tomto rozdílu jsou vidět pruhy přibližně v 10 km rozestupech od sebe, výrazně vyšších nebo naopak nižších hodnot, než je průměrný rozdíl těchto verzí korekce LaSRC pro tento snímek.

Výsledné rozpětí produktů Level-2 je od -2 000 do 16 000. „Valid range“, tedy rozpětí hodnot, které má zpracovatel brát v potaz, je prý od 0 – 10 000. Měřitkový faktor je 0,0001, takže hodnota 10 000 představuje absolutní odrazivost. Vyšší a nižší hodnoty, než jsou v tomto intervalu, by měl zpracovatel z analýzy vyloučit (USGS, 2018 e). Obvykle se záporné hodnoty objevují pod stíny (nejčastěji se jedná o stíny zaviněné oblačností). Hodnoty záře zaznamenané na těchto místech představují difuzní záření, odražené od jiných objektů, na které dopadá sluneční záření, nebo se jedná o přírůstek od záření odraženého v atmosféře. Jindy se záporné hodnoty objevují na svazích odvrácených od slunce anebo na povrchu, který má v některých pásmech velmi slabou odrazivost, zejména se jedná o vodu (viz Obr. 6), nebo hustou vegetaci, která má velmi malou odrazivost v modrém pásmu. Záporné hodnoty mohou dělat potíže v analýzách, protože například při dosažení jakékoliv záporné hodnoty v červeném pásmu bude hodnota NDVI vždy mimo interval -1 až +1.

Z původně 8 bitové struktury DN dat Landsat 4-7 a 12 bitové struktury DN dat Landsat 8 jsou data převedeny do 16 bitové struktury. Původní bitová hloubka snímků se prý podle WOODCOCK et al. (2012) projevuje ve výsledné hodnotě SR dat, což může komplikovat jejich porovnávání, pokud chceme kombinovat data Landsat 8 spolu s 4, 5 a 7.



Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System (LEDAPS)

Tento algoritmus, jehož aktuální verze 3.3.0 (7. 4. 2018) se dá ve formě python skriptu stáhnout z: <https://github.com/USGS-EROS/espa-surface-reflectance/tree/master/ledaps>, umožňuje vytvoření dat povrchové odrazivosti pro pásma 1, 2, 3, 4, 5 a 7 senzorů TM a ETM+.

LEDAPS původně označoval projekt z roku 2004, který si dal za cíl pomocí časových řad dat Landsat zmapovat disturbance ekosystému v Severní Americe. Součástí projektu bylo vytvoření atmosférických korekcí, které budou aplikovány na snímky Landsat TM a ETM+. Pokud si uživatel chtěl pořídit snímky TM a ETM+ s vypočtenou odrazivostí povrchu z webu USGS, byly na dané snímky aplikovány právě tyto korekce. Z důvodu, že zájmová oblast původního projektu zahrnovala pouze Severní Ameriku, rozhodli se výzkumníci zanedbat výpočet azimutu a úhlu Slunce nad obzorem pro každý pixel, ale v rámci celého snímku počítají s těmito proměnnými jako s konstantou (MASEK et al., 2006). Tímto zanedbáním jsou negativně ovlivněny především snímky v rovníkových oblastech, kde v západních částech snímků jsou vypočteny vyšší hodnoty odrazivosti než pro místa ve východních částech snímků (DONINCK, TUOMISTO, 2017).

Stěžejní část korekcí LEDAPS představuje radiační přenosový model: Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, neboli též 6S, který je modifikován pro TM a ETM+ data. Algoritmus 6S se používá k atmosférickým korekcím celé řady senzorů, zejména se jedná o AVHRR, MODIS, nebo i snímkování z letadla (VERMOTE, E. et al., 2006).

Tento algoritmus modeluje vliv atmosféry na senzorem přijímané viditelné a blízké infračervené záření. Algoritmus počítá s dvojitým průchodem záření přes atmosféru. Prvním při cestě záření od Slunce k povrchu a druhý od odrazení záření z povrchu po jeho dopad na čidla senzoru. Verze 6S nahrazuje verzi 5S (Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum). Oproti svému předchůdci 5S, který z částic v atmosféře řešil hlavně ozón a vodu, se 6S liší zejména tím, že do simulace se započítává nově vliv metanu, oxidu uhličitého a oxidu dusného (VERMOTE, E. et al., 2006). Pokud si někdo zažádá o zpracování atmosférických korekcí LEDAPS prostřednictvím serveru Earth Explorer, budou ozonová data pro LEDAPS pocházet z NASA Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS-EP). Údaje o vlhkosti, tlaku a teplotě vzduchu jsou získány z National Center for Environmental Prediction – NCEP. Původní modelace 5S také předpokládala, že analyzovaný povrch bude dokonale difuzní (Lambertovský). Nově modelace umožňuje zpracovávat více typů povrchů. Dále do 6S vstupuje celá řada parametrů, jako je zenit Slunce, úhel mezi dopadajícími slunečními paprsky na cíl a zenitem (USGS, 2019 a).

Do modelací vstupuje také azimut družice spolu s úhlem mezi družicí, povrchem a zenitem. V neposlední řadě do procesů vstupují informace o datu pořízení snímku. Tyto informace se dají získat z metadat družicových snímků. Další vstupní proměnná představuje „typ“ standardního aerosolového modelu. Svůj specifický aerosolový model mají pouště, moře, zástavba atd. Konkrétní množství aerosolu se vypočítává pomocí DDV, neboli: Dark Dens Vegetation (USGS, 2018 d).

DDV vychází z předpokladu, že množství modrého záření odraženého od vegetace koreluje s množstvím odraženého záření v infračerveném spektru. Zatímco záření modré dokáže projít atmosférou přibližně z 50 %, infračervené záření o vlnové délce 2,1 μm dokáže projít atmosférou téměř beze ztráty způsobené absorpcí a rozptylem (VERMOTE, E. et al., 2006). Čím méně tedy modrého záření projde, tím je ve vzduchu více aerosolu. Z rozdílu mezi očekávaným poměrem

těchto dvou pásem a reálně naměřenými hodnotami se dá odhadnout množství aerosolu mezi nosičem a povrchem, odborně AOT, neboli Aerosol Optical Thickness (KAUFMAN J. Y. et al., 1997).

Dále se zadává nadmořská výška a to jak cíle, tak nosiče. Do správného výpočtu 6S tedy vstupuje dlouhá řada parametrů, které může být velmi obtížné získat. Tato vstupní data nejsou vždy dostupná, takže například pro snímky pořízené mezi 30. květnem 2016 a 12. červnem 2016 není možné požádat o zpracování korekcemi LEDAPS (USGS, 2018 d).

Landsat Surface Reflectance Code (LaSRC)

Tento produkt umožňuje získat odrazivost povrchu pro pásma 1. až 7. senzoru OLI. Pro ostatní pásma družice Landsat 8 sice není nabízen produkt s atmosférickými korekcemi, nicméně tato pásma (zejména pásma TIR) jsou jedním ze vstupních parametrů korekce LaSRC. Algoritmus je tedy možné spustit pouze tehdy, když jsou k dispozici snímky pásem TIR. Pokud se očekávaná životnost senzorů TIR (tři roky) naplní, bude to znamenat, že se brzy budou muset vyvinout nové algoritmy pro atmosférické korekce senzoru OLI. U senzoru OLI je totiž očekávaná delší životnost a to konkrétně pět let (USGS, 2018 e).

Algoritmus byl odvozen z Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum Vectorial (6SV), který byl původně vytvořen pro data MODIS (VERMOTE et al., 2016).

Na rozdíl od LEDAPS se informace o množství aerosolu, vlhkosti a tlaku v ovzduší získávají z dat MODIS CMA. Informace o ozónu jsou také získávány z produktů MODIS, konkrétně z Climate Modeling Grid (CMG). Pro rozeznávání vzdušného aerosolu jsou využívány jiné algoritmy u souše než u vody (USGS, 2018 e).

2.1.3 Problémy při zpracování časových řad dat Landsat

Misi Landsat Data Continuity Mission (též známou jako Landsat 8) se inženýři pokusili navrhnout tak, aby její výsledky byly porovnatelné s jejími předchůdci, senzory TM (L4 a L5) a ETM+ (L7). Je tak tedy možné vytvořit velmi dlouhou multi-senzorovou časovou řadu spojením pásem 1, 2, 3, 4, 5 a 7 senzorů TM a ETM+ s pásmy 2, 3, 4, 5, 6 a 7 senzoru OLI. Problémy s rozdílnou bitovou strukturou, ve které jsou původní snímky uchovávané spolu s různými atmosférickými jevy, by se měly vyřešit za pomoci korekcí LEDAPS a LaSRC. Většina výzkumníků časových řad dat Landsat již tedy data s provedenými atmosférickými korekcemi od USGS nijak neupravuje a rovnou SR data TM, ETM+ a OLI analyzuje společně, jako to například udělal JAKIMOW (2018). Nicméně časová řada je ovlivněna i řadou vnějších faktorů, které ovlivňují hodnoty odrazivosti a nesouvisí se změnou povrchu. Mezi takové faktory patří problémy popsané níže.

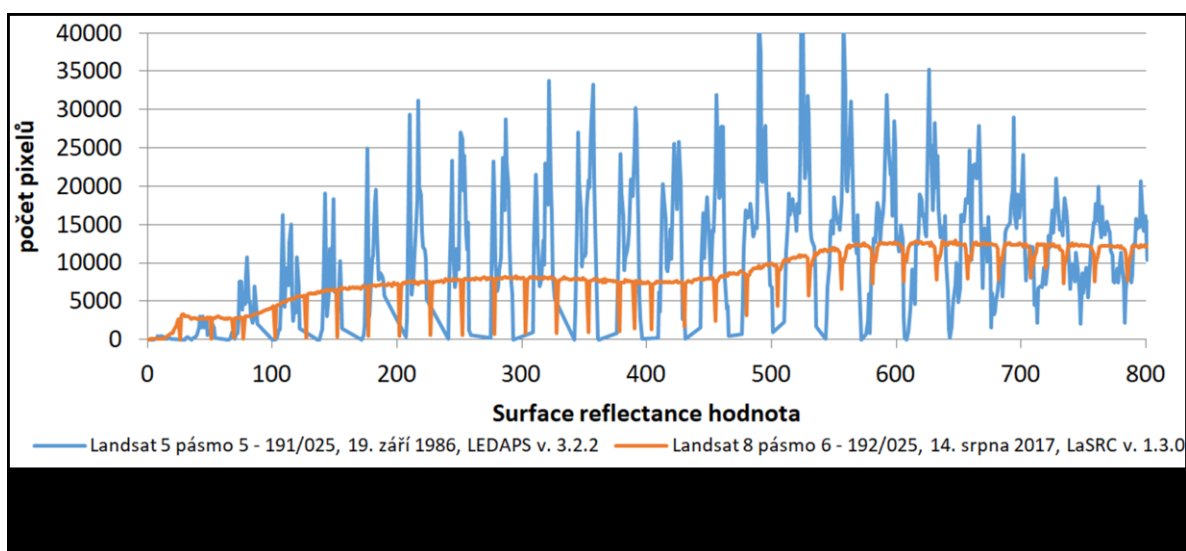
Rozdílná konstrukce radiometrů

Jak je vidět z Obr. 2 a Obr. 3, nejsou a ani nemohou být hodnoty naměřené senzory TM, ETM+ a OLI zcela porovnatelné, protože mají jiný rozsah vlnových délek pro konkrétní pásma (TM, ETM+ vs. OLI), nebo jsou jinak citlivá na konkrétní vlnové délky (TM vs. ETM+). Rozsah vlnových délek je u senzoru OLI značně užší oproti TM a ETM+. Dokonce ani ve viditelné části elektromagnetického spektra nebyly využito stejného rozmezí vlnových délek.

Senzor OLI byl navrhnout tak, aby snímal v konkrétním rozmezí vlnových délek, které jsou co nejméně ovlivněny atmosférou. Největší rozdíl při srovnávání TM a OLI tak je u blízkého

infračerveného pásma, kde je rozpětí zaznamenávaných vlnových délek pětina u senzoru OLI oproti sensorům TM a ETM+.

Kromě různého rozpětí vlnových délek a citlivosti na záření v různých vlnových délkách přináší rozdílná konstrukce radiometrů ještě jeden problém a to je rozdílná bitová hloubka, ve které jsou hodnoty naměřené senzory zaznamenávány. TM a ETM+ zaznamenávají DN hodnoty do 8 bitové struktury (256 různých hodnot/stupňů šedi). Naproti tomu OLI zaznamenává hodnoty do 12 bitové struktury (4096 hodnot). Z takto rozdílných škál vyplývá, že sensor OLI je v měření mnohem citlivější než senzory TM a ETM+. Podle WOODCOCK et al. (2012) je původní bitová struktura znát i na datech s provedenými korekcemi. Dobře je to viditelné v Obr. 7, kde je znázorněn histogram SR hodnot pro SWIR-1 pásmo ze sensorů TM a OLI. Zatímco počty hodnot naměřených z družice Landsat 8 působí takřka spojitě, hodnoty naměřené Landsat 5 mají úseky vysokého zastoupení hodnot, které se střídají s velice nízkým zastoupením hodnot.



Jednou z metod jak zpracovat multisenzorová data je Cross-Calibration. Tato metoda přepočítává Gain a Bias u DN hodnot jednoho spektroradiometru, aby snímek byl porovnatelný s druhým. Aplikováním nového Gain a Bias na DN data se získají srovnatelné hodnoty TOA pro oba snímky z různých sensorů (TEILLET et al., 2001). Objevily se i nejrůznější specializované algoritmy jako například LandsatLinkr. Tento algoritmus se snaží přepočítat ze snímků komponenty Tasseled Cap OLI na Tasseled Cap ETM+ (VOGELER et al., 2018), neposkytuje tedy normalizovaná SR data. Relativní normalizace je další možností, jak snímky upravit, aby byly porovnatelné. Normalizacím a zejména konkrétnímu typu relativních normalizací se budeme věnovat i v následujících kapitolách. Další negativní vlivy uvedené v této kapitole pro zpracování časových řad Landsat je možné též upravit zmíněnými metodami pro tvorbu časových řad. Přehled metod je pak možné nalézt v diplomové práci LAŠTOVIČKA (2016).

Přesnost vstupních parametrů atmosférických korekcí

Řada parametrů používaných u atmosférických korekcí LEDAPS a LaSRC je shodná pro celou scénu. Například úhel mezi sluncem, povrchem a zenitem a úhel mezi pozorovatelem, povrchem a zenitem se zadává jako hodnota vypočítaná pro střed scény, ne pro každý pixel zvlášť (MASEK et al., 2006). Chyba způsobená zanedbáním tohoto vlivu se projevuje tím silněji, čím leží pořízený snímek blíže

rovníku a projevuje se tím, že v levé části snímku jsou vypočteny vyšší hodnoty spektrální odrazivosti. Tento efekt se snažil pro Landsat data znormalizovat například DONINCK, TUOMISTO (2017) pomocí BRDF zjištěného pro povrch pomocí dat MODIS.

Jiné parametry jsou počítány z databází s mnohem menším prostorovým rozlišením, než mají data Landsat. Především se jedná o data MODIS CMG (vodní pára, ozón atd.), které jsou vytvářeny v rozlišení přibližně 5,5 km (NASA, 2019 a). Chybu lze očekávat u parametrů z MODIS CMG také kvůli temporálnímu pokrytí těchto dat. To je pro libovolnou lokalitu 1 až 2 dny (NASA, 2019 b). Vstupní parametry tak mohou být až jeden den vzdálené od pořízeného snímku. Stejně tak i údaje počítané ze samotné scény jako AOT (pomocí DDV u korekce LEDAPS), nemusí být spočítány přesně.

Různé algoritmy atmosférických korekcí počítají s vlivy různých plynů (VERMOTE E. et al., 1997), je tedy možné, že řada parametrů, které mají vliv na záření procházející atmosférou, není plně zahrnuta v korekcích.

Korekce LEDAPS a LaSRC nejsou totožné, řadu vstupních parametrů berou z jiných zdrojů (USGS, 2018 d), to může také vést k nesrovnalostem mezi daty.

Stárnutí senzorů

Již v období snímkování s MSS bylo zjištěno, že se stárnutím senzoru se postupně mění parametr Gain. Tedy směrnice z rovnice, pomocí které lze naměřené DN hodnoty převést na spektrální zář ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$). Jedná o exponenciální pokles v průběhu času, který má na začátku velmi nízkou zápornou směrnici tečny. Po nějaké době začne mít tato funkce tečnu velmi blízkou nule a parametr Gain se již po nějaké době mění jen zanedbatelně (CHANDER et al., 2009). Zvyšuje se tak rozsah vlnových délek, na které je daný senzor citlivý. Na druhou stranu se tím zmenšuje přesnost, se kterou senzor spektrální záři měří, protože s postupem času náleží určitému rozsahu vlnových délek nižší počet DN hodnot než dříve.

Jednotlivé družice Landsat tak byly osazené nástroji pro vnitřní kalibraci (Internal Calibrator-IC). Pomocí těchto přístrojů měly být pro jednotlivá pásma každého snímku zjišťovány aktuální hodnoty Gain a Bias, které měly být následně aplikovány při korekcích. Vnitřní kalibrátor se skládá zejména z několika lamp, jejichž spektrální záření mělo mít v průběhu mise stejnou intenzitu. Nicméně se ukázalo, že tyto lampy také s postupem času degradují a tak nebylo možné určit Gain a Bias přesně (CHANDER et al., 2007).

Problém se vyřešil až tehdy, když začal snímkovat Landsat 7 (ETM+). Ve snaze zachovat kontinuitu měření s Landsatem 7, byla provedena crossenzorová kalibrace, pomocí které se zjistil nový Gain pro každé pásmo senzoru TM, který by tak poskytl data srovnatelná se snímky ze senzoru ETM+. Ukázalo se, že hodnota Gain se nejvíce zmenšila pro viditelné záření (modrá 19 %, zelená 16 % a červená o 8 %), zatímco hodnoty Gain pro infračervená záření se změnily jen zanedbatelně. Po té, co se takto zjistila nová hodnota Gain pro rok 1999, bylo potřeba zjistit, jak se Gain vyvíjely v období mezi startem Landsatu 5 a Landsatu 7. Původně se jen přeškálovala exponenciální funkce získaná z dat naměřených v průběhu času vnitřním kalibrátorem tak, aby se shodovala v roce 1999 s hodnotou pro ETM+ (CHANDER et al., 2005). Při porovnávání hodnot z pouštních invariantních ploch (zejména Arizona a Lybie) se zjistilo, že nová funkce pro výpočet Gain je nepřesná, protože neodpovídala očekávaným hodnotám. Na základě těchto ploch se tedy vypočítaly pro jednotlivá

měření (snímky) očekávané hodnoty Gain. Tyto hodnoty byly vyneseny do grafu a protnulý se novou exponenciální funkcí. Tyto funkce jsou dodnes používány, na druhou stranu tato funkce vychází z dat zjišťovaných do roku 2007 (CHANDER et al., 2007; MISHRA et al., 2016). Také je důležité zmínit, že přestože se v rozsahu vlnových délek, na které jsou citlivé, senzory TM a ETM+ víceméně shodují, tak na konkrétní vlnové délky jsou citlivé jinak, viz Obr. 3.

U Landsatu 4, který se zásadně neliší od Landsatu 5, se pro radiometrickou kalibraci nadále používají data z nástrojů pro vnitřní kalibraci, protože při jeho životnosti, která je oproti Landsatu 5 přibližně třetinová, se neočekává taková degradace nástrojů pro vnitřní kalibraci (CHANDER et al., 2007).

2.2 Relativní radiometrické normalizace (RRN)

Normalizovaná, neboli vzájemně porovnatelná časová řada družicových snímků je taková, kde multispektrální/hyperspektrální snímky jsou upraveny tak, aby působily jako pořízené za stejných vnějších faktorů. Základem těchto metod je upravování cílového (Target) snímku podle referenčního (Master) snímku. Tyto metody mohou sloužit k řadě různých účelů. Patrně nejčastěji slouží jako náhrada atmosférických korekcí v případě absence dat potřebných pro jejich vypočítání, protože stejně jako odrazivost povrchu jsou schopné DN hodnoty, nebo TOA převést na srovnatelné hodnoty s jiným snímkem (DAVIES et al., 2016; SCHROEDER, T. A., et al., 2006; PFLUGMACHER, D. et al., 2012). Jindy mohou pomoci k vytvoření bezešvých mozaik (CHEN, CH., et al., 2014; EIVAZI, A. et al. 2015). V neposledním případě, jak ve své práci prokázal LAŠTOVIČKA J. (2016), mohou metody RRN být použity pro normalizaci časové řady snímků povrchové odrazivosti, tvořené snímky z vícero senzorů.

Za takzvané absolutní radiometrické normalizace jsou většinou považovány atmosférické korekce jako DOS, DDV, FLASH, 6S (LAŠTOVIČKA, 2016). Jiní autoři, (například ČERVENÁ 2012 o metodě PIF) píšou o relativních radiometrických normalizacích jako o relativních atmosférických korekcích. Terminologie tedy není ustálená. Z důvodu univerzálního využití těchto metod je lepší o nich mluvit jako o relativních normalizacích, než jako o relativních atmosférických korekcích.

LAŠTOVIČKA (2016) použil normalizace Pseudo Invariant Features (PIF) a Ridge na snímky s již provedenými atmosférickými korekcemi LEDAPS a LaSRC. Pokusil se tím znormalizovat data, zaznamenaná ve velmi dlouhém časovém rozpětí, pořízená třemi typy senzorů a upravená odlišnými korekcemi. Kromě znormalizování dat SR OLI a SR ETM+ na produkty srovnatelné s SR TM prokázal snížení vlivů nehomogenity prostředí. Metoda IR-MAD aplikovaná v této práci je komplexnějšího rázu a je schopna nám zaručit lepší výsledky normalizace než PIF, nebo Ridge.

U všech později zmíněných metod je využívána lineární regrese, která aproximuje chod dvou na sobě závislých parametrů pomocí metody nejmenších čtverců:

$$y = b_1 * x + b_2.$$

Hledají se zde nejvhodnější parametry b_1 a b_2 pro aproximaci dvou pozorovaných snímků. Hodnota b_1 představuje směrnici přímky (Slope). Hodnota b_2 (Intercept), představuje úsek, který přímka protíná na ose Y.

CANTY et al. (2004) tvrdí, že pokud se snažíme znormalizovat snímek bez atmosférických korekcí snímek, na který již korekce aplikovány byly, je lepší použít ortogonální regresi než lineární regresi (OLS). Lineární regrese má prý tu nevýhodu, že předpokládá chybu v měření pouze u jedné proměnné (pouze pro parametr osy y), naopak ortogonální regrese uvažuje s chybami u obou proměnných.

2.2.1 Ridge

Poprvé tato metoda byla popsána v SONG et al. (2001). Tato metoda využívá korelačního diagramu (tzv. scatterplot), kde na jedné ose jsou DN hodnoty referenčního snímku a na druhé ose DN hodnoty pozorovacího snímku. Pro tento diagram se následně spočítá lineární regrese. Předpokladem této metody je, že tzv. pseudoinvariantní hodnoty pixelů, což jsou hodnoty, jejichž hodnota odrazivosti se dlouhodobě příliš nemění, vytvoří shluky o vysoké hustotě bodů, které nejvíce ovlivní chod regresní přímky. Mezi takové pixely patří například silnice, budovy, parkoviště, náměstí, střechy, vodní plochy a případně i orná půda, pokud na obou snímcích je ve stejné fázi. Jedná se tedy o místa, která se dlouhodobě nemění. Pixely, které v průběhu času mění svoji odrazivost, by neměly mít, kvůli většímu rozptylu, zásadní vliv na průběh regresní křivky. Regresní analýza se počítá pro každé spektrální pásmo zvlášť, tzv. band by band.

2.2.2 Pseudoinvariant Features (PIF) metody

Metody PIF jsou založené na vyhledávání pseudoinvariantních prvků. Poprvé tuto metodu aplikoval SCHOTT et al. (1988), který vybíral nezměněné objekty manuálně. Právě rozdíly v naměřených hodnotách těchto neměnných prvků slouží k výpočtu normalizace pro pozorovací snímek. Jednotlivé metody PIF se liší často právě ve způsobu vybírání neměnných prvků a podle způsobu vyrovnání referenční linie, spojující invariantní prvky v korelačním diagramu dvou pozorovaných snímků (LAŠTOVIČKA, 2016). PIF Linear Based je taková metoda, která v korelačním diagramu aplikuje lineární regresi pro zjištění aproximace hodnot.

Obecně se užívá především červené a blízké infračervené pásmo. V těchto pásmech se najdou nezměněné objekty mezi snímky a ty se následně protnou v korelačním diagramu linií (LAŠTOVIČKA, 2016).

Jednou z metod je například RCS, která vyhledává neměnné prvky pomocí Tasseled Cap. DU et al. (2002), hledal pseudoinvariantní prvky pomocí PCA analýzy. ELDVIGE et al. (1995) uvádí aplikaci automatického vyhledávání invariantních prvků přes ASCR (Automatic Scattergram Controlled Regression), který užívá korelačního diagramu blízkého infračerveného spektra. V diagramu hledá velké vodní a pozemní plochy a jejich vzájemné odlišnosti v NIR.

LAŠTOVIČKA (2016) při normalizaci pomocí PIF ve své práci předpokládal, že invariantní plochy budou převážně ty, které nedosahují vysokého NDVI, tedy, které nejsou pokryté vegetací. Po vyřazení takovýchto bodů ($NDVI > 0,5$) porovnával rozdíly SR hodnot mezi cílovými a referenčními snímky. Na základě těchto rozdílů stanovil prahové hodnoty, kdy se jedná o prahové body a kdy ne. Na základě takto stanovených prahových hodnot vypočítal lineární regresi.

2.2.3 Normalizace pomocí metody MAD a její rozšíření

Transformace snímku MAD (Multivariate Alteration Detection) umožňuje numerické vyjádření změn v obraze. Proto se nepoužívá jen při výběru invariantních bodů, ale i k hledání změn v průběhu času v zájmové lokalitě (například WANG et al., 2015). Poprvé tuto metodu popsal NIELSEN et al. (1998). Čím vyšší hodnota MAD je v nějakém bodě, tím spíše daný pixel prošel změnou. Metoda umožňuje pomocí prahové hodnoty vybrat takové pixely, které je možné považovat za invariantní a ty následně použít k normalizaci a to na základě všech pásem, která se uživatel rozhodne využít, což je velkou výhodou v porovnání se základními metodami PIF. Metoda je podrobně popsána v podkapitole 3.3.1.

V CANTY, NIELSEN (2011) byla navržena varianta metody IR-MAD, která předpokládá nelineární vztah mezi cílovým a referenčním snímkem, využívající tzv. kernel methods.

Účinnost normalizace se ověřuje v CANTY et al. (2004) pro MAD a v CANTY a NIELSEN (2008) pro IR-MAD tím, že se vezmou 2/3 z pixelů vybraných jako invariantní, které se označí jako testovací pixely a nepoužijí se do výpočtu lineární regrese. Po té co se z 1/3 invariantních pixelů vypočte lineární regrese a zjistí se vztah, podle kterého se vypočte normalizace, porovnají se průměry hodnot testovacích bodů před normalizací a po normalizaci se stejnými body na snímku referenčním.

MARPU et al. (2014) navrhuje v případě získání nízkých kanonických korelací vytvořit masku, která vyloučí z IR-MAD pixely s nejvyšší změnou. Vyloučením těchto pixelů dosáhne přesnějšího nalezení koeficientů a, b . Nejprve se každé pásmo z obou snímků rozdělí lineárně do histogramu o 256 intervalech. Do těchto intervalů se nezahrnou 2 % nejnižších a nejvyšších hodnot. Tím by se mělo dosáhnout „spojitého“ histogramu bez prázdných intervalů, protože extrémy jsou vyloučeny. Do každého pixelu přejde odpovídající hodnota z tohoto histogramu (0-255) a odečte se od hodnoty z histogramu v druhém obraze snímku. Vysoká hodnota znamená vyšší rozdíl intervalů. Nyní se pomocí EM (Expectation-Maximization) naleznou tři skupiny podle očekávaného Gaussova normálního rozdělení ve vypočtených hodnotách. První skupina s nejnižšími hodnotami představuje pixely, ve kterých pravděpodobně neproběhla žádná změna. Ve druhé skupině se již změny očekávají a třetí skupina představuje ty nejvýraznější změny. Hodnoty, ve kterých se tyto rozdělení protínají, navrhují autoři použít jako prahové hodnoty pro oddělení pixelů s významnými změnami a bez větších změn. Ideální prahovou hodnotou je pro ně hranice mezi prvním a druhým normálním rozdělením. Vybrané pixely mohou být znovu užity pro výpočet IR-MAD.

Aplikace metod MAD a IR-MAD

V pilotních studiích MAD a IR-MAD od Morta Cantyho a Allana Nielsena (CANTY et. al 2004; CANTY, NIELSEN, 2007; NIELSEN et al. (1998); NIELSEN, 2007), byly zkoumány jen velmi malé oblasti. Maximální rozlohu z těchto oblastí měly analyzované výseče snímků ETM+ Jülichu v Německu s 30 km² v CANTY et al. (2004). Jednalo se nicméně o snímky z jednoho roku (květen a červen 2001) a silně osídlenou oblast, takže přesné nalezení invariantních pixelů nebylo tak náročné. Ostatní lokality, kromě ještě jedné oblasti v Německu se snímky z hyperspektrálního senzoru Hyperion o rozloze přibližně 0,5 km² z jednoho roku 2003 publikované v NIELSEN (2007), nikdy nebyly ze Střední Evropy. Jediná další oblast z Evropy, která ale podléhala subarktickému klimatu, byla zalesněná oblast ve Švédsku, také v NIELSEN (2007). Ostatní zájmové lokality ležely ve velmi

odlišných podmínkách oproti podmínkám, které panují ve Střední Evropě na pomezí kontinentálního a oceánského klimatu. Lokality se nacházely v těchto zemích Maroko, Nevada, Keňa v CANTY et al.(2004), Austrálie v NIELSEN et al. (1998) a Írán v CANTY, NIELSEN (2007). Maximální časový odstup mezi analyzovanými snímky byl 16 let a to v případě zájmové lokality ležící v Austrálii.

Následující studie, které se již zabývaly aplikováním IR-MAD při zkoumání zemského povrchu se také zabývaly především oblastmi s velmi odlišnými podmínkami oproti těm, které panují ve Střední Evropě. SCHROEDER, T. A., et al. (2006) zkoumal západní Oregon (WRS: 46/29) na časové řadě snímků 16* TM a 3* ETM+ pořízených v rozmezí 1984 - 2004. Jednalo se tedy o multisenzorovou normalizaci, ale rozdíl mezi TM a ETM+ není až tak výrazný. Dle Köppenovy klasifikace podnebí spadá zájmová oblast do teplého středozevního klimatu a použity byly pouze letní snímky. V této práci byl vybrán surový referenční snímek, z tohoto snímku se následně získala data surface reflectance pomocí metody 6S. Následně se jeden tento produkt 6S použil jako referenční snímek pro RRN využívající výběr PIF pomocí MAD na ostatní surové snímky v časové řadě. Výsledná normalizovaná časová řada by tak měla odpovídat produktu 6S. Následně se porovnávaly tyto korekce 6S, DOS3, MDDV, MAD, PIF (normalizace pomocí ručně vybraných invariantních prvků) a TOA (zde pojmenovaná Partial, nebo též At-Satellite Reflectance). Porovnávání spočívalo ve sledování 26 invariantních pixelů, které se za celou dobu časové řady ani jednou nezměnily. Z každého jednoho pásma každé jedné korekce se následně získala průměrná hodnota pro všechny tyto pixely. Následně se vypočítalo šest hodnot RMSE. S tím, že jako očekávaná hodnota byla použita průměrná hodnota v invariantních bodech za rok 1994 (pro každou korekci se jedná o jinou hodnotu) a od této hodnoty se při výpočtu odečítaly veškeré průměrné hodnoty z ostatních let. Čím tedy tyto korekce měly v těchto bodech vyšší rozptyl, tím byly považovány za horší. PIF a MAD zde dosáhly nejlepších výsledků (tedy nejmenších RMSE). Přestože PIF byl nepatrně lepší, autoři se rozhodli doporučit spíše MAD metodu výběru pseudo-invariantních prvků, hlavně díky tomu, že se dá automatizovat. Autoři také na metodě MAD ocenili to, že i když nemohli aplikovat 6S na všechny snímky z časové řady (z důvodu absence potřebných parametrů), metoda MAD v těchto snímcích mohla vytvořit produkt srovnatelný s 6S (pokud byl jako referenční snímek použit 6S). Obdobným způsobem jako SCHROEDER et al. (2006) normalizoval také PFLUGMACHER et al. (2012) 29 DN snímků TM a ETM+ v Blue Mountains v Oregonu s tím, že jako referenční snímek byl použit snímek s aplikovanou COST kalibrací. Normalizované snímky tak byly v podstatě přetvořeny na COST produkt.

Další výzkum DAVIES et al. (2016) se zabýval studiem změny vegetace v Kambodži. Normalizováno zde bylo 16 TM a ETM+ snímků pořízených mezi lety 1989 - 2012. Použitá metoda byla IR-MAD a každý snímek byl normalizován dvakrát (jednou byla využita lineární regrese a podruhé ortogonální regrese). Jednalo se o snímky Level 1 (terrain corrected). Jako referenční snímek zde byl použit CDR snímek z roku 2003. Výsledky získané z normalizovaných snímků byly následně porovnávány s výsledky pro odpovídající si CDR snímky. Kromě vyjádření změny vegetace v zájmovém regionu se snažila práce zjistit, zda mohou Level 1 (terrain corrected) data normalizovaná metodou IR-MAD a referenčním snímkem CDR zastoupit CDR data. To se snažili zjistit díky lineární regresi pro vypočítané vegetační indexy mezi normalizovanými a CDR snímky. Přestože tyto hodnoty měly vysoké korelační koeficienty (nejmenší regresní koeficient byl 0,92), ale směrnice přímky dosahovala v některých případech i hodnoty 2 a neprocházela bodem 0,0. To

znamená, že hodnoty NDVI u snímků s aplikovanou RRN mohly být i dvakrát vyšší než hodnoty u CDR. Za zmínku také stojí fakt, že v roce 1999 většina vybraných invariantních pixelů pomocí metody IR-MAD měla vysoké NDVI (hodnoty 0,7-0,9). Jednalo se tedy nejspíše o vegetaci. Naopak vybrané invariantní pixely z roku 2011 už měly v průměru mnohem nižší hodnotu. To bylo pravděpodobně způsobené rozvojem lidské aktivity, která vytvářela větší počet vhodných invariantních ploch. Naopak v roce 1999, kdy nebyl ještě rozvoj regionu tak daleko, se musel algoritmus „spokojit“ s větším výběrem bodů, které představovaly bujnou vegetaci. Je nicméně otázka, zda je možné považovat za vhodnou takovou normalizaci, která využívá jako PIF převážně vegetaci, pokud chceme zkoumat právě vegetaci a její změny.

LEI FANGA, JIAN YANG (2013) studovaly následky požárů v mandžuském pohoří Velký Chingan v zájmové lokalitě o rozloze přibližně 300 km². Studie se pokoušela prokázat, že se produkty 6S, TOA a COST dají zkvalitnit pomocí jejich kombinací s metodou IR-MAD. Ze záznamu studie nicméně není patrné, jak toto zkombinování proběhlo. Není tedy jasné, zda byly nejdříve provedeny atmosférické korekce a až potom se aplikovala normalizace IR-MAD, nebo naopak. Následně ze všech produktů: 6S, TOA, COST, IR-MAD + 6S, IR-MAD + TOA a IR-MAD + COST byly vypočítány indexy dNBR a NBR. Závěr článku zněl, že aplikování RRN na surová data, může vést ke kvalitnějším výsledkům výpočtů dNBR a NBR indexů.

CAVIER et al. (2010) prokázal, že relativní radiometrická normalizace se dá úspěšně použít také na letecké snímky o pouhých 3 pásmech (RGB). Rozdíly mezi výsledným normalizovaným snímkem a referenčním snímkem ukázal změny, které se v zájmové oblasti odehrály.

V neposlední řadě je RRN využívající výběr invariantních prvků pomocí IR-MAD používána k mozaikování snímků. Právě využití RRN jako v CHEN, CH., et al. (2014), nebo v EIVAZI, A. et al. (2015) může vést ke vzniku bežešvých mozaik.

3 Metodika

Postup celé práce se dá zjednodušeně shrnout do následujících čtyř bodů:

1. Prostřednictvím webu Earth Explorer se stáhla časová řada snímků
2. Proběhl předběžný výzkum, jehož cílem bylo vybrat neměnné lokality v rámci časové řady.
3. Na vybranou časovou řadu byla aplikována normalizační metoda IR-Mad. Jako referenční snímek posloužil pro všechny ostatní snímky jeden z této časové řady.
4. Ve vybraných lokalitách se zjistil chod časové řady před normalizací a po normalizaci. Následně se vizuálně prostřednictvím grafů a číselně pomocí statistických testů porovnal chod časové řady před a po normalizaci.

Rok	Počet snímků pořízených v daném roce	Pozice WRS-2	
		191-025	192-025
1984	2	2	0
1985	5	2	3
1986	6	4	2
1988	2	0	2
1989	1	0	1
1991	1	1	0
1993	2	2	0
1994	4	0	4
1998	2	0	2
2000	3	2	1
2002	1	0	1
2003	4	3	1
2004	3	2	1
2005	5	3	2
2006	6	3	3
2009	5	3	2
2010	7	4	3
2011	4	4	0
Celkem	63	35	28

Tab. 4 Počet snímků senzoru TM za každý rok
(Zdroj: vlastní tvorba)

3.1 Použitá časová řada snímků Landsat a její předzpracování

Do časové řady byly zahrnuty pouze snímky TM pořízené družicí Landsat 5 a OLI pořízené družicí Landsat 8. Verze korekce LEDAPS pro snímky TM je 3.2.2 a pro snímky OLI se jedná o verzi LaSRC 1.3.0. Pozice snímků WRS-2 je 192-025 a 191-025. Hlavní oblast zájmu leží v překrytu těchto dvou pozic a je jí možné vidět na Obr. 10. Jedná se o databázi celkem 81 snímků, z toho 63 pořízených Landsatem 5 a 18 snímků pořízených Landsatem 8. Jedná se o snímky pořízené v době, kdy oblačnost byla nižší než 30 %, z letního období, tedy z měsíců červen až září. První snímek byl

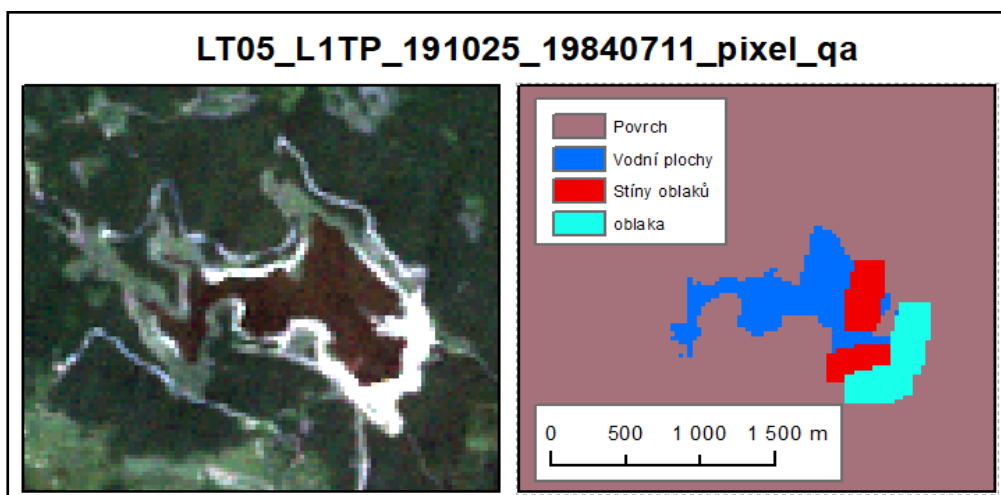
pořízen 11. července 1984 a poslední 30. srpna 2017. Kompletní seznam snímků je uveden v příloze 1. Souhrnný seznam snímků z Landsat 5 je vidět v Tab. 4. Je v ní vidět, kolik bylo jaký rok pořízeno snímků a na jaké pozici WRS-2 byly pořízeny.

Z těchto časových řad budou vyřazeny pro jednotlivé lokality ty hodnoty, které způsobila oblačnost. Tuto informaci je možné získat z produktů Landsat Surface Reflectance Quality Assessment, které jsou přikládány jako samostatné rastry ke každému archivu satelitních snímků Landsat. Pro Landsat 5 je název tohoto produktu zakončen: *sr_cloud_qa*, u Landsat 8 bývá zakončen *pixel_qa*. Samozřejmě odstranit veškeré vlivy oblačnosti není úplně možné, protože algoritmus *f_mask* nedokáže rozeznat roztroušenou oblačnost jako je například na Obr 8.



Obr. 8 Srovnání snímku s roztroušenou oblačností vpravo a snímku bez oblačnosti vlevo
(Zdroj: vlastní tvorba)

Na druhou stranu mohla být vyřazena taková pozorování, která byla algoritmem *f_mask* chybně vyhodnocena jako stín oblačnosti, nebo oblačnost, takový případ je na Obr. 9, kde *f_mask* vyhodnotil chybně oblačnost patrně kvůli vysokému kontrastu mezi vodní plochou a jejím světlým břehem u vodní nádrže Josefův Důl.



Obr. 9 Špatně vyhodnocená oblačnost pomocí *f_mask*
(Zdroj: vlastní tvorba)

3.2 Výběr zájmových lokalit

Autor předpokládá, že vnější faktory, které negativně ovlivňují časové řady dat Landsat (např. typ senzoru, stáří senzoru, pozice WRS-2), jsou nejlépe rozeznatelné v rozsáhlých, homogenních, neměnných oblastech. Analyzované pixely tedy byly vybírány z těchto oblastí. V opačném případě,

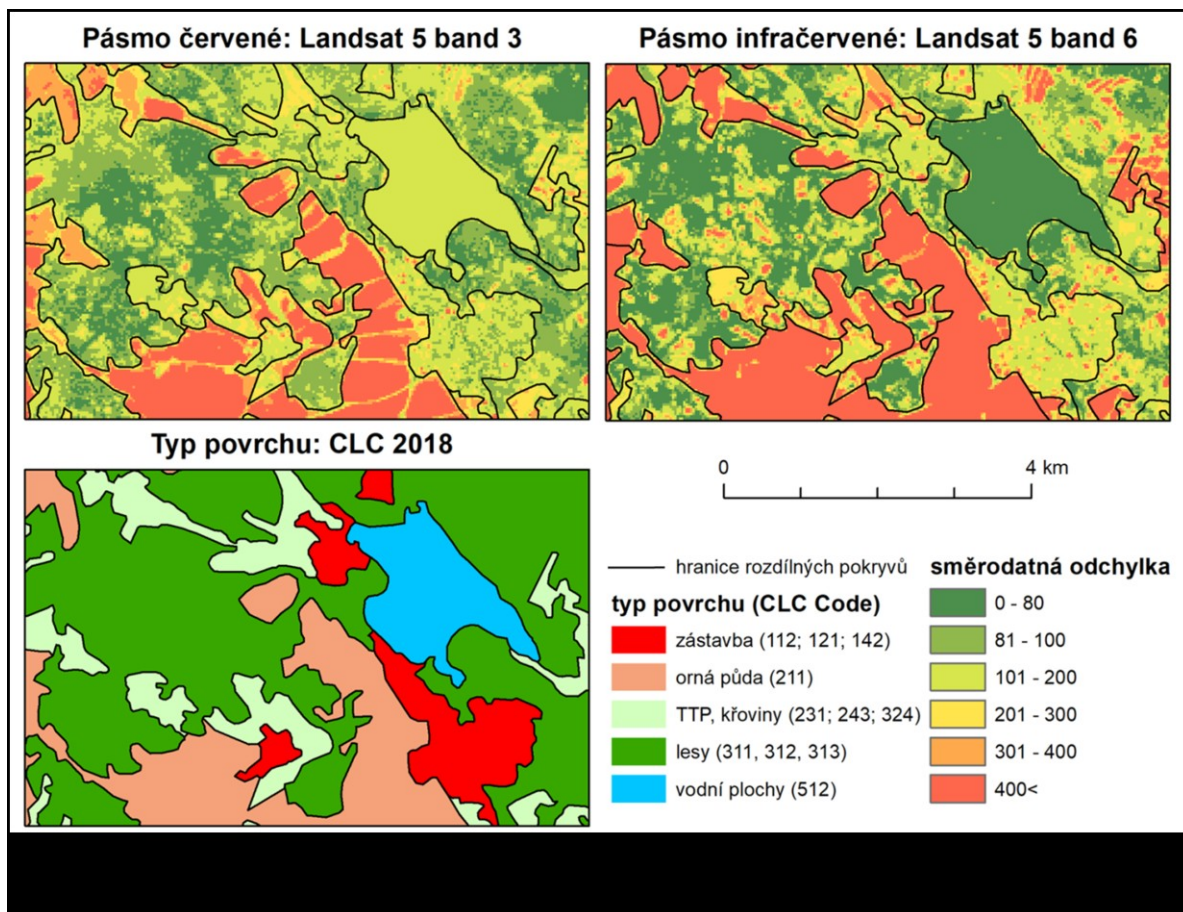
tedy u heterogenních oblastí, mohlo hrozit ovlivnění zaznamenaných hodnot okolními povrchy (u snímků Landsat se používá pro převzorkování kubická konvoluce, tedy výpočet z 16 nejbližších pixelů).

Každá zájmová lokalita představuje čtvercové okno o 9 pixelech (3 x 3). Pro každou z lokalit a každé pásmo každého snímku se následně vypočítala průměrná hodnota tohoto okna. Tento průměr představuje hodnotu spektrální odrazivosti dané lokality v daném pásmu a daném snímku. Hodnoty zasažené oblačností byly vyřazené z výpočtů a analýz.

Při výběru se zohledňovalo například to, jak jsou lokality daleko od sebe, aby víceméně pokryly oblast průniků pozic WRS-2 191-025 a 192-025. Dále se zohledňovalo i to, jak dané lokality vypadají na archivních leteckých snímcích od ČÚZK. Konkrétně se tak ověřovalo, zda došlo k nějakým změnám nebo ne. V neposlední řadě se porovná CORINE Land Cover 2012 s CLC 1990, za vhodné byly považovány ty lokality, u kterých neproběhla v průběhu tohoto časového úseku žádná změna.

Nejdůležitějším faktorem pro výběr lokalit byly hodnoty směrodatných odchylek, vypočítané pro pásma červené a následně SWIR-2, ze všech původních SR snímků Level-2 časové řady pro každý pixel. Vznikly tak 2 rastry, které budou pro každé pásmo vyjadřovat variabilitu naměřených hodnot v průběhu posledních 30 let. Čím nižší tato hodnota pro nějaký pixel je, tím spíše se bude jednat o dlouhodobě neměnnou plochu.

Na Obr. 10 jsou vypočítány směrodatné odchylky z naměřených hodnot odrazivosti pro pásmo 7 (SWIR-2) a pásmo 3 (červená) ze všech snímků Landsat 5. Vlevo dole v rámci téhož obrázku je mapa typů povrchu, které zde jsou dle CLC 2012. V tomto obrázku je vidět, že nejnižších hodnot směrodatných odchylek dosahují lesy, takže se zdá, že některé lesy patří z hlediska variability naměřených hodnot k nejstabilnějším typům povrchů v porovnání jak se zástavbou, tak s ornou půdou. Některé části lesů mají velmi nízké směrodatné odchylky pro hodnoty odrazivosti jak v červeném, tak infračerveném pásmu SWIR2. Zdají se být tedy více neměnné, než alespoň některé vodní povrchy. U těch je na obrázku vidět, že větší variabilitu vykazují vodní plochy v červeném pásmu, než v pásmu infračervené. Z důvodu nízké variability v těchto dvou typech povrchů budu zkoumat vliv faktor negativně ovlivňujících časové řady dat Landsat zejména u lesů a některých vodních ploch.

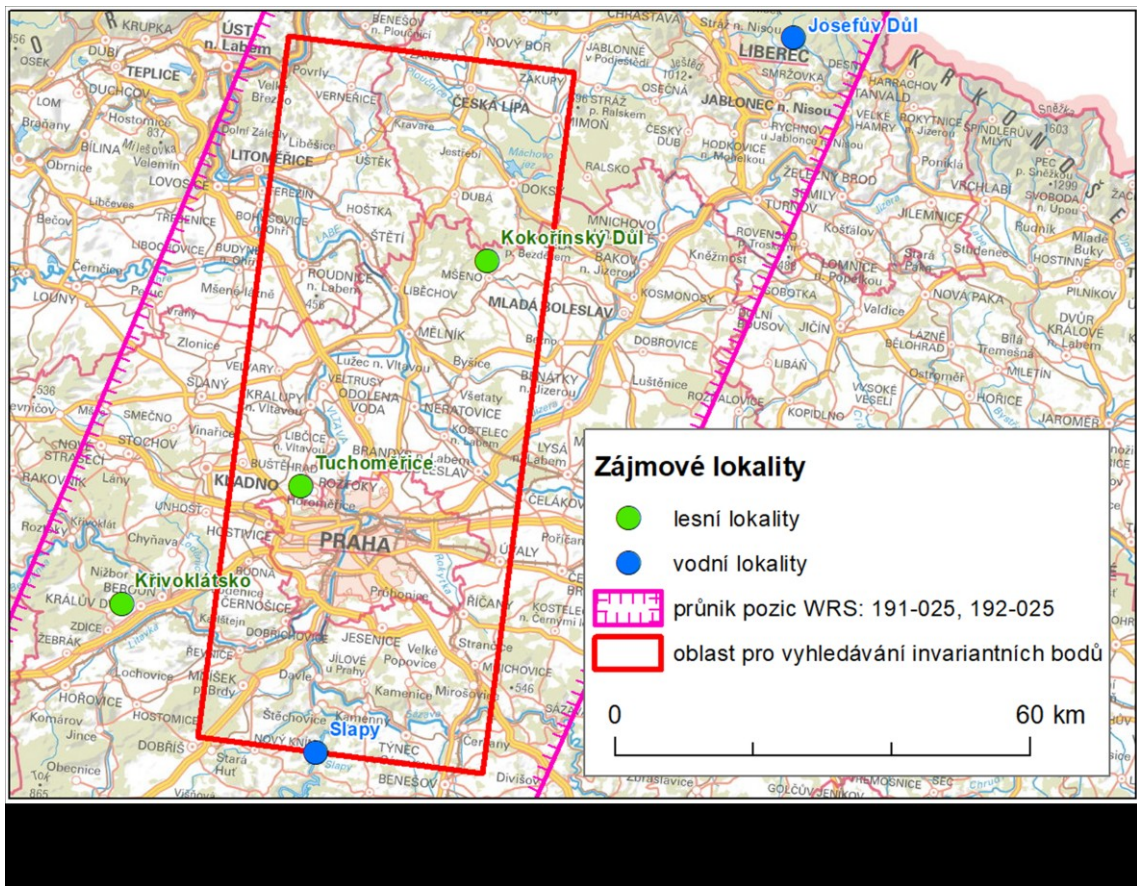


Konkrétní vybrané lokality

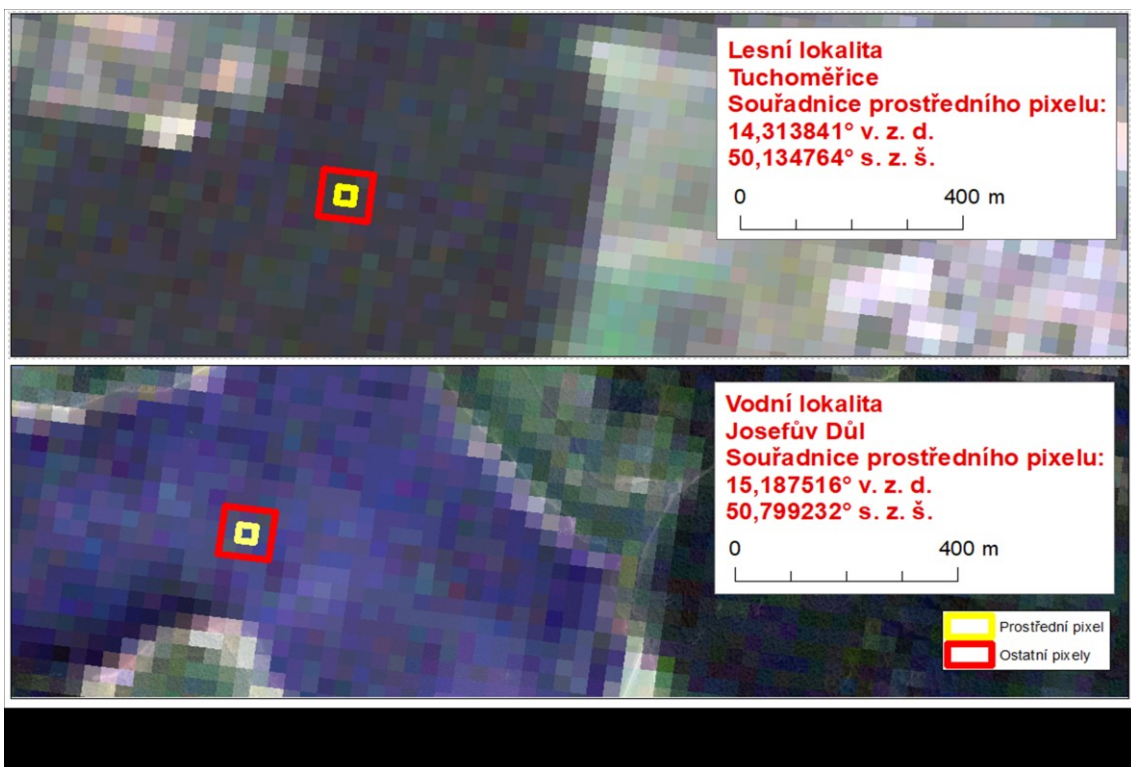
V Tab. 5 jsou uvedeny vybrané lokality, jejich typ a poloha. Jak je vidět, byly vybrány celkem dvě vodní lokality a tři lesní lokality, u kterých předpokládám určitou neměnnost, tedy invariantnost, a které jsou uvnitř dostatečně rozlehlých homogenních oblastí (alespoň 7 x 7 pixelů), takže se nemusím obávat, že by byly ovlivněny jinými typy povrchu. Rozmístění těchto lokalit je vidět na Obr. 11. Pouze dvě lokality jsou ale oblasti, z kterých byly vybírány invariantní body (viz podkapitola 3.3.2) a to lokalita Tuchoměřice a Kokořínský Důl. Nejdále od této oblasti je Josefův Důl. V tabulce jsou také vidět směrodatné odchylky pásma odrazivosti červené a SWIR-2 (odchylky byly počítány jak z dat OLI, tak TM s měřítkovým faktorem 0,0001). Jak je vidět, obě vodní plochy dosahují vyšší variability v červeném pásmu, než lesní lokality. Nejvyšší variabilitu v datech má jak pro pásmo červené, tak pásmo SWIR-2 lokalita Josefův Důl.

Název	Typ	v. z. d.	s. z. š.	$\sigma_{\text{červená}}$	$\sigma_{\text{SWIR-2}}$
Josefův Důl	vodní plocha	15,187516°	50,799232°	119,4	96,7
Slapy	vodní plocha	14,417486°	49,794508°	102,7	41,5
Kokořínský Důl	Les	14,625244°	50,458325°	77,0	55,8
Tuchoměřice	Les	14,313841°	50,134764°	89,9	57,8
Křivoklátsko	Les	13,988203°	49,950712°	87,1	57,1

Tab. 5 Seznam zájmových lokalit a jejich směrodatné odchylky pro pásma červené a infračervené (Zdroj: vlastní tvorba)



Na Obr. 12 níže jsou vidět umístění dvou z pěti vybraných zájmových lokalit. Červeným čtvercem je vymezena zájmová oblast a žlutým čtvercem je zvýrazněn prostřední pixel. Jak je vidět jedná se plochy uvnitř rozsáhlých homogenních neměnných ploch.



3.3 Metoda IR-MAD

3.3.1 Základní principy metody

V praxi se může jednat o dva překrývající se snímky (F a G) o N spektrálních pásmech. Je požadováno, aby střední hodnota (průměr) všech pásem těchto snímků byla rovna 0. Toho se dá dosáhnout zjištěním průměrné hodnoty pro každé pásmo a následným odečtením této hodnoty od každého pixelu. Snímky jsou následně transformovány na $U = a^T F$; $V = b^T G$ ($U = a_1 F_1 + a_2 F_2 + \dots + a_N F_N$; $V = b_1 G_1 + b_2 G_2 + \dots + b_N G_N$), tak aby se jejich rozptyl rovnal hodnotě 1 a především aby U a V byly maximálně korelované. Všechna pásma každého snímku mají svůj vlastní koeficient a_i , pro U_i nebo b_i pro V_i a jsou počítány pomocí kanonické korelační analýzy. Korelace mezi $a_i F_i$; $b_i G_i$ se nazývá itá-kanonická korelace. Kovariance mezi U a V odpovídá korelaci ρ ($\rho = \text{Cov}(U; V)$).

MAD_i představuje rozdíl dílčích částí U a V ($U_i - V_i = a_i F_i - b_i G_i$), vyjadřuje tedy míru předpokládané změny pro jedno konkrétní spektrální pásmo. Hodnoty nízké a blízké nule jsou místa s předpokládanou minimální (nebo žádnou) změnou. Vyšší hodnoty naopak představují místa s vysokou pravděpodobností změny. Celková míra předpokládané změny se dá vyjádřit jako:

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{MAD_{ij}}{\sigma_{MAD_i}} \right),$$

kde MAD_{ij} představuje dílčí rozdíly v jednom pixelu a σ_{MAD_i} je směrodatnou odchylkou MAD_i v celém obraze. Nízké hodnoty, nebo hodnoty blízké 0 představují místa s minimální předpokládanou změnou. Vypočtená hodnota představuje chí kvadrát hodnotu pro N stupňů volnosti, kde N představuje počet pásem. Této hodnotě odpovídá určitá hladina významnosti. Čím je hodnota chí kvadrátu vyšší, tím je hladina významnosti nižší. Výhoda převedení této hodnoty na hladinu významnosti spočívá v tom, že každý pixel má přiřazenou hodnotu v rozmezí od 0 do 1 (1 odpovídá nejvyšším změnám). Pokud se hladina významnosti odečte od hodnoty 1, vypočte se tak pravděpodobnost změny.

Celý proces obohatil NIELSEN (2007) o iterace (Iteratively reweighted multivariate alteration detection), do kterých vstupují váhy odpovídající hladině významnosti chí kvadrátu o N stupních volnosti. Tyto váhy vstupují do výpočtu vážených průměrů, variančních a kovariančních matic tedy:

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^N w_j X_{ji}}{\sum_{j=1}^N w_j} \quad S_{kl} = \frac{\sum_{j=1}^N w_j (X_{jk} - \bar{X}_k)(X_{jl} - \bar{X}_l)}{(N - 1) \sum_{j=1}^N w_j / N}$$

kde w_j jsou váhy jednotlivých pixelů, \bar{x}_i je vážený průměr pro konkrétní pásmo a S_{kl} je kovariance. Z těchto proměnných se opět přes kanonickou korelaci získá koeficient a , b . Pixely beze změny budou mít větší váhu a tak se dají očekávat s těmito nově vypočtenými koeficienty vyšší dosažené kanonické korelace a zvýraznění rozdílů. Následně jsou znovu vypočítány rozdíly MAD_i a stanoví se nové váhy, které budou vstupovat do příští iterace. Počet iterací může být předem zadán, nebo může probíhat do té doby, než se splní nějaká podmínka. Například dokud nebude mít nejvyšší

rozdíl kanonické korelace z aktuálního cyklu a stejné kanonické korelace z předchozího cyklu nižší hodnotu než je konkrétní mez. NIELSEN (2007) za takovou hodnotu navrhuje například 10^{-6} .

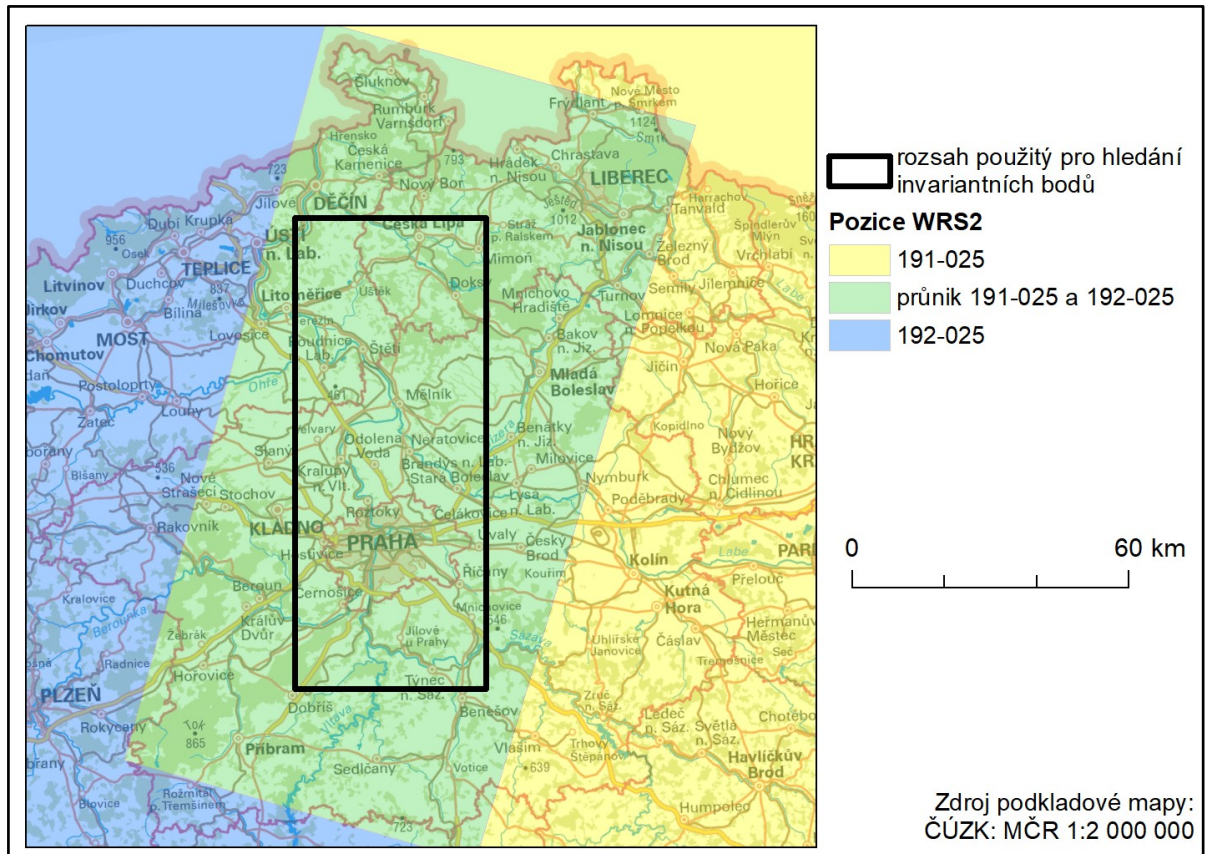
3.3.2 Aplikování skriptů iMad.py a radcal.py na časovou řadu snímků

Ze stránek <https://mortcanty.github.io/src/>, je možné stáhnout skripty, se kterými lze provést radiometrickou normalizaci IR-MAD. Jedná se o osobní stránky Morta Cantyho a ve složce Software je odkaz ke stažení skriptů v jazycích Python nebo ENVI/IDL. Vzhledem k tomu, že autor této práce má rozsáhlejší znalosti jazyka Python, bylo rozhodnuto použít skripty z tohoto odkazu. Uveřejněné skripty jsou přílohou k publikaci Canty (2014). Skripty pro radiometrickou normalizaci jsou uloženy ve složce CHAPTER9. Normalizace je zde rozdělena do dvou skriptů. První je iMad.py, tento skript vytvoří ze dvojice překrývajících se snímků IR-MAD matici, tedy nový snímek, který vyhodnocuje podobnost překrývajících se pixelů. Využití tohoto produktu je mnohem širší, než jen samotné normalizace, především se tento produkt používá k hledání odlišností/změn ve scéně, to je patrně i důvod, proč byl tento skript oddělen od skriptu radcal.py, který vytvoří z produktů IR-MAD a původních snímků, snímky normalizované. Při použití skriptu iMad.py je nutné použít snímky se stejným prostorovým vymezením. Není tedy možné použít snímky v takovém rozsahu, v jakém byly staženy ze serveru, a je vhodné snímky oříznout v nějakém rozumném rozsahu, který bude pro oba snímky totožný, protože skript nepracuje s geografickou pozicí, ale s pozicí v rámci matice rastru. Oblast výřezu snímků, ve které byly vybírány invariantní body, je vidět na Obr. 12 jako černý obdélník. Další podmínkou, kterou snímky musí splňovat, je to, že rastr nesmí obsahovat prázdné buňky. Z tohoto důvodu byl rozsah, pro který se snímky ořezávaly, trochu menší než prostor průniku obou pozic 192-025 a 191-025. Rozsah snímků i v rámci jedné pozice není totiž vždy zcela totožný a jedině ořezáním v menším rozsahu, než je oblast překrytu obou pozic, je možné toho docílit. Pokud se uživatel nemůže vyhnout použití prázdných buněk, může jejich prázdnou hodnotu nahradit jinou hodnotou. Tam, kde bude oblačnost na jednom snímku, s nejvyšší pravděpodobností nebude oblačnost na snímku druhém. Takový pixel se tedy s největší pravděpodobností bude tvářit jako velká změna a zohlednění oblačnosti nemusí autor brát v potaz.

Jako referenční bude použit snímek LT05_L1TP_192025_19980810_20161223_01_T1. Tento snímek je zcela bez oblačnosti a přibližně v polovině časové řady, což je postup, který doporučuje i například FURBY, CAMPBELL (2001). Snímek v polovině časové řady by teoreticky měl být v průměru temporálně nejbliže, takže by měl být i všem ostatním snímkům v průměru nejpodobnější.

V průběhu každé iterace se z bodů, které si jsou nejpodobnější (tedy budou považované za invariantní), bude počítat regresní koeficient pro každé pásmo zvlášť. Při výpočtu každé další iterace se porovnají regresní koeficienty s koeficienty pásem z předchozí iterace a zjistí se rozdíl. Ve chvíli, kdy největší rozdíl regresního koeficientu mezi iteracemi klesne pod hodnotu 0,001, je již výpočet IR-MAD matice a výběr invariantních bodů považován za natolik přesný, že se výsledek uloží do nového rastru. Výsledná matice obsahuje $n + 1$ pásem, kde n představuje počet pásem původních snímků plus jedno pásmo, které představuje podobnost celkovou. Při zpracování snímků Landsat 5 a 8 se tedy jedná celkem o 7 pásem (zjišťována podobnost mezi 6 pásmy). Čím je hodnota celkové podobnosti mezi všemi pásmy menší (bližší 0), tím je menší pravděpodobnost, že v rámci tohoto pixelu proběhla nějaká změna.

Po vytvoření IR-MAD matice se může pokračit k samotné radiometrické normalizaci. Tu zajišťuje skript `radcal.py`. Vstupními parametry tohoto skriptu jsou především referenční snímek, cílový snímek a IR-MAD matice. Dále se může vložit prahová hodnota pro výběr invariantních bodů, defaultně se jedná o hodnotu 0,95. Z bodů, které splňují tuto podmínku, se vypočítá lineární regrese pro úpravu hodnot v cílovém snímku. Poslední věcí, která se může nastavit, je původní neupravený cílový snímek. Tedy cílový snímek, předtím než byl ořezán, nebo třeba i jinak upraven, pro který budou na základě rovnic lineárních regresí pro jednotlivá pásma přepočítány hodnoty všech pixelů. To znamená, že snímek bude radiometricky normalizován i mimo území určené oříznutím vstupních dat pro skript `iMad.py`.



Obr. 12 Rozsah oříznutí snímků pro skript `iMad.py`
(Zdroj: Vlastní tvorba)

Ve snaze urychlit a zefektivnit zpracování byly oba skripty přepsány a spojeny do jednoho skriptu tak, aby stačilo vložit ořezaný referenční snímek, složku s ořezanými cílovými snímky, složku s původními cílovými snímky a složku, do které se budou ukládat výsledky. Tím byla normalizace celé časové řady shrnuta do jediného kroku.

3.4 Statistické vyhodnocení výsledků

Data, která se vyhodnocovala, představují hodnoty spektrální odrazivosti ze zájmových lokalit (průměr z okna 3 x 3 pixely). Spektrální odrazivost snímků má měřítkový faktor 0,0001 (USGS, 2018 e). Povrch, který má tedy absolutní odrazivost, by měl nést hodnotu 10000. Tyto hodnoty jak pro původní data, tak pro normalizovaná data byly vyhodnoceny pomocí statistických ukazatelů a testů, popsanych v následujících podkapitolách. Byly užity zejména neparametrické testy, protože

neočekávám, že by data mohla vždy splňovat normální rozdělení. Kromě těchto ukazatelů a testů byly také některé zkoumané jevy vizualizovány pomocí grafů a obrázků, zejména boxplotů. Hodnotám, které signalizovaly úspěšnost normalizace podle kritérií popsaných níže, byla podmíněným formátováním v tabulkách zvýrazněna pole zelenou barvou. Ostatní byla zvýrazněna růžovou. Získání hodnot pro jednotlivé lokality z jednotlivých snímků proběhlo prostřednictvím softwaru ArcGIS 10.4. Výpočet statistických ukazatelů proběhl prostřednictvím softwaru Excel a statistické testy proběhly v softwaru R. Popis použitých statistických testů (Wilcoxonův, Mann-Whitney a Kruskalův-Wallisův test) je v HOLČÍK, J., KOMENDA, M. et al. (2015).

Nejdříve bylo zjištěno zastoupení záporných hodnot v časových řadách průměrů pro jednotlivé lokality. Záporná hodnota představuje totiž jednoznačnou chybu a při výpočtu NDVI vede k hodnotám vyšším než 1, nebo menším než -1. Vyšší počet záporných hodnot po normalizaci se tak může hodnotit jako jev negativní. Tyto záporné hodnoty budou vyřazeny z výpočtů statistických ukazatelů, testů i grafů, které budou popsány v následujících podkapitolách.

3.4.1 Vyhodnocení celé časové řady

V Tab. 6 jsou hodnoty odrazivosti jednotlivých pásem naměřené v zájmových lokalitách (průměr z okna 3 x 3 pixely) z referenčního snímku LT05_L1TP_192025_19980810. Pokud se jedná opravdu o neměnné, nebo alespoň téměř neměnné lokality, tak po úspěšné normalizaci by se měly upravené hodnoty těmito čísly blížit více, než jak tomu bylo u původních SR dat Level-2.

Pásma	Křivoklátsko	Tuchoměřice	Kokořínský Důl	Josefův Důl	Slapy
Modrá: B1	186,4	225,8	207,4	117,0	140,4
Zelená: B2	318,6	338,3	314,2	159,7	207,1
Červená: B3	224,2	270,2	210,3	110,0	132,0
NIR-1: B4	1728,2	1906,6	1846,7	151,7	201,8
SWIR-1: B5	726,3	1003,9	762,4	68,2	38,9
SWIR-2: B7	290,2	414,7	299,4	17,2	29,1

Tab. 6 Průměry hodnot jednotlivých lokalit pro LT05_L1TP_192025_19980810
(Zdroj: vlastní tvorba)

Pro porovnání, zda se hodnoty SR po normalizaci více blížily hodnotám z Tab. 6, byly nejdříve vypočítány průměry a mediány původních i normalizovaných dat pro každé pásmo u každé z lokalit z celé časové řady. Pokud by průměry a mediány znormalizované řady více odpovídaly hodnotě naměřené na referenčním snímku, než hodnoty SR Level-2 před úpravou, byla pokládána normalizace z tohoto hlediska za úspěšnou, tedy pokud platil následující vztah:

$$|x_{ij} - r_{ij}| > |y_{ij} - r_{ij}|,$$

kde x_{ij} představuje průměr nebo medián odrazivosti i -té invariantní lokality, j -tého pásma; r_{ij} referenční hodnota statistického ukazatele dané lokality (viz Tab. 6) a y_{ij} představuje normalizovanou hodnotu průměru nebo mediánu odrazivosti. Absolutní rozdíl těchto středních hodnot s hodnotou z referenčního snímku tedy signalizoval, jestli se liší více původní, nebo normalizované snímky.

Dále byly zjištěny směrodatné odchylky jak pro celou řadu normalizovanou, tak nenormalizovanou. Úspěšná normalizace by měla znamenat menší směrodatnou odchylku v datech z neměnných lokalit oproti původním SR datům Level-2. Pokud se hodnota směrodatné odchylky u dané lokality pro konkrétní pásmo po normalizaci zvýšila, bude tato hodnota pomocí podmíněného formátování zvýrazněna růžově.

Nakonec byl proveden Wilcoxonův test pro jeden výběr. Jako předpokládaná střední hodnota zde byly použity hodnoty zájmových lokalit z referenčních snímků. Výběr bude tvořen hodnotami z těch samých lokalit z normalizovaných snímků a následně se test vypočítá i pro výběr z nenormalizovaných snímků. Pokud Wilcoxonův test vycházel lépe pro normalizovaná data, tedy p-hodnota bude blíže nulové hypotéze (blíže hodnotě 1), bude považována normalizace z tohoto hlediska za úspěšnou, tedy že hodnota z referenčního snímku lépe odpovídá očekávané hodnotě pro lokalitu v rámci celé časové řady.

3.4.2 Rozdělení časové řady na dva výběry, jejich vyhodnocení a porovnání

Dále byla časová řada několikrát zanalyzována po rozdělení na dva výběry. Prvně byla řada rozdělena podle senzorů, kterými byly snímky pořízeny. Tedy podle toho, zda byly pořízeny senzorem TM (Landsat 5) nebo senzorem OLI (Landsat 8). Následně byly na dva výběry rozděleny a vyhodnoceny pouze data, která byla pořízena senzorem TM, protože snímky OLI představují kvalitativně odlišný zdroj s velmi krátkou dobou, po kterou se pořizují. Nejdříve byly snímky rozděleny a vyhodnoceny podle pozice WRS-2 na výběry 191 a 192 (podle pozice 191-025 a 192-025). Potom byly snímky TM rozděleny a vyhodnoceny na výběry podle data pořízení. K rozdělení byla využita nejdelší mezera, která v časové řadě je a to na snímky pořízené před rokem 1994 a po roce 1998. Tyto dvě skupiny budou pojmenovány 84-94 a 98-11. Počet snímků v jednotlivých výběrech je uveden v Tab. 7.

Parametr rozdělení	výběr 1		výběr 2	
	Název	počet snímků	název	počet snímků
Senzor	TM	63	OLI	18
Pozice WRS-2 (TM)	191 (191-025)	36	192 (192-025)	27
Stáří snímku (TM)	84-91 (1984-1994)	40	98-11 (1998-2011)	23

Tab. 7 Počet snímků pro jednotlivé výběry
(Zdroj: vlastní tvorba)

Opět se pro jednotlivé výběry zjišťovaly průměry, mediány a směrodatné odchylky v zájmových lokalitách pro normalizované i původní hodnoty. Pokud se v SR hodnotách Level-2 projevovaly vnější faktory, podle kterých byla data rozdělená do výběrů (statistický ukazatel jednoho výběru je značně vyšší, než ukazatel druhého výběru), mělo by po úspěšné normalizaci těchto faktorů platit:

$$|x_{1ij} - x_{2ij}| > |y_{1ij} - y_{2ij}|,$$

kde x_{1ij} představuje průměr/medián/směrodatnou odchylku původních hodnot odrazivosti výběru 1, i -té lokality, j -tého pásma; x_{2ij} je průměr/medián/směrodatná odchylka originálních hodnot výběru 2. y_{1ij} je průměr/medián/směrodatná odchylka vypočítaná z normalizovaných hodnot prvního výběru a y_{2ij} je odpovídající veličina vypočítaná z normalizovaných hodnot výběru 2. Pokud

vztah platit bude, budou odpovídající statistické ukazatele v tabulce zvýrazněny zelenou pomocí podmíněného formátování.

Nakonec byl pro každé rozdělení aplikován dvouvýběrový Mann-Whitney test. Pokud po normalizaci bude p-hodnota tohoto testu vyšší, než pro ty samé výběry před normalizací, bude menší důvod zavrhnout nulovou hypotézu, tedy, že mezi výběry již neexistuje takový rozdíl, jaký tam byl před normalizací. Taková p-hodnota je tedy očekávána, pokud normalizace proběhla úspěšně.

3.4.3 Rozdělení časové řady na čtyři výběry, jejich vyhodnocení a porovnání

Úplně nakonec byly vytvořeny 4 výběry pro každé pásmo každé lokality ze snímků TM. Skupiny byly vytvořeny podle kombinace dvou faktorů pozice WRS-2 a podle stáří, analogicky s předchozí podkapitolou. Číselný údaj, kterým pojmenování těchto skupin začíná, představuje pozici WRS-2, poslední tři písmena určují, kdy byl snímek pořízen: old představuje snímky z roku 1984-1994 a new zase snímky z let 1998-2011. Snímky tedy byly rozdělené do kategorií pojmenovaných 191_old, 191_new, 192_old a 192_new. Počet snímků v jednotlivých kategoriích je v Tab. 8. Opět byly zjišťovány pro tyto kategorie statistické ukazatele průměr, medián, směrodatná odchylka. Tentokrát bude považován za doklad úspěšné normalizace menší rozptyl mezi těmito výběry (pro konkrétní pásmo a lokalitu) u normalizovaných hodnot, než u původních SR Level-2 hodnot, tedy že bude platit:

$$\text{var}(X_{ij}) > \text{var}(Y_{ij}),$$

kde X_{ij} jsou průměry/mediány/směrodatné odchylky původních hodnot odrazivosti jednotlivých výběrů (191_old,...), i -té lokality, j -tého pásma a Y_{ij} představuje stejnou veličinu pro normalizované hodnoty.

Výběr	Pozice WRS-2	Období pořízení snímků	Počet snímků
191_old	191-025	1984-1994	11
191_new	191-025	1998-2011	24
192_old	192-025	1984-1994	12
192_new	192-025	1998-2011	16

Tab. 8 Počet snímků u jednotlivých výběrů
(Zdroj: vlastní tvorba)

Bylo také zjišťováno pořadí výběrů podle hodnoty původních jednotlivých statistických ukazatelů v rámci jednoho pásma a jedné lokality. Statistické ukazatele tak tedy budou doplněny pořadovým číslem. Toto by mohlo ukázat pro jaká pásma, má vyšší význam stáří snímku, nebo pozice WRS-2.

Nakonec byl proveden vícevýběrový Kruskal-Wallisův test. Do tohoto testu budou jako jednotlivé výběry vstupovat výběry popsané výše. Pokud pro tyto výběry vyšla p-hodnota po normalizaci blíže hodnotě 1, než před ní, bude to znamenat, že mezi jednotlivými skupinami není statisticky významný rozdíl a normalizaci tak lze považovat za úspěšnou.

4 Výsledky

4.1 Zastoupení záporných hodnot v původní a normalizované časové řadě

Před normalizací byly zjištěny pouze 2 záporné hodnoty pro a to pro lokalitu Slapy. Hodnoty ostatních lokalit již byly vždy kladné. V Tab. 9 jsou tyto hodnoty zaznamenány.

Slapy	Pásmo	Hodnota
LT05_L1TP_192025_20020618_20161208_01_T1	5	-5,56
LT05_L1TP_191025_20050923_20161124_01_T1	7	-13,00

Tab. 9 Záporné hodnoty lokalit
(Zdroj: vlastní tvorba)

Vlivem normalizace vznikla u vodních povrchů řada záporných hodnot. V tabulkách Tab. 10 a Tab. 11 jsou přehledy, které shrnují, pro jaké období a pro jakou pozici byly tyto hodnoty vygenerovány. Jak je vidět, převažují hodnoty z pozice 191-025 a z období 1998-2011. Je nicméně třeba vzít v potaz, že snímků z pozice 192-025 je přibližně o třetinu více než snímků z pozice 191-025 a snímků z období 1998-2011 je téměř dvakrát tolik jak snímků z období 1984-1994. Použitelné hodnoty, tedy sloupec nejvíce napravo, představuje počet hodnot, nezasažených oblačností, které byly po normalizaci kladné a bezoblačné. Extrémním případem je v lokalitě Josefova Dolu 7. pásmo senzoru OLI, kdy zůstaly použitelné jen 4 hodnoty.

	Chyby					Použitelné hodnoty
	Počet	WRS-2: 191-025	WRS-2: 192-025	1984-1994	1998-2011	
L5_B4	2	2	0	0	2	53
L5_B5	21	15	6	4	17	34
L5_B7	21	16	5	3	18	34
L8_B5	4	4	0	X		14
L8_B6	10	6	4			8
L8_B7	11	6	5			7

Tab. 10 Chybné (záporné) hodnoty v lokalitě Slapy po normalizaci
(Zdroj: vlastní tvorba)

	Chyby					Použitelné hodnoty
	Počet	WRS-2: 191-025	WRS-2: 192-025	1984-1994	1998-2011	
L5_B4	3	3	0	0	3	40
L5_B5	19	16	3	5	14	24
L5_B7	9	8	1	3	6	34
L8_B4	1	0	1	X		11
L8_B5	3	2	1			9
L8_B6	7	4	3			5
L8_B7	8	4	4			4

Tab. 11 Chybné (záporné) hodnoty v lokalitě Josefův Důl po normalizaci
(Zdroj: vlastní tvorba)

4.2 Vyhodnocení celé časové řady

Průměry původních časových řad SR Level-2 hodnot z Tab. 12 (sloupečky Orig.) jsou všechny vyšší než hodnoty z referenčního snímku v Tab. 6. Po normalizaci se tyto průměry mnohem více podobají referenčním hodnotám. Tedy tyto průměry jsou značně bližší hodnotám ze snímku LT05_L1TP_192025_19980810, než průměry nenormalizovaných časových řad a všechny tak splňují vztah popsany v podkapitole 3.4.1. Z tohoto hlediska tedy může být normalizace považována za úspěšnou.

	Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
	Orig.	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	269,9	189,3	308,8	215,4	268,2	180,9	250,7	167,3	254,5	174,6
Zelená	396,4	316,5	433,9	344,6	394,5	309,4	287,9	211,3	313,3	240,0
Červená	296,3	237,2	339,3	275,6	287,3	221,7	212,7	150,0	222,6	159,5
NIR-1	2001,4	1765,2	2251,9	1997,7	2019,3	1816,7	317,5	213,0	337,3	229,1
SWIR-1	821,4	751,5	1071,0	1003,6	846,1	781,7	115,4	103,4	90,1	70,4
SWIR-2	340,9	302,0	446,8	408,9	351,9	314,0	84,1	67,2	51,0	38,4

Tab. 12 Průměrné hodnoty pro jednotlivé lokality z celé časové řady
(Zdroj: vlastní tvorba)

Až na výjimky jsou mediány celé časové řady v Tab. 13 nižší než průměry z Tab. 12, což je podle očekávání vzhledem k tomu, že nebyly z výběrů vyřazeny snímky s roztroušenou oblačností. Přesto jsou tyto mediány pro SR Level-2 časové řady značně vyšší, než hodnoty z těchto lokalit z referenčního snímku LT05_L1TP_192025_19980810, které jsou v Tab. 6. Mediány hodnot po normalizaci jsou nyní obvykle i podobnější referenčním hodnotám, než tomu bylo v případě Tab. 12 (menší rozdíl mezi normalizovanými mediány a referenčním hodnotami z Tab. 6, než tomu bylo u průměrů v tabulce výše).

	Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	252,4	180,0	278,8	210,6	261,1	179,8	231,6	152,7	231,9	162,9
Zelená	374,4	311,4	407,7	339,4	384,2	305,2	280,3	192,4	301,3	221,1
Červená	280,1	228,7	322,7	271,1	282,9	218,1	205,6	120,9	200,6	151,1
NIR-1	2010,7	1765,6	2247,2	1997,1	1975,6	1826,2	285,8	158,8	308,3	205,9
SWIR-1	809,1	742,1	1073,8	1006,5	842,7	777,8	85,3	67,9	70,6	64,2
SWIR-2	338,3	298,4	432,6	410,7	344,8	310,2	61,2	29,5	40,4	33,2

Tab. 13 Mediány jednotlivých lokalit z celé časové řady
(Zdroj: vlastní tvorba)

V Tab. 14 jsou vidět směrodatné odchylky pro jednotlivé lokality v rámci celé časové řady. Jak je vidět, největší variability dosahují snímky v blízkém infračerveném pásmu, nejnižší v posledním krátkovlnném infračerveném pásmu. Při porovnání tabulek původních a normalizovaných směrodatných odchylek je vidět, že směrodatné odchylky časových řad rozdělených podle pásem a lokalit se po normalizaci značně snížily. Jedinou výjimkou jsou hodnoty pro infračervené pásma u Josefova Dolu, tyto hodnoty mají zvýrazněné pole růžovou barvou.

	Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	107,9	30,6	112,8	29,6	101,3	22,2	146,0	86,2	118,2	55,3
Zelená	99,3	34,5	98,4	30,0	86,7	21,8	157,5	101,7	117,7	74,5
Červená	87,1	32,1	89,9	34,7	77,0	22,3	119,4	100,8	102,7	68,0
NIR	258,1	69,4	284,2	64,0	206,2	62,9	171,6	175,2	177,4	122,8
SWIR-1	118,1	38,9	111,1	33,7	105,1	34,6	114,8	138,6	63,0	46,1
SWIR-2	57,1	26,6	57,8	26,7	55,8	20,8	96,7	110,3	41,5	34,4

Tab. 14 Směrodatné odchylky jednotlivých lokalit z celé časové řady
(Zdroj: vlastní tvorba)

V Tab. 15 jsou p-hodnoty Wilcoxonova jednovýběrového testu, kde se porovnávaly časové řady z jednotlivých lokalit s hodnotami z těch samých lokalit ze snímku LT05_L1TP_192025_19980810. Jak je vidět, původní výběry (časové řady) jen velmi málo odpovídají svojí střední hodnotou referenčnímu snímku, snad až na pásmo SWIR-2 u lokalit Josefův Důl a Slapy. Přestože pro normalizované výběry nadále většina p-hodnot vychází velmi nízká, tak u pouhých tří p-hodnot (jejichž pole jsou zvýrazněná růžovou barvou) došlo k prokazatelnějšímu rozdílu, než tomu bylo u původních SR Level-2 hodnot, tedy k p-hodnotě bližší nule. Pouze u některých lokalit můžeme ale mluvit o tom, že by byla p-hodnota dostatečně vysoká, aby byla prokázána nulová hypotéza.

	Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	3.E-08	0.42	5.E-08	4.E-04	2.E-05	2.E-10	3.E-08	2.E-04	2.E-11	6.E-06
Zelená	2.E-08	0.08	2.E-11	0.26	1.E-08	9.E-03	7.E-07	2.E-03	5.E-10	2.E-03
Červená	2.E-08	5.E-03	2.E-08	0.49	8.E-10	6.E-05	2.E-07	0.03	4.E-10	6.E-03
NIR	2.E-10	7.E-05	5.E-12	3.E-13	3.E-08	5.E-04	1.E-08	0.09	5.E-08	0.16
SWIR-1	2.E-07	9.E-07	1.E-05	0.81	2.E-07	6.E-07	7.E-03	0.44	1.E-11	1.E-04
SWIR-2	1.E-08	6.E-04	5.E-05	0.02	4.E-13	4.E-09	0.71	9.E-05	0.20	0.29

Tab. 15 Wilcoxonův jednovýběrový test pro srovnání časové řady s referenčním snímkem
(Zdroj: vlastní tvorba)

Časová řada pro modré a zelené pásmo u lokalit Křivoklátsko a Josefův Důl je vidět v příloze 2. V příloze jsou zvláště vyznačené hodnoty ze senzoru TM modrou barvou a zelenou ze senzoru OLI. Červená barva je pro hodnoty normalizované. Hodnoty ze senzoru TM jsou také protnuté přímkou lineární regrese a vpravo pod legendou je uvedena síla korelace mezi naměřenými hodnotami a datem pořízení snímku. Síla této regrese naznačuje, že by se na základě regresního vztahu mohly odhadovat hodnoty v lokalitě i pro ty období, ze kterých měření nejsou, tím, že by se do rovnice lineární regrese dosadilo číslo odpovídající určitému dni. Směrnice těchto přímků je v obou případech záporná, takže je evidentní, že novější hodnoty jsou tmavší (nižší). Další věcí, na kterou je dobré se zaměřit, je rozdíl mezi hodnotami Landsat 8 a Landsat 5. Zejména u modrého pásma SR level-2 hodnot lokality Křivoklátsko je vidět, že naměřené hodnoty se změnou senzoru z TM na OLI skokově zmenšily. Normalizované hodnoty se drží víceméně ve stejné úrovni, aniž by se skokově změnilo s přechodem z TM na OLI. Také je vidět, že zde již neplatí lineární vztah zmenšování SR hodnot v závislosti na čase a viditelně se i zmenšila směrodatná odchylka hodnot.

Boxploty A v příloze 4 jsou grafy, ve kterých jsou vidět krabicové diagramy pro normalizované a nenormalizované hodnoty odrazivosti, rozdělené podle pásma. Na levé straně jsou grafy pro lokalitu Křivoklátsko a na pravé straně jsou grafy pro Josefův Důl. Červenou tečkou jsou v těchto grafech vyznačeny referenční hodnoty ze snímku 10. 8. 1998. Jak je z grafů vidět, jednalo se u obou lokalit o snímek, který alespoň v těchto grafech dosahoval nižších hodnot odrazivosti než je medián. Po normalizaci se většina ostatních hodnot této hodnotě přiblížila a leží podstatně blíže mediánu. Zároveň se po normalizaci značně zmenšila směrodatná odchylka, tedy hodnoty se mnohem více přiblížily mediánovým hodnotám. Za zmínku také stojí to, že výsledné normalizované hodnoty se nedostaly pod minimum, nebo nad maximum, které bylo dáno nenormalizovanou časovou řadou SR. Zdá se, že normalizace více ovlivnila hodnoty v lokalitě Křivoklátsko.

4.3 Rozdíl mezi senzory TM a OLI

V Tab. 16 jsou vidět průměrné hodnoty časových řad pro jednotlivé lokality, rozdělené podle senzorů. Je vidět, že obvykle průměrné nenormalizované hodnoty ze senzoru TM (Landsat 5) jsou vyšší, než hodnoty ze senzoru OLI. Výjimkou jsou infračervená pásma lesních lokalit, ty dosahují vyšších průměrných hodnot na snímcích ze senzoru OLI (Landsat 8). Po normalizaci se průměrné hodnoty časových řad rozdělených podle senzoru, kterým byly pořízeny, již tak moc neodlišují (viz vztah z podkapitoly 3.4.2). Snímky ze senzoru TM mají nadále většinou průměry vyšší než ze senzoru OLI, ale ne již natolik signifikantně.

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	L5_B1	305,5	193,1	341,0	216,3	299,6	184,8	286,1	171,3	289,5	173,7
	L8_B2	145,5	175,9	189,9	212,1	130,7	163,7	120,9	152,7	145,8	177,2
Zelená	L5_B2	423,3	317,9	457,9	345,4	416,7	310,3	323,6	218,2	345,9	241,2
	L8_B3	302,2	311,4	345,3	341,8	297,0	305,2	157,3	186,0	211,8	236,3
Červená	L5_B3	322,9	237,9	364,0	275,2	309,2	222,6	238,0	150,8	252,8	162,8
	L8_B4	203,3	234,6	248,0	277,4	191,5	217,5	119,9	146,9	128,8	149,3
NIR-1	L5_B4	1957,1	1759,8	2206,9	1998,3	1987,9	1816,6	356,2	212,1	398,9	242,3
	L8_B5	2156,5	1783,9	2417,7	1995,9	2156,8	1816,7	175,5	217,1	145,7	178,0
SWIR-1	L5_B5	807,5	741,0	1063,3	1000,4	843,8	783,0	121,3	107,6	99,6	73,9
	L8_B6	870,2	788,1	1099,3	1015,5	855,8	776,0	93,9	82,1	60,8	54,9
SWIR-2	L5_B7	331,9	297,6	438,5	405,8	347,5	313,9	88,4	65,6	55,5	40,5
	L8_B7	372,4	317,7	477,6	420,3	371,4	314,6	68,5	81,3	37,4	28,0

Tab. 16 Průměry hodnot pro jednotlivá pásma rozdělená podle senzorů
(Zdroj: vlastní tvorba)

Mediány v Tab. 17 jsou u nenormalizovaných hodnot obvykle vyšší ze senzoru TM. Pouze u infračervených pásem lokalit Křivoklátsko, Tuchoměřice a Kokořínský Důl jsou mediány vypočtené z původních dat vyšší ze senzoru OLI. Po normalizaci jsou si mediány stejných pásem z různých senzorů značně podobnější, než byly mediány původních časových řad, takže i zde ve všech případech platí vztah z podkapitoly 3.4.2. a všechny mediány znormalizovaných dat jsou tedy zvýrazněné zeleným podmíněným formátováním.

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	L5_B1	280,2	183,0	314,7	210,6	282,6	185,0	270,6	160,8	260,2	158,6
	L8_B2	153,5	176,4	194,9	210,8	131,3	161,3	107,1	145,0	145,0	185,2
Zelená	L5_B2	401,4	314,1	434,4	341,1	396,7	307,3	314,3	209,4	313,8	221,1
	L8_B3	308,1	307,6	339,4	338,3	292,7	301,4	128,7	158,2	212,9	221,2
Červená	L5_B3	306,6	228,5	339,9	269,4	294,0	219,0	230,9	130,3	225,3	151,1
	L8_B4	199,4	231,7	236,7	273,9	182,3	211,9	87,6	100,8	131,1	151,9
NIR	L5_B4	1946,1	1755,3	2141,6	1997,2	1930,0	1827,3	308,8	165,9	345,9	230,1
	L8_B5	2261,3	1795,7	2426,3	1983,4	2146,0	1795,1	129,8	138,8	122,1	116,1
SWIR-1	L5_B5	803,7	737,6	1062,3	1004,4	840,3	783,9	93,6	68,2	73,6	66,5
	L8_B6	901,4	790,8	1116,5	1008,4	876,0	766,9	37,8	67,6	42,1	48,9
SWIR-2	L5_B7	323,2	293,7	424,4	407,7	341,4	311,2	64,6	29,1	46,3	33,8
	L8_B7	386,3	319,8	484,4	416,4	371,1	306,8	23,4	49,0	25,4	17,8

Tab. 17 Mediány pro jednotlivá pásma rozdělená podle senzorů
(Zdroj: vlastní tvorba)

Směrodatné odchylky z Tab. 18 jsou vždy pro Landsat 5 vyšší než pro Landsat 8 s výjimkou pásma SWIR-2 u lokalit Tuchoměřice a Kokořínský Důl. Po normalizacích jsou většinou směrodatné odchylky z obou senzorů, pro jednotlivá pásma v jednotlivých lokalitách, obvykle podobnější (nižší rozdíly). Rozdíly mezi senzory v rámci jednotlivých pásem u stejných lokalit, které jsou vyšší, než u znormalizovaných hodnot, mají pole v tabulce zvýrazněné růžovou barvou. Jak je vidět týká se to zejména pásem SWIR-1 a SWIR-2.

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	L5_B1	95,5	33,4	105,4	32,3	84,9	22,4	138,9	87,2	112,4	56,6
	L8_B2	24,0	8,7	25,3	15,3	19,9	9,8	85,8	80,6	50,5	51,3
Zelená	L5_B2	94,3	38,2	94,0	32,9	78,2	22,1	152,1	105,8	111,4	75,5
	L8_B3	42,4	14,7	53,2	15,2	44,0	20,0	96,1	79,9	69,1	71,0
Červená	L5_B3	78,9	34,9	82,2	37,6	66,6	21,0	113,0	93,6	97,5	69,8
	L8_B4	35,3	19,4	48,5	21,0	34,6	26,8	93,4	125,5	46,8	61,1
NIR	L5_B4	249,2	68,1	278,8	66,3	200,2	66,8	162,5	170,7	156,1	113,6
	L8_B5	227,0	70,8	238,9	54,7	173,0	41,8	122,2	194,4	71,2	142,0
SWIR-1	L5_B5	116,1	33,6	110,7	31,1	105,1	34,8	117,2	147,5	65,2	47,6
	L8_B6	112,0	33,7	108,0	40,0	104,8	33,3	102,3	77,8	44,3	35,3
SWIR-2	L5_B7	55,2	26,7	53,6	24,5	53,2	17,4	99,1	112,6	44,3	36,3
	L8_B7	52,4	19,0	62,4	31,0	62,8	31,4	85,6	86,4	28,0	19,3

Tab. 18 Směrodatné odchylky pro pásma rozdělená podle senzorů
(Zdroj: vlastní tvorba)

Při porovnávání hodnot OLI s hodnotami TM pomocí Mann-Whitneyova dvouvýběrového testu v Tab. 19 lze vidět, že senzory OLI a TM u SR Level-2 dat se liší nejméně v krátkovlnném infračerveném pásmu a z toho úplně nejméně v pásmu SWIR-2. V ostatních pásmech se již senzory OLI a TM liší poměrně zásadně. Po normalizaci byly téměř všechny výsledky blíže nulové hypotéze, než tomu bylo u dat původních. Tedy po normalizaci byla mnohem větší symetrie dat mezi jednotlivými senzory v rámci odpovídajících si pásem. Jedinými výjimkami byla pásma SWIR-1 a 2 u lokalit Křivoklátsko a Kokořínský Důl, tam se rozdíly zvětšily.

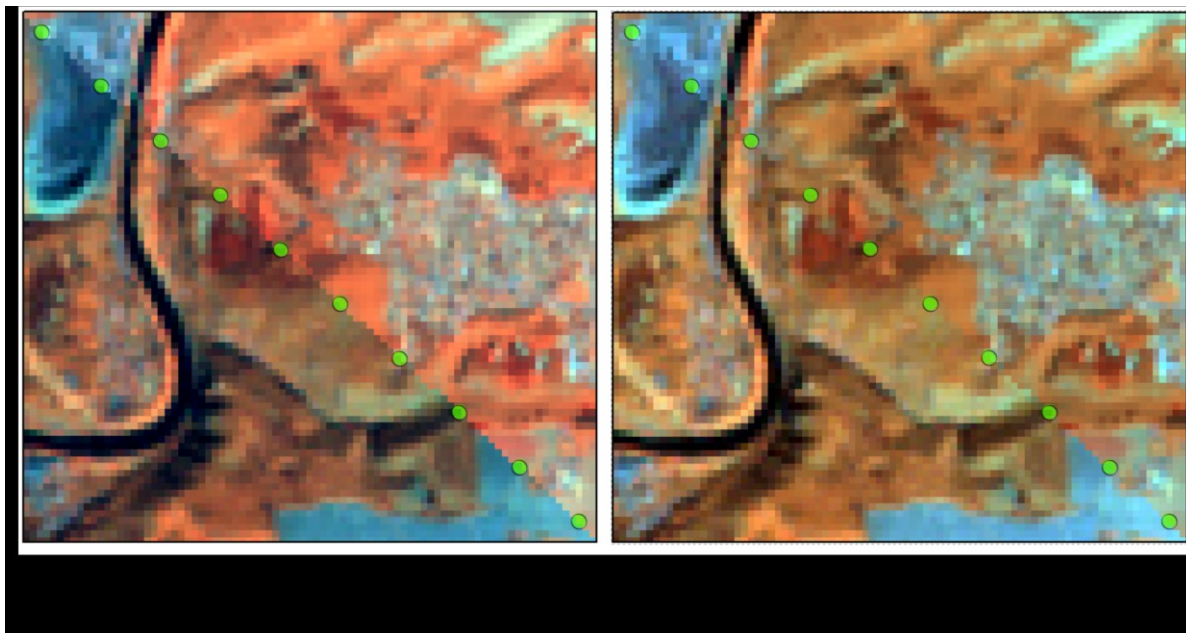
	Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	1.E-09	0,08	3.E-09	0,89	2.E-08	3.E-04	3.E-05	0,51	8.E-08	0,40
Zelená	1.E-06	0,81	3.E-06	0,89	2.E-06	0,07	7.E-05	0,29	9.E-06	0,94
Červená	7.E-08	0,74	3.E-07	0,52	5.E-07	0,06	1.E-04	0,50	6.E-07	0,78
NIR	4.E-03	0,13	0,01	0,85	8.E-03	0,74	3.E-04	0,80	8.E-09	0,03
SWIR-1	0,08	4.E-05	0,26	0,39	0,66	0,06	0,09	0,63	7.E-04	0,32
SWIR-2	0,02	6.E-04	0,04	0,09	0,24	0,15	0,08	0,70	0,02	0,55

Tab. 19 Mann-Whitneyův test srovnávající symetrii hodnot z obou senzorů
(Zdroj: vlastní tvorba)

Boxploty B a C v příloze 4 jsou grafy s krabicovými diagramy pro jednotlivá pásma v lokalitách Slapy a Kokořínský Důl. V každém grafu je vlevo diagram pro senzor TM a vpravo pro senzor OLI. Na levé straně papíru příloh jsou grafy před normalizací a napravo jsou grafy pro hodnoty normalizované. Před normalizací měly mnohem větší rozptyl hodnoty Landsatu 5. Také kvartily hodnot ze senzoru TM jsou umístěny výše, než ze senzoru OLI. To platí víceméně pro všechny grafy vyjma infračerveného záření v lokalitě Kokořínský důl. Po normalizaci se velmi razantně zmenšila směrodatná odchylka hodnot z Landsatu 5. Krabicové grafy hodnot z Landsatu 8 a 5 jsou si po normalizaci mnohem podobnější, aniž by se rozsah těchto hodnot posunul mimo rozmezí (minimum až maximum) nenormalizovaných hodnot.

V příloze 5 je prostřednictvím grafů vizualizováno, jak mezi sebou korelují SR hodnoty modrého pásma. Na ose x jsou v těchto grafech promítnuté hodnoty jedné lokality, na ose y jsou promítnuté hodnoty druhé lokality. Vykreslené body tak představují SR hodnoty modré pro dvě lokality v rámci jednoho snímku. Na levé straně jsou tyto grafy pro původní data, napravo jsou grafy pro normalizované snímky. Pro nenormalizované hodnoty byla provedena lineární regrese, která dosahuje někdy silné korelace. Nejnižší korelace mezi sebou dosahují vodní plochy. Naopak nejvyšší korelace dosahují lesní povrchy. To, že spolu koreluje i vodní plocha a les (Slapy a Křivoklátsko), poukazuje na to, že jsou tyto hodnoty zatíženy faktory, které se na objekty projevují s podobnou intenzitou a že se nejedná o skutečnou změnu v odrazivosti. V podstatě to znamená, že když je v jedné lokalitě vysoká hodnota odrazivosti, v té druhé bude vysoká odrazivost pravděpodobně také. Na pravé straně příloh vyhrazené pro normalizované hodnoty, se vykreslené body koncentrují do jedné oblasti a již nepřipomínají žádný trend. U grafů napravo tak nemělo vytváření korelace smysl, protože by byla velmi nízká. Před normalizací v těchto grafech dosahovaly hodnoty spektrální odrazivosti ze senzoru OLI nižších hodnot, než hodnoty ze senzoru TM. Pro lokalitu Tuchoměřice by dokonce k oddělení všech hodnot ze senzoru OLI a TM stačilo použít prahovou hodnotu. Po normalizaci se již tyto rozdíly mezi senzorem OLI a TM neprojevovaly.

Na Obr. 13 jsou mozaiky z posledního snímku pořízeného senzorem TM a prvního snímku ze senzoru OLI v nepravých barvách (R: NIR; B: SWIR-1, G: SWIR-2). Mozaika nalevo je z nenormalizovaných snímků a mozaika napravo je ze snímků normalizovaných. Levou dolní část vyplňuje snímek LT05_L1TP_192025_20100912 a pravou horní část snímek LC08_L1TP_191025_20130727. Jak je vidět, u mozaiky z nenormalizovaných snímků oproti druhé mozaice téměř není poznat šev. Šev je nadále znatelný především u zemědělské půdy, která se nachází v pravém dolním a levém horním rohu.



4.4 Vliv pozice WRS-2 na hodnoty senzorů TM

V Tab. 20 jsou uvedeny průměrné hodnoty z časových řad jednotlivých lokalit rozdělených podle pozice WRS-2, ze které byly pořízeny. Hodnoty snímků z pozice 191-025 jsou v lesních lokalitách nenormalizovaných výběrů vždy vyšší než průměry z druhé pozice. Lokalita Josefův Důl má naopak kromě pásma modré a NIR vyšší hodnoty na pozici 192-025. Pokud budeme srovnávat rozdíly mezi průměrnými normalizovanými hodnotami rozdělených podle pozice WRS-2, pak z této tabulky zjistíme, že pro Josefův Důl neplatí vztah o podmíněném formátování z 3.4.2, protože po normalizaci jsou vždy vyšší, než jak tomu bylo u dat nenormalizovaných. Je také těžké říct, zda došlo k nějakému zhoršení/zlepšení v lokalitě Slapy, protože u některých pásem došlo k zmenšení rozdílů mezi pozicemi a u jiných ke zvětšení. Ve zbylých případech ale vztah z 3.4.2 vždy platí.

V Tab. 21 jsou mediány hodnot časových řad vybraných lokalit rozdělených podle pozic, z jakých byly snímky pořízeny. Nadále je vidět, že v původních časových řadách mají lesní i vodní lokality na pozici 191-025 mediány většinou vyšší, než jsou mediány hodnot z pozice 192-025. Výjimkou je pásmo SWIR-2 u vodních lokalit a pásmo SWIR-1 u lokality Josefův Důl. Normalizací se rozdíl mezi pozicemi 191-025 a 192-025 většinou zmenšil. To neplatí o lokalitě Josefův Důl, kde se rozdíl mediánů mezi pozicemi vždy zvýšil.

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	191	328,7	197,6	366,7	216,5	321,5	187,7	295,6	156,7	308,2	173,1
	192	280,5	188,2	308,5	215,9	271,5	181,1	270,8	194,5	269,4	174,5
Zelená	191	443,9	322,6	481,2	346,2	435,6	312,5	322,9	198,7	355,4	235,3
	192	401,2	312,8	428,5	344,3	392,5	307,5	324,7	249,3	335,7	247,6
Červená	191	331,7	241,9	377,6	276,3	318,3	224,3	231,7	131,6	254,7	158,8
	192	313,4	233,6	346,8	273,7	297,5	220,4	248,0	181,2	250,6	167,0
NIR	191	2059,0	1778,7	2321,8	2021,3	2076,8	1819,1	365,1	189,3	422,6	239,3
	192	1847,6	1739,5	2061,1	1969,0	1874,1	1813,5	342,0	244,2	373,5	245,4
SWIR-1	191	849,5	743,4	1113,8	1006,2	889,7	789,0	120,5	123,4	96,9	63,7
	192	762,4	738,5	999,1	993,1	785,1	775,2	122,5	95,3	102,4	80,7
SWIR-2	191	348,9	295,4	464,3	409,6	369,5	316,3	83,9	56,6	51,7	30,9
	192	313,7	299,9	405,7	401,0	319,4	310,8	95,5	76,3	59,6	46,2

Tab. 20 Průměrné hodnoty pro jednotlivé pozice
(Zdroj: vlastní tvorba)

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	191	293,3	183,6	336,3	210,3	303,3	187,3	280,3	143,5	272,4	156,6
	192	263,0	182,5	277,5	211,7	252,2	181,1	260,9	187,5	234,2	165,0
Zelená	191	412,2	311,8	447,9	334,9	416,3	307,9	320,1	199,5	311,0	218,0
	192	374,8	316,3	407,6	343,2	385,0	307,3	308,4	233,2	327,7	241,4
Červená	191	329,7	230,5	355,4	266,9	294,6	218,9	238,7	108,6	224,6	142,1
	192	289,2	228,0	323,5	269,8	291,6	224,4	218,0	174,3	234,0	155,2
NIR	191	2147,4	1760,3	2405,2	2015,6	2121,1	1826,2	349,6	139,1	392,0	215,7
	192	1812,6	1742,2	2037,4	1967,4	1869,0	1831,2	287,7	232,8	319,7	252,3
SWIR-1	191	874,8	736,9	1126,8	1006,5	887,4	790,4	92,7	49,3	81,3	65,7
	192	763,3	738,4	988,3	998,1	770,9	781,4	94,4	90,9	68,3	66,5
SWIR-2	191	347,2	290,0	463,0	410,7	362,3	313,2	58,2	21,9	45,6	33,8
	192	305,9	296,9	409,4	399,9	322,8	310,3	81,1	59,1	46,9	33,7

Tab. 21 Mediány pro jednotlivé pozice
(Zdroj: vlastní tvorba)

Směrodatné odchyly z Tab. 22 jsou u původních hodnot z pozice 191-025 téměř vždy vyšší než jim odpovídající směrodatné odchyly z pozice 192-025. Výjimkou jsou směrodatné odchyly 192-025 pásem SWIR-1 a SWIR-2 v lokalitě Slapy, ty jsou jako jediné nižší než směrodatné odchyly pro stejná pásma z pozice 191-025. Po normalizaci jsou si odpovídající směrodatné odchyly většinou podobnější, než jak tomu bylo u nenormalizovaných hodnot. Opět zde platí, že Josefův Důl má nejvíce směrodatných odchylek, které nesplňují vztah z 3.4.2.

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	191	104,2	34,8	115,9	33,1	90,8	24,0	154,1	86,1	115,6	57,9
	192	77,7	30,9	79,3	31,2	66,9	19,5	108,8	84,0	105,1	54,9
Zelená	191	104,3	40,9	104,1	36,6	83,8	24,1	164,2	106,5	115,2	78,8
	192	76,3	34,3	69,0	27,3	62,6	19,0	130,6	97,0	106,2	71,3
Červená	191	84,4	35,6	88,9	40,9	70,7	21,1	117,0	90,0	97,5	67,5
	192	71,2	33,6	69,1	32,8	59,0	20,6	105,6	91,3	97,4	71,9
NIR	191	246,2	71,5	258,1	69,0	184,2	61,6	175,7	189,1	168,6	122,8
	192	201,2	57,8	231,8	49,0	157,7	72,8	137,8	134,5	137,0	103,5
SWIR-1	191	116,3	35,2	96,0	27,9	98,2	29,7	134,1	213,1	52,3	44,2
	192	97,5	31,6	93,7	33,3	81,8	38,9	83,8	53,0	76,7	48,5
SWIR-2	191	56,7	26,1	49,7	24,9	53,7	17,2	113,4	143,8	28,5	17,7
	192	47,2	27,1	38,1	23,2	36,6	17,3	70,1	54,7	56,2	42,7

Tab. 22 Směrodatné odchylky pro jednotlivé pozice
(Zdroj: vlastní tvorba)

V Tab. 23 jsou p-hodnoty z Mann-Whitneyova testu, porovnávající symetrie hodnot časových řad rozdělených podle pozice WRS-2 v rámci jednoho pásma. Je vidět, že v pásmech infračerveného záření jsou mezi původními hodnotami z jednotlivých pozic statisticky významné rozdíly. Naopak u vodních lokalit se zdá, že rozdílné pozice WRS-2 žádné rozdíly v datech nevytvářejí. U testů s normalizovanými výběry je vidět, že p-hodnoty Mann-Whitneyova testu jsou většinou mnohem vyšší, než jak tomu bylo u těchto hodnot pro nenormalizovaná data. V případech, kdy se p-hodnoty snížily (zejména u vodních lokalit) je nutné si uvědomit, že se jedná o poměrně vysoké p-hodnoty, které by stačily k prokázání nulové hypotézy vyjma pásma SWIR-2 u lokality Josefův Důl.

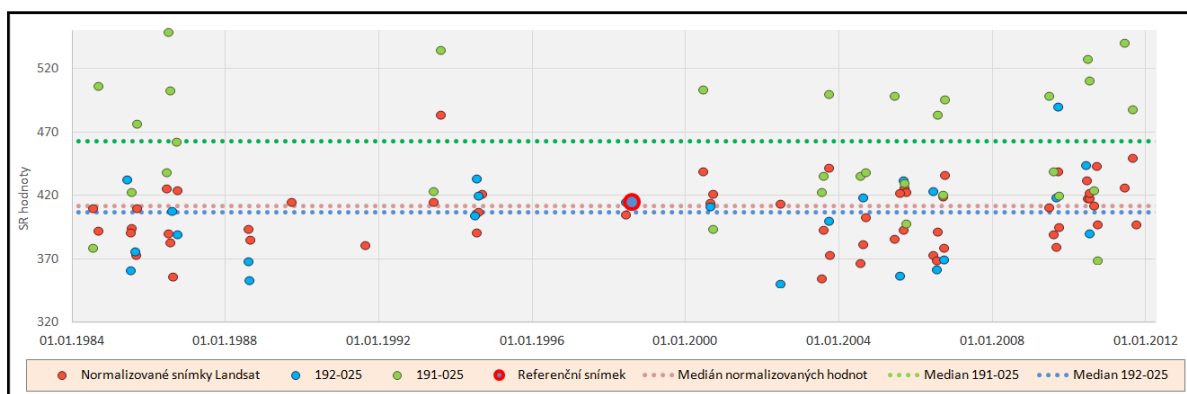
		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá		0,04	0,31	0,04	0,92	0,02	0,45	0,83	0,10	0,12	0,87
Zelená		0,11	0,53	0,04	0,72	0,05	0,73	0,81	0,12	0,55	0,42
Červená		0,46	0,34	0,14	0,91	0,30	0,71	0,67	0,03	0,78	0,68
NIR		1.E-03	0,13	2.E-04	1.E-03	2.E-04	0,85	0,79	0,07	0,25	0,85
SWIR-1		0,01	0,85	2.E-04	0,27	3.E-04	0,35	0,52	0,17	0,49	0,38
SWIR-2		0,03	0,27	1.E-05	0,22	4.E-04	0,35	0,28	1.E-03	0,62	0,53

Tab. 23 Mann-Whitneyův test porovnávající skupiny dat rozdělených podle pozice
(Zdroj: vlastní tvorba)

V Boxplotech D a E přílohy 4 se porovnávají krabicové diagramy pro hodnoty odrazivosti z pozic WRS-2: 191-025 a 192-025. Na levé straně jsou grafy s diagramy nenormalizovaných hodnot a napravo jsou grafy s diagramy pro normalizované hodnoty. Boxploty D se týkají lesního porostu v lokalitě Kokořínský důl. Jak je vidět hodnoty z pozice 191-025, tedy západní části snímků, jsou vyšší/světlejší, než hodnoty z východních částí snímků, tedy z pozice 192-025. Zejména to platí pro infračervené záření. Naopak u lokality Josefův důl v boxplotech E se nedá rozeznat mezi těmito

dvěma pozicemi u původních dat žádný rozdíl stejně jako v Tab. 23, ale normalizaci se je vidět, že v infračervených pásmech začaly pro změnu být vyšší hodnoty z pozice 192. Takže zde naopak vliv WRS-2 zesílil.

Na Obr. 14 je vidět časová řada pásma SWIR-2 senzoru TM v lokalitě Tuchoměřice. Modrou barvou jsou zaznamenány hodnoty, které byly naměřeny z pozice 192-025. Jak je vidět, tyto hodnoty a modrá přímka představující medián těchto hodnot bývají obvykle výše než zelené body, představující hodnoty z pozice 191-025. Hodnoty ze západních částí snímků jsou tak tedy vyšší a z východních částí snímků jsou naopak nižší. Hodnoty po normalizaci, které mají červenou barvu působí, jako by byly naměřeny pouze pro pozice 192-025, což je i pozice, ze které byl pořízen referenční snímek.



Obr. 14 Časová řada SR hodnot pásma SWIR-2 v lokalitě Tuchoměřice
(Zdroj: vlastní tvorba)

4.5 Vliv stáří snímků na časovou řadu ze senzoru TM

V Tab. 24 jsou průměrné hodnoty výběrů ze snímků Landsat 5 rozdělené podle toho, zda byly pořízeny před rokem 1994, nebo po roce 1998. Průměrné hodnoty ze starších snímků vychází ve viditelné části elektromagnetického spektra s vyššími hodnotami, než průměry u snímků novějších. U infračervených pásem se toto již říct nedá, protože přibližně jen polovina starších hodnot má vyšší průměry než jsou hodnoty novější. Normalizované řady jsou si často mnohem podobnější, než jak tomu bylo u nenormalizovaných dat. Rozdíly mezi průměry z obou výběrů v rámci jednotlivých pásem, které jsou vyšší, než ve sloupcích pro původní SR Level-2 hodnoty, mají zvýrazněná pole růžovou barvou, pokud neplatil vztah z podkapitoly 3.4.2. Jedná se zejména o hodnoty SWIR-1 a SWIR-2.

V Tab. 25 jsou vidět mediány výběrů, rozdělených podle toho, v jakém období byly pořizovány. I zde platí, že si jsou jednotlivé mediány pro určitou lokalitu a pásmo většinou podobnější po normalizaci (menší rozdíly, platí tedy vztah z podkapitoly 3.4.2), než jak tomu bylo u nenormalizovaných dat. Vztah neplatí v některých případech u infračervených pásem.

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	84-94	382,0	205,1	408,2	215,6	353,5	186,8	409,3	215,7	365,7	188,9
	98-11	263,0	186,4	306,6	216,6	268,1	183,6	228,5	150,6	247,2	165,0
Zelená	84-94	499,8	334,2	522,5	345,6	470,6	313,2	461,9	289,8	418,3	261,5
	98-11	380,8	308,8	424,8	345,3	385,3	308,6	259,0	184,8	305,7	230,0
Červená	84-94	387,9	251,2	411,4	269,6	353,5	224,8	312,3	172,8	313,5	177,8
	98-11	286,8	230,6	339,7	278,0	283,3	221,3	203,3	140,5	219,0	154,4
NIR	84-94	1924,8	1759,0	2203,1	2015,8	1946,5	1802,8	413,0	202,4	501,5	290,3
	98-11	1975,0	1760,3	2208,8	1989,3	2012,1	1824,7	329,7	217,1	341,9	214,1
SWIR-1	84-94	788,4	737,8	1050,4	994,0	851,4	800,6	120,7	95,9	127,2	84,8
	98-11	818,1	742,8	1069,9	1003,7	839,4	772,7	121,6	114,2	84,2	64,7
SWIR-2	84-94	328,6	294,1	440,3	402,7	355,0	318,6	77,2	50,0	68,2	39,5
	98-11	333,8	299,5	437,6	407,4	343,1	311,1	93,6	72,7	48,0	41,5

Tab. 24 Průměrné hodnoty pro jednotlivé časové úseky
(Zdroj: vlastní tvorba)

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	84-94	365,6	200,3	401,5	209,8	335,0	187,8	366,3	192,3	380,9	170,4
	98-11	248,3	182,1	282,9	212,7	259,4	182,1	211,4	117,3	235,5	150,4
Zelená	84-94	508,9	330,8	500,8	340,2	459,2	309,0	411,4	254,0	425,7	253,7
	98-11	370,4	307,5	407,7	344,1	378,9	304,3	227,4	158,7	301,3	204,4
Červená	84-94	386,7	245,0	414,6	266,1	346,8	224,5	281,0	139,7	325,0	157,3
	98-11	280,1	228,1	321,4	270,5	280,8	218,5	192,2	105,8	205,3	140,9
NIR	84-94	1902,4	1760,5	2132,1	2012,5	1927,6	1811,9	397,0	211,0	509,1	291,2
	98-11	2002,6	1754,1	2145,7	1991,3	1950,9	1835,3	283,3	141,8	309,3	192,5
SWIR-1	84-94	788,4	731,8	1039,8	994,3	854,9	801,4	116,8	96,4	105,7	75,6
	98-11	807,1	741,2	1076,9	1009,4	835,9	771,3	75,6	49,4	67,8	62,8
SWIR-2	84-94	330,3	291,0	428,2	394,7	343,6	316,7	68,1	40,2	60,3	34,8
	98-11	320,3	297,1	424,4	412,6	331,5	307,6	52,4	27,2	39,7	33,2

Tab. 25 Mediány pro jednotlivé časové úseky
(Zdroj: vlastní tvorba)

I u směrodatných odchylek z Tab. 26 dosahují starší původní časové řady vyšších hodnot ve viditelné části elektromagnetického spektra, než časové řady vzniklé po roce 1998. Po normalizaci se velikost směrodatné odchylky většinou snížila, ale co je hlavní, většinou se zmenšil rozdíl mezi časovými řadami 84-94 a 98-11. Větší rozdíly se objevily ve většině případů u pásem SWIR-1 a 2. U lokality Josefův Důl došlo ke zvětšení rozdílů po normalizaci také u pásem červené a NIR.

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	84-94	105,7	39,0	108,3	35,4	95,4	25,5	138,7	70,5	119,3	59,7
	98-11	54,0	27,6	85,4	30,6	58,4	20,2	94,4	86,6	81,9	52,7
Zelená	84-94	99,9	41,0	98,6	34,7	84,5	24,8	133,1	83,6	110,0	65,3
	98-11	57,0	33,2	71,9	31,9	53,3	20,2	112,0	98,3	89,7	78,4
Červená	84-94	78,5	43,3	87,9	46,3	61,3	23,7	100,7	76,7	95,6	70,1
	98-11	51,0	26,5	67,1	31,8	54,9	19,1	101,1	98,9	80,7	68,2
NIR	84-94	255,9	71,4	303,8	84,9	202,2	68,9	146,6	102,5	165,5	108,8
	98-11	243,5	66,2	265,0	52,1	195,0	64,1	162,8	196,9	116,6	106,7
SWIR-1	84-94	107,2	30,5	123,3	36,6	96,4	19,1	45,8	39,8	63,6	50,4
	98-11	119,4	35,1	103,1	27,2	109,6	37,6	138,5	181,6	61,0	43,0
SWIR-2	84-94	53,2	29,0	59,3	25,7	52,4	15,4	31,4	40,5	39,6	32,7
	98-11	56,2	25,1	50,3	23,8	53,1	17,9	117,7	132,6	45,1	39,4

Tab. 26 Směrodatné odchylky pro jednotlivé časové úseky
(Zdroj: vlastní tvorba)

Z Tab. 27 se dá velmi jednoduše vypočítat, že zatímco pro viditelnou část elektromagnetického spektra původních hodnot jsou mezi oběma časovými intervaly významné rozdíly, tak v infračerveném pásmu tento rozdíl nebyl většinou prokázán. Po normalizaci sice již nejsou mezi časovými úseky takové rozdíly ve viditelné části elektromagnetického spektra, ale na druhou stranu došlo ve víc než polovině případů ke snížení p-hodnoty v infračervené části spektra. Nicméně opravdu nízkých hodnot (menších než 0,05) se dosáhlo pouze u Křivoklátska v pásmech SWIR-1 a 2.

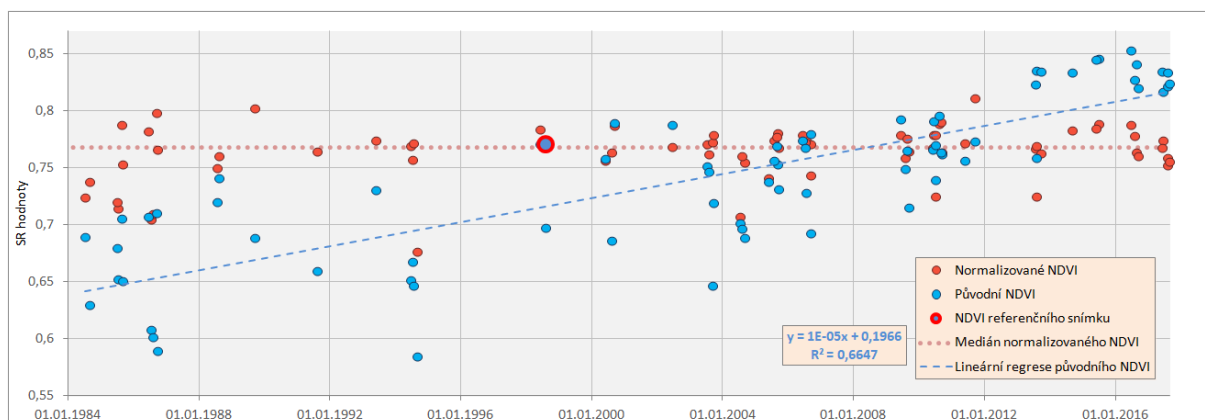
		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá		2.E-05	0,08	4.E-04	0,89	2.E-04	3.E-04	1.E-05	0,51	3.E-04	0,40
Zelená		3.E-05	0,81	2.E-04	0,89	1.E-04	0,07	3.E-06	0,29	4.E-04	0,94
Červená		2.E-05	0,74	5.E-04	0,52	2.E-04	0,06	6.E-04	0,50	4.E-04	0,78
NIR		0,81	0,13	0,91	0,85	0,25	0,74	0,05	0,80	3.E-04	0,03
SWIR-1		0,39	4.E-05	0,50	0,39	0,57	0,06	0,14	0,63	7.E-04	0,32
SWIR-2		0,83	6.E-04	0,92	0,09	0,39	0,15	0,45	0,70	0,01	0,55

Tab. 27 Mann-Whitneyův test srovnávající symetrii hodnot z obou časových úseků
(Zdroj: vlastní tvorba)

Boxploty F a G v příloze 4 obsahují grafy s krabicovými diagramy, kde jsou SR hodnoty pro lokality Křivoklátsko a Slapy rozděleny podle období, kdy byly pořízeny. Vizuální rozdíl mezi grafy nenormalizovaných výběrů v Boxplotech F je vidět zejména ve viditelné části elektromagnetického spektra. Naopak boxploty infračervených pásem rozdělených podle stáří snímku se mezi sebou zásadně neliší. Starší snímky mají ve viditelném spektru výše umístěné kvartily, než snímky mladší. Po normalizaci se zdá, že nadále jsou kvartily starších hodnot umístěny výše a mají stále větší rozptyl, ale překrývají se lépe v rámci jednoho pásma. Při pohledu do Boxplotů G se zdá, že starší hodnoty dosahovaly u této lokality vyšších hodnot i pro infračervenou

část elektromagnetického spektra (to je vidět i v Tab. 27). Každopádně u viditelné části elektromagnetického spektra jsou vidět větší rozdíly mezi obdobími, ve kterých byly snímky pořízeny.

Na Obr. 15 je možno vidět časovou řadu NDVI z lokality Křivoklátsko. Jako modré body jsou znázorněny NDVI vypočítané z původních SR Level-2 dat a červenými body NDVI vypočítané z normalizovaných hodnot odrazivosti. Dále je v grafu znázorněná lineární regrese pro nenormalizované NDVI a to modrou čárkovanou čarou. Červenou tečkovanou čarou je zase znázorněn medián normalizovaných hodnot. Jak je vidět ze směrnice trendu, před normalizací mělo NDVI rostoucí charakter, který po normalizaci zanikl a drží se kolem hodnoty 0,77. Za nárůstem NDVI u nenormalizovaných dat může stát pokles citlivosti senzoru TM na červené světlo, zatímco citlivost na blízké infračervené záření se v průběhu času neměnila natolik výrazně.



Obr. 15 Časová řada normalizovaných a nenormalizovaných hodnot NDVI v lokalitě Křivoklátsko (Zdroj: vlastní tvorba)

4.6 Vliv kombinace pozice WRS-2 a stáří senzoru TM

V tabulce A přílohy 3 jsou uvedené průměrné hodnoty výběrů časových řad rozdělených podle pásem, lokalit WRS-2 a období, kdy byly pořízeny pro jednotlivé lokality. Zároveň bylo pro původní časové řady zjišťováno pořadí z hlediska velikosti průměrů těchto hodnot v rámci jednoho pásma a lokality (největší = 1., nejmenší = 4.). Ve viditelné části spektra dosahovaly v průměru nejvyšších hodnot snímky pořízené z časového období 1984-1994. Při porovnání pozic v rámci jednotlivých časových úseků dosahují vyšších hodnot snímky z pozice 191-025, takže výběr 191_old má ve všech případech pořadí 1. Nejmenších hodnot dosahovaly snímky z pozice 192-025 a z období 1998-2011 s výjimkou Josefova Dolu, kde nejmenší hodnoty byly získány z pozice 191-025 a z období 1998-2011. Na základě výše zmíněných faktů je vidět, že se vliv stáří snímků projevuje ve viditelné části elektromagnetického spektra více než pozice WRS-2, ale zároveň jsou oba faktory pozorovatelné. U vodních lokalit vychází ještě pásmo NIR podobně jako u viditelné části spektra (191_old = 1., 192_new 4.), ale u pásma SWIR se již žádný trend v tom, která kombinace faktorů způsobí nejvyšší hodnoty a která nejmenší, rozeznat nedá. Viditelný vliv je pouze u pozice WRS-2 nezávisle na stáří snímku a to u lesních lokalit. Pozice 191-025 dosahuje v infračerveném pásmu vždy vyšších hodnot, než pozice 192-025. Po normalizaci se rozptýlily tyto časové řady pro jednotlivé lokality a pásma snížil oproti stavu před normalizací s jedinou výjimkou infračervených pásma v lokalitě Josefův Důl (podmínka z podkapitoly 3.4.3). Z tohoto důvodu jsou tyto hodnoty zvýrazněny růžovým polem. Je

nicméně třeba vzít v potaz, že v rámci těchto pásem bylo pro Josefův Důl jen velmi málo pozorování, protože jich celá řada byla vyřazena vzhledem k tomu, že se jednalo o záporné hodnoty.

U mediánů z tabulky B přílohy 3 vychází víceméně ta samá pořadí výběrů, která vyšla v tabulce A přílohy 3. Opět platí, že u lesních lokalit nerozhoduje o pořadí mediánů VIS pásem stáří snímku natolik jako pozice WRS-2. Naopak u infračervených pásem má vliv především pozice WRS-2. U vodních lokalit se pro infračervená pásma nedá stanovit nějaký trend. Výsledek normalizovaných hodnot je podobný tomu z tabulky A přílohy 3 s tím rozdílem, že pásmo NIR dosáhlo u Josefova Dolu nižšího rozptylu, než tomu bylo u rozptylu původních hodnot. Na rozdíl od původních SR Level-2 hodnot se zde již nedá jednoznačně určit, která kombinace dosahuje nejvyšších mediánů a která nejnižších.

Také směrodatné odchylky z tabulky C přílohy 3 připomínají trendy, které jsou vidět v tabulkách A a B přílohy 3, přestože se pořadí některých výběrů mírně liší. Například u lokality Kokořínský Důl nedosahuje nejvyšších hodnot pozice 191-025 pořízená do roku 1994, ale pozice 191-025 pořízená od roku 1998 (výběr 191_new). Z hlediska rozptylu normalizovaných hodnot (podmínka z podkapitoly 3.4.3) v rámci jednotlivých pásem u různých lokalit tabulka C víceméně odpovídá trendům z tabulek A a B přílohy 3 s tím rozdílem, že jednotlivé směrodatné odchylky u Křivoklátska dosahují vyššího rozptylu u pásma SWIR-2, než tomu bylo u nenormalizovaných dat.

V Tab. 28 jsou vidět p-hodnoty Kruskal-Wallisových testů, kde se zkoumaly rozdíly v symetrii výběrů dat, rozdělených podle pozice a období v rámci jedné lokality a jednoho pásma. Nejprůkaznější rozdíly byly v původních datech zaznamenány ve viditelné části elektromagnetického spektra, ale i některá porovnání v rámci infračerveného pásma vyšla velmi odlišná. Relativně málo odlišné vyšlo v infračerveném pásmu porovnání pro Křivoklátsko a Josefův Důl. Při porovnávání jednotlivých kombinací Kruskal-Wallisovým testem po normalizaci dochází většinou ke zlepšení, tedy k menší průkaznosti rozdílů mezi jednotlivými kombinacemi, než jak tomu bylo u nenormalizovaných dat.

	Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm	Orig	Norm
Modrá	5.E-05	0,14	4.E-04	1,00	1.E-04	0,62	7.E-04	0,01	7.E-04	0,42
Zelená	8.E-05	0,06	2.E-04	0,99	8.E-05	0,21	2.E-04	8.E-04	4.E-03	0,19
Červená	2.E-04	0,35	2.E-03	0,66	5.E-04	0,48	3.E-03	0,02	0,01	0,56
NIR	0,01	0,30	1.E-03	8.E-04	2.E-03	0,39	0,08	0,30	1.E-03	0,17
SWIR-1	0,06	0,73	6.E-04	0,09	2.E-03	2.E-03	0,24	0,21	5.E-03	0,53
SWIR-2	0,18	0,44	7.E-05	0,47	3.E-03	0,11	0,44	0,01	0,06	0,67

Tab. 28 Kruskal-Wallisův test srovnávající jednotlivé kombinace
(Zdroj: vlastní tvorba)

V Boxplotech H a CH přílohy 4 jsou vidět grafy, ve kterých se mezi sebou porovnávají krabicové diagramy hodnot TM rozdělených podle pozice WRS-2 a období, ke kterým se dané hodnoty vztahují pro jednotlivá pásma. Na levé straně jsou grafy pro nenormalizované hodnoty, napravo jsou krabicové grafy normalizovaných hodnot. V Boxplotech H, které se týkají lokality Tuchoměřice, je vidět, že nejvyšších hodnot dosahuje nenormalizovaná odrazivost u snímků

pořízených mezi lety 1984-1994 z pozice 191-025. Určit, která kombinace dosahuje naopak nejnižší hodnotu, je již komplikovanější. Pro hodnoty viditelného spektra to jsou data z pozic 192-025 pořízených po roce 1998, mezi které spadá i referenční snímek, který byl použit k normalizaci. U infračervené části elektromagnetického spektra dosahují nejvyšších hodnot sice také data z pozice 192-025, ale pořízená mezi lety 1984-1994. V Boxplotech CH pro Josefův Důl je vidět, že odrazivost bývá opět nejvyšší pro starší data pořízená z pozice 191-025. To nicméně platí jen od prvního po čtvrté pásmo, u pásem krátkovlnného infračerveného záření už data z tohoto výběru nejvyšších hodnot nedosahují. Pozice WRS-2 nemá pro infračervená pásma již příliš velký dopad na naměřenou hodnotu.

To, jak se projevují jednotlivé jevy, negativně ovlivňující časovou řadu dat TM, je vidět v příloze 6. Na ose x jsou SR hodnoty z jedné lokality a na ose y SR hodnoty z druhé lokality. Vykreslené body tak představují SR hodnoty pro obě lokality v jedné scéně. Grafy na levé straně přílohy mají vybarvené body podle toho, kdy byla scéna, kterou tyto body představují, pořízena. Na pravé straně jsou jednotlivé body rozděleny podle toho, v jaké pozici WRS-2 byly pořízeny. Zelenou je vykreslena do grafů lineární regrese celé řady z Landsatu 5, zelenou barvou je uveden i jí odpovídající Pearsonův korelační koeficient. Modrou a červenou jsou vyvedeny grafy a koeficienty pro WRS-2 191-025 a 192-025. První dvojice grafů nahoře je pro pásmo modré a je vidět jeho korelace pro Křivoklátsko a Slapy. Jak je znát z levého grafu, novější snímky mají tendenci nacházet se více vlevo dole, naopak starší snímky jsou často vpravo nahoře (tedy, když je naměřená vysoká hodnota v jedné lokalitě, pravděpodobně bude vysoká hodnota i v druhé lokalitě). Silnější korelace tyto hodnoty dosahují, pokud je rozdělíme podle pozice WRS-2. U pásma zelené pro grafy v prostřední části snímků se zdá, že pozice WRS-2 již nemá takový vliv na hodnoty, ale vliv stárnutí se dá v datech nadále vyzorovat. U pásma SWIR-2 se již moc vliv stárnutí nedá na hodnoty vyzorovat, ale zato vliv pozice se zdá být jasný. Pokud bychom v tomto případě použili prahovou hodnotu 100, tak bychom od sebe oddělili většinu hodnot z pozice 192-025 od hodnot 191-025.

5 Diskuze

Zajímavou informací, zjištěnou v této práci a vizualizovanou v příloze 5 a 6, je to, že hodnoty odrazivosti v jedné lokalitě pro jedno pásmo jsou velmi často korelované s hodnotami odrazivosti toho samého pásma v rámci jiné lokality. Korelací se v tomto případě myslí to, že když se v jedné lokalitě vypočítá vysoká hodnota odrazivosti, pravděpodobně na jiné invariantní lokalitě v rámci stejné scény se také naměří vysoká hodnota. Síla korelace opravdu napovídá tomu, že hodnoty jsou ovlivněné stejnými jevy. To by se zdálo být logické u lokalit stejného typu, které by se teoreticky mohly nacházet ve stejné fenofázi a obdobně reagovat na stejné vnější podmínky. Relativně silné korelace byly ale zjištěny i mezi velmi odlišnými povrchy, kterými jsou lesní povrchy a voda. Pokud data z lokalit, která jsou od sebe poměrně vzdálená, korelují, znamená to, že jevy, které negativně působí na časové řady dat Landsat, se projevují na velkých rozlohách (možná některé i na rozloze celého snímku), se stejnou, nebo podobnou intenzitou. Může se tedy jednat o jevy, které by mělo být možné opravit relativní normalizací, která by byla invariantní vůči poloze v rámci snímku (všechny pixely ve snímku by byly opraveny pomocí stejného vztahu). V rámci výše zmíněných příloh bylo vizualizováno, jak se na těchto korelacích podepisují jevy, které negativně ovlivňují časové řady. Tedy, že novější snímky ze senzoru TM mají v rámci viditelné části elektromagnetického spektra nižší naměřené hodnoty, že hodnoty z pozice WRS-2 191-025 jsou vyšší než z pozice 192-025 a že je rozdíl mezi daty ze senzoru TM a OLI. Nicméně z dosažených výsledků se nezdá, že by tyto jevy spolehlivě vysvětlily veškerou korelaci mezi lokalitami. Zdá se tedy, že by mohly existovat i jiné jevy, které hodnoty snímků ovlivňují, nesouvisí s vlastnostmi povrchu a nejsou správně zohledněny v atmosférických korekcích pro Landsat data. Nabízí se třeba faktory, které sice jsou zahrnuté v atmosférických korekcích, ale přesto nemusí být zcela správně ošetřeny. Teoreticky by to mohla být teplota, vlhkost a jiné atmosférické jevy, jejichž vliv by bylo také vhodné zkoumat v budoucích studiích, jak se projevují v datech a jak se je normalizací povedlo opravit.

Vzhledem k tomu, že jako referenční snímek byl použit snímek ze senzoru TM, byly snímky ze senzoru OLI v podstatě převedeny na produkt SR Level-2 TM. Mohlo by být zajímavé zkusit obdobným způsobem převést data z určitých senzorů na data porovnatelná s jinými senzory. O něco podobného se pokoušel GAN et. al. (2014), který kombinoval spektrální indexy vypočítané z dat ETM+ a MODIS. Tato práce nicméně normalizovala snímky ze stejného měsíce a neočekávala žádné výrazné změny ve scéně, takže pro nalezení vztahu nebylo třeba hledat jen neměnné body, ale jako s neměnnými body šlo počítat téměř se všemi pixely, které byly dostatečně homogenní. Oproti tomu metoda normalizace použitá v této diplomové práci by si měla poradit i s daty, která se temporálně neshodují, protože součástí algoritmu je nalezení potenciálně neměnných pixelů a právě podle těch se následně normalizuje. Otázkou je, jestli by v takovém případě bylo možné nalézt neměnné pixely vzhledem k nízkému rozlišení dat MODIS. Data by samozřejmě musela být převzorkována do stejného gridu. Další možností, jak zpracovávat multisenzorová data je Cross-Calibration, kterou popisuje například CHANDER et al. (2005), nebo TEILLET et al. (2001). Tato metoda umožňuje nalézt takový Gain a Bias pro data, aby po jejich aplikaci na DN hodnoty byly hodnoty spektrální záře srovnatelné. K získání spektrální odrazivosti povrchu je následně možné na oba snímky aplikovat stejný algoritmus atmosférické korekce. Hlavní výhodou oproti metodě v této práci je možnost používat získaný Gain a Bias na všechny snímky stejného senzoru, které jinak nemusí nijak souviset s původní dvojicí snímků. Na druhou stranu relativní normalizace je značně

jednodušší na aplikaci vzhledem k dostupnému softwaru a možnosti zpracovávat rovnou data spektrální odrazivosti.

To, že se objevilo po normalizaci značné množství záporných hodnot v infračerveném pásmu u vodních lokalit, může znamenat určitý nedostatek, protože záporné hodnoty odrazivosti představují jednoznačnou chybu. Na druhou stranu u vodních povrchů je odrazivost těchto pásem vždy velmi nízká až blízká nule a tato pásma tak mají spíše vypovídající hodnotu pro vegetaci, než pro vodu. Je tedy otázka zda tyto záporné hodnoty vůbec brát jako problém vzhledem nízkému užití SWIR pásem při zkoumání stavu vodních povrchů. Pravděpodobným důvodem proč vyšlo tolik hodnot vyloženě chybných, je to, že byl vybrán poměrně tmavý referenční snímek pro normalizaci. V následujících pracích by tedy mohlo být dobré zaměřit se i na význam výběru referenčního snímku. V literatuře, například FURBY, CAMPBELL (2001), se uvádí pouze, že vhodný referenční snímek by měl být pokud možno bez oblačnosti a vybere se přibližně uprostřed časové řady. To, že se jedná o tmavý referenční snímek, je možné pozorovat na většině příloh, jako jsou boxploty v příloze 4 (červená tečka představuje hodnotu z referenčního snímku), nebo je to vidět i na hodnotě z referenčního snímku v příloze 2. Už tak nízké hodnoty infračervených pásem na vodních površích byly normalizací podle tohoto snímku zmenšeny, až dosáhly záporných hodnot. Do budoucna by tak při normalizování časové řady ležící na průniku dvou pozic WRS-2 mohlo být vhodnější vybrat jako referenční snímek ten, ve kterém bude zájmová oblast ležet v západní části této pozice, protože jak se ukazuje, tato část je světlejší než východní části snímků. V případě mé časové řady by to znamenalo použít snímek z pozice 191-025. Dalším vlivem, který se nejspíše podepsal zejména na výsledcích lokality Josefův Důl, bylo to, že na rozdíl od stáří snímku nebo typu senzoru, je vliv pozice WRS-2 variabilní v prostoru. Je to dáno různou vzdáleností lokalit od středu snímku, ze kterého se používají údaje pro korekce LEDAPS i LaSrc. Ze středu snímku se totiž bere informace o výšce slunce nad obzorem a jeho azimutu, které vstupují do korekcí dat Landsat (USGS 2019 a). Výška slunce a jeho azimut je ale v rámci snímku variabilní. Z toho plyne rozdíl mezi východní a západní částí snímku a z logiky věci i rozdíl mezi dvěma překrývajícími se pozicemi WRS-2. To z části osvětluje, proč z hlediska velkého množství parametrů dopadla zrovna lokalita Josefův Důl nejhůře. Tato lokalita totiž ležela nejdále od oblasti, ze které se vybíraly invariantní body. Vliv pozice WRS-2 tak byl kompenzován na základě dat z oblasti ležící daleko od Josefova Dolu. Aplikací normalizace na základě těchto prvků se mohl vliv pozice WRS-2 na výslednou hodnotu snímku tedy zvýraznit místo toho, aby byl znormalizován. Pro vzdálenější lokality, ležící nejdále od oblasti, kde se vybírají invariantní body, se taková normalizace zdá být nevhodnou. Je otázkou, co se s tím dá dělat. Vhodnou možností se logicky nabízí vybrat takovou oblast pro hledání invariantních bodů, která by zahrnovala veškeré zájmové lokality.

Je zajímavé, že vzhledem k tomu, že stárnutí a s ním související degradace senzoru byla již pro produkty (L1T) ze senzoru TM Landsatu 5 řešena (například: CHANDER, 2005; CHANDER, 2007). Podle výsledků této práce se nadále projevuje poklesem hodnot v pásmech modré, zelené a červené. Tomu, že za poklesem měřených hodnot stojí stárnutí senzorů, nasvědčuje fakt, že degradace senzoru TM se projevovala zejména ve viditelné části elektromagnetického spektra a také to, že v analyzovaných datech této práce se pokles projevuje jak u vodních, tak lesních lokalit (viz příloha 6).

Faktory, které negativně ovlivňují časově řady družicových snímků odrazivosti (a jejich produktů) lze normalizovat i v rámci grafů odrazivosti (případně produktů odrazivosti jako je NDVI)

jednotlivých časových řad pro určitou lokalitu. Mezi takové metody patří například klouzavý průměr (využil například SETIAWAN, 2015; LIAO, 2017) nebo různé metody protínání trendů a interpolace (fourierovy řady použil STÖCKLI, 2004). Výhodou oproti metodě, která byla aplikována v této práci je to, že se jedná o nalezení křivky, která nejlépe odpovídá bodům v grafu a díky tomu se nemusí pracovat s celými snímky. Chyby, které se mohou projevovat jako statisticky náhodné, například vliv pozice WRS-2, pokud jsou použity snímky z více pozic WRS-2, jsou pravděpodobně dobře kompenzovány těmito metodami a získá se spojitá křivka vývoje. Naopak systematické (soustavné) chyby, mezi něž by mělo být zařazeno stárnutí senzorů, pokud se v datech projevuje, se těmito metodami neodstraní. Tyto metody se většinou dají použít pouze tam, kde se očekává vývoj, který se v rámci odrazivosti a jejích produktů chová spojitě (roční cykly u vegetace). To umožňuje určit předpokládanou hodnotu pro období, pro který není snímek, nebo které teprve nastane. Na druhou stranu změny povrchu, které proběhnou v jeden okamžik (v období mezi jednotlivými pozorováními, nikoliv v průběhu několika pozorování) by se měly projevit v datech náhle a nikoliv spojitě.

Další alternativou, jak vyřešit faktory negativně ovlivňující časové řady dat Landsat, může být pouze aplikování vlastních atmosférických korekcí na surová data Landsat. Takový postup navrhuje například HUGHES (2017). Nutno dodat, že užití metody DOS na L1T data v této práci nemohlo spolehlivě vyřešit problémy s rozdílnými úhly slunce a pozorovatele. Další nevýhodou bylo to, že metoda DOS nemohla dostatečně dobře zohlednit vnější faktory, které se na měření projeví lokálně (teplota, vlhkost), ale že všem konkrétním DN hodnotám přiřadila jednu hodnotu odrazivosti. Na druhou stranu by mohla použitá metodika spolehlivě vyřešit vliv stárnutí senzoru, pokud se opravdu na snímcích projevuje tak, jak naznačuje tato práce. Ve srovnání s tímto výzkumem mi nicméně aplikace relativních normalizací na L2 (atmosféricky korigovaná) data připadá méně náročná a i přesnější, protože SR data by měla být ošetřena o vnější vlivy, které se projevují lokálně.

Pokud se obdobné normalizace, nebo alespoň operace na podobném principu, rozšíří, bylo by zcela jistě dobré vyhodnocovat úspěšnost normalizací. Určitou cestu jsem ukázal v této práci. Nicméně je poměrně dost pracná a může být zatížena nevhodným výběrem bodů, na kterých se bude dokazovat přínos normalizace. Vhodnější metoda by podle mě měla vycházet z hodnot v rámci celého snímku a neměla by vycházet z manuálního výběru několika málo lokalit, u kterých může být zpochybněná jejich invariančnost.

6 Závěr

Především bylo v práci ukázáno, z jakých důvodů by měly být relativní normalizace a zejména metoda využívající IR-MAD prospěšné. Aplikací normalizace IR-MAD na časovou řadu snímků SR Level-2 pomocí referenčního snímku: LT05_L1TP_192025_19980810_20161223_01_T1, byl snížen rozptyl hodnot v časové řadě 81 snímků způsobený vnějšími faktory, které nejsou dostatečně dobře zohledněny v atmosférických korekcích a také jsou způsobeny kombinací dat ze dvou senzorů: OLI a TM. Znормalizování se projevilo zejména zmenšením směrodatné odchylky spektrální odrazivosti v pixelech neměnných lokalit a hodnoty spektrální odrazivosti v těchto pixelech pro různé snímky začaly více připomínat referenční snímek.

K normalizaci byl využit skript, který vznikl spojením dvou skriptů iMad a upraven tak, aby zvládal dávkové operace. Díky tomu bylo možné normalizaci celé časové řady shrnout do jednoho jediného kroku.

V první hypotéze této práce stojí, že relativními normalizacemi je možné získat z multisenzorových SR Level-2 dat vzájemně srovnatelnější produkt, ve kterém se již nebude projevovat to, který satelit snímal, ale že všechny snímky budou upraveny tak, jako by byly pořízeny stejným senzorem. To se prokázalo zejména díky tomu, že mezi daty ze senzoru TM a OLI existovaly statisticky významné rozdíly. Po normalizaci již mezi daty nebyl rozpoznán rozdíl.

Z hlediska druhé hypotézy byly rozeznány tyto vnější faktory, které mají vliv na data SR Level-2 a to pozice WRS-2 a stárnutí senzorů. Rozdíly v hodnotách určitých lokalit v závislosti na pozici WRS-2 jsou způsobené rozdílnou pozicí pozorovatele a slunce pro každou pozici. Tyto jevy by se měly projevovat zejména v oblastech blízko rovníku. V této práci byl nicméně zdokumentován i na datech ze střední Evropy vliv rozdílné pozice WRS-2 na hodnotu snímků. Normalizace metodou IR-MAD prokázala v tomto ohledu zlepšení dat, protože se hodnoty srovnaly tak, jako by byly pořízené ze stejné WRS-2, ze které byl pořízen referenční snímek.

Stárnutí senzorů se v datech projevuje poklesem hodnot v průběhu času. Tento pokles je znatelný pouze snímků z viditelné části spektra a má větší vliv, než pozice WRS-2. U ploch považovaných za neměnné se projevoval tento pokles trendem. Relativní normalizací tyto trendy v datech zanikly.

Vhodnost normalizace IR-MAD byla ověřována pomocí statistických testů. Na základě vnějších faktorů byla data neměnných lokalit rozdělována do výběrů, pokud mezi těmito výběry byl u statisticky významný rozdíl a po aplikování stejného testu na normalizovaná data již ne, tak byla metoda IR-MAD považována za úspěšnou.

7 Zdroje

- BAUMAN, P. R. (2011). LANDSAT TIME SERIES APPLICATION: THE COLUMBIA GLACIER, CANADA – 1985 TO 2010. *Pecora 18-Forty Years of Earth Observation...Understanding a Changing World*
- CANTY, M. J. (2014). *Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing : With Algorithms for ENVI/IDL and Python, Third edition*. CRC Press Inc, 576 s. ISBN: 1466570377
- CANTY, M. J., NIELSEN A. A. (2011). Linear and kernel methods for multivariate change detection. *Computers & Geosciences*, 38, s. 107-114.
- CANTY, M. J., NIELSEN, A. (2008). Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. *Remote Sensing of Environment*, 112, s. 1025-1036.
- CANTY, M. J., NIELSEN, A. A., & SCHMIDT, M. (2004). Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 91(3–4), s. 441–451.
- ČERVENÁ, L. (2012) *KLASIFIKACE VEGETAČNÍHO POKRYVU Z DAT DPZ PRO ÚČELY VYHODNOCENÍ RIZIKA NÁKAZY KLIŠŤOVOU ENCEFALITIDOU*. Univerzita Karlova v Praze, diplomová práce.
- DAVIES, P. K., RICHARD, J. M., BRUCE, E. (2016). Detecting historical changes to vegetation in a Cambodian protected area using the Landsat TM and ETM+ sensors. *Remote Sensing of Environment*, 187, s. 332-344.
- DONINCK, V. J., TUOMISTO, H. (2017). Evaluation of directional normalization methods for LandsatTM/ETM+ over primary Amazonian lowland forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58, s. 249-263.
- DU, Y., TEILLET, P., CIHLAR, J. (2002). Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control or land cover change detection. *Remote Sensing of Environment*, 82, s. 123– 134.
- EARTH OBSERVATION PORTAL. *Landsat-1 to Landsat-3* [online]. ESA [cit. 16. 5. 2019]. Dostupné z: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-1-3>.
- EIVAZI, A. et al. (2015). Variance-preserving mosaicing of multiple satellite images for forest parameter estimation: Radiometric normalization. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105, s. 120-127.
- FURBY, S. L., CAMPBELL, N. A. (2001). Calibrating images from different dates to 'like-value' digital counts. *Remote Sensing of Environment*, 77, 186–196.
- GAN, W. et al., (2014). Normalization of NDVI from Different Sensor System using MODIS Products as Reference. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 17 (2014) 012225*.

- GISAT. *Přehled družicových systémů > Landsat* [online]. Gisat s. r. o. [cit. 7. 4. 2019] Dostupné z: <http://www.gisat.cz/content/cz/dpz/prehled-druzicovych-systemu/landsat>.
- HALOUNOVÁ, L., PAVELKA K. (2008). *DÁLKOVÝ PRŮZKUM ZEMĚ*. ČVUT, 1. vydání, 192 s. ISBN: 978-80-01-03124-7.
- HOLČÍK, J., KOMENDA, M. et al. (2015). *Matematická biologie: e-learningová učebnice* [online] Brno: Masarykova univerzita [cit. 10. 6. 2019]. Dostupné z: <http://portal.matematickabiologie.cz/>
- CHANDER, G. et al. Improvement in absolute calibration accuracy of Landsat-5 TM with Landsat-7 ETM+ data. *Earth Observing Systems X, Proceedings of SPIE*, 5882.
- CHANDER, G., MARKHAM, L. B., BARSİ A. J. (2007). Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 4, s. 490-494.
- CHANDER, G., MARKHAM, L. B., HELDER, L. D. (2009). Summary of Current Radiometric Calibration Coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI Sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, s. 893-903.
- CHEN, CH., et al. (2014). Parallel relative radiometric normalisation for remote sensing image mosaics. *Computers & Geosciences*, 74, s. 28-36.
- JAKIMOW, B., et al. (2018). Mapping pasture management in the Brazilian Amazon from dense Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*, 205, 438-468.
- KAUFMAN J. Y. et al. (1997). The MODIS 2.1- m Channel—Correlation with Visible Reflectance for Use in Remote Sensing of Aerosol. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 35, s 1286-1297.
- LAŠTOVIČKA, J. (2016). *HODNOCENÍ ČASOVÝCH ŘAD DRUŽICOVÝCH SNÍMKŮ K POZOROVÁNÍ DISTURBANCÍ V OBLASTI NÍZKÝCH TATER*, Univerzita Karlova v Praze, diplomová práce.
- LEI FANGA, JIAN YANG (2013). Atmospheric effects on the performance and threshold extrapolation of multi-temporal Landsat derived dNBR for burn severity assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, s. 10-20.
- LIAO C. et al. (2017). A Spatio-Temporal Data Fusion Model for Generating NDVI Time Series in Heterogeneous Regions. *Remote sensing*, 9, 1125-1153.
- LLOYD, C. (2013). Landsat 8 Bands. *Landsat Science* [online]. NASA [cit. 1. 5. 2018] Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/>
- MARPU, R. P., GAMBA, P., CANTY, M. J. (2014). Improving change detection results of IR-MAD by eliminating strong changes. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8, 799-803.

- MASEK G. J. et al. (2006). A Landsat Surface Reflectance Dataset for North America, 1990–2000. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS*, 3, s. 68-72.
- MISHRA, N., HELDER, D., BARSİ, J., MARKHAM, B. (2016). CONTINUOUS CALIBRATION IMPROVEMENT: LANDSAT 5 THROUGH LANDSAT 8. *Remote Sensing of Environment*, 185, S. 7-15.
- NASA (2019 a). *MODIS Land: MODIS Grids* [online]. NASA [cit. 8. 7. 2019]. Dostupné z: https://modis-land.gsfc.nasa.gov/MODLAND_grid.html.
- NASA (2019 b). Data. *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* [online]. NASA [cit. 8. 7. 2019]. Dostupné z: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>
- NIELSEN, A. A. (2007). The Regularized Iteratively Reweighted MAD Method for Change Detection in Multi- and Hyperspectral Data. *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING*, 16, s. 463-478.
- NIELSEN, A. A., CONRADSEN, K., & SIMPSON, J. J. (1998). Multivariate alteration detection (MAD) and MAF post-processing in multispectral, bitemporal image data: New approaches to change detection studies. *Remote Sensing of Environment*, 64, s. 1– 19.
- PFLUGMACHER, D et al. (2012). Using Landsat-derived disturbance history (1972–2010) to predict current forest structure. *Remote Sensing of Environment*, 122, s. 146-165.
- SETIAWAN, Y., KUSTYO, DARMAWAN, A. (2015). Development of near-real time forest monitoring (Phase I: Data preparation). *Procedia Environmental Sciences*, 24, s. 317–323.
- SCHOTT, J. R., SALVAGGIO, C., & VOLCHOK, W. J. (1988). Radiometric scene normalization using spseudo-invariant features. *Remote Sensing of Environment*, 26, s. 1– 16.
- SCHROEDER, T. A., et al. (2006). Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. *Remote sensing of Environment*, 103, 16-26.
- SONG, C., WOODCOCK, C., SETO, K., LENNEY, M., MACOMBER, A. (2001). Classification and Change Detection Using Landsat TM Data: When and How to Correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment*, 75, s. 230-244.
- SOUZA, M. C. et al. (2013). Ten-Year Landsat Classification of Deforestation and Forest Degradation in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing*, 5, s. 5493-5513.
- STÖCKLI, R., VIDALE, P. L. (2004). European plant phenology and climate as seen in a 20-year AVHRR land-surface parameter dataset. *Remote sensing*, 10, s. 3303-3330.
- TEILLET, P. M. et al. (2001). Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets. *Remote Sensing of Environment*, 78, s. 39-54.
- USGS (2013). *LDCM, Press Kit*. [online] NASA, USGS [cit. 20. 5. 2019] Dostupné z: https://www.nasa.gov/pdf/723395main_LDCMpresskit2013-final.pdf.

- USGS (2018 a). Landsat 5. Landsat missions [online]. USGS [cit. 15. 7. 2019] Dostupné z: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-5?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con.
- USGS (2018 b). *LEDAPS release notes* [online]. USGS, EROS [cit. 8. 7. 2019] Dostupné z: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/ledaps_release_notes.pdf.
- USGS (2018 c). *LASRC release notes* [online]. USGS, EROS [cit. 7. 7. 2018]. Dostupné z: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/lasrc_release_notes.pdf.
- USGS (2018 d). *Landsat Surface Reflectance Level-2 Science Products* [online]. USGS [cit. 6. 1. 2019] Dostupné z: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/ledaps_product_guide.pdf.
- USGS (2018 e). *LANDSAT 8; SURFACE REFLECTANCE CODE (LASRC); PRODUCT GUIDE*. [online]. USGS. [cit. 31. 12. 2018] Dostupné z: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-surface-reflectance-code-lasrc-product-guide>.
- USGS (2019 a). *LANDSAT 4-7; SURFACE REFLECTANCE (LEDAPS); PRODUCT GUIDE* [online]. USGS. [cit. 8. 1. 2019] Dostupné z: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-4-7-surface-reflectance-code-ledaps-product-guide>.
- VERMOTE E. et al. (1997). Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6s: An Overview. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 35, 675-686.
- VERMOTE, E. et al. (2006). Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum - Vector (6SV). *6S User Guide Version 3*. Dostupné z: http://6s.ltdri.org/files/tutorial/6S_Manual_Part_1.pdf.
- VERMOTE, E., JUSTICE, C., CLAVERIE, M., FRANCH, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185, s. 46-56.
- VOGELER, C. J. et al. (2018). Extracting the full value of the Landsat archive: Inter-sensor harmonization for the mapping of Minnesota forest canopy cover (1973–2015). *Remote Sensing of Environment*, 209, s. 363-373.
- WANG, B. et al (2015). Application of IR-MAD using synthetically fused images for change detection in hyperspectral data. *Remote Sensing Letters*, 6, s. 579-586.
- WOODCOCK, C. et al. (2012). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, s. 154-172.
- YANG, X., LO, C. P. (2000). Relative Radiometric Normalization Performance for Change Detection from Multi-Date Satellite Images. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING*, 66, S.967-980.

8 Seznam příloh

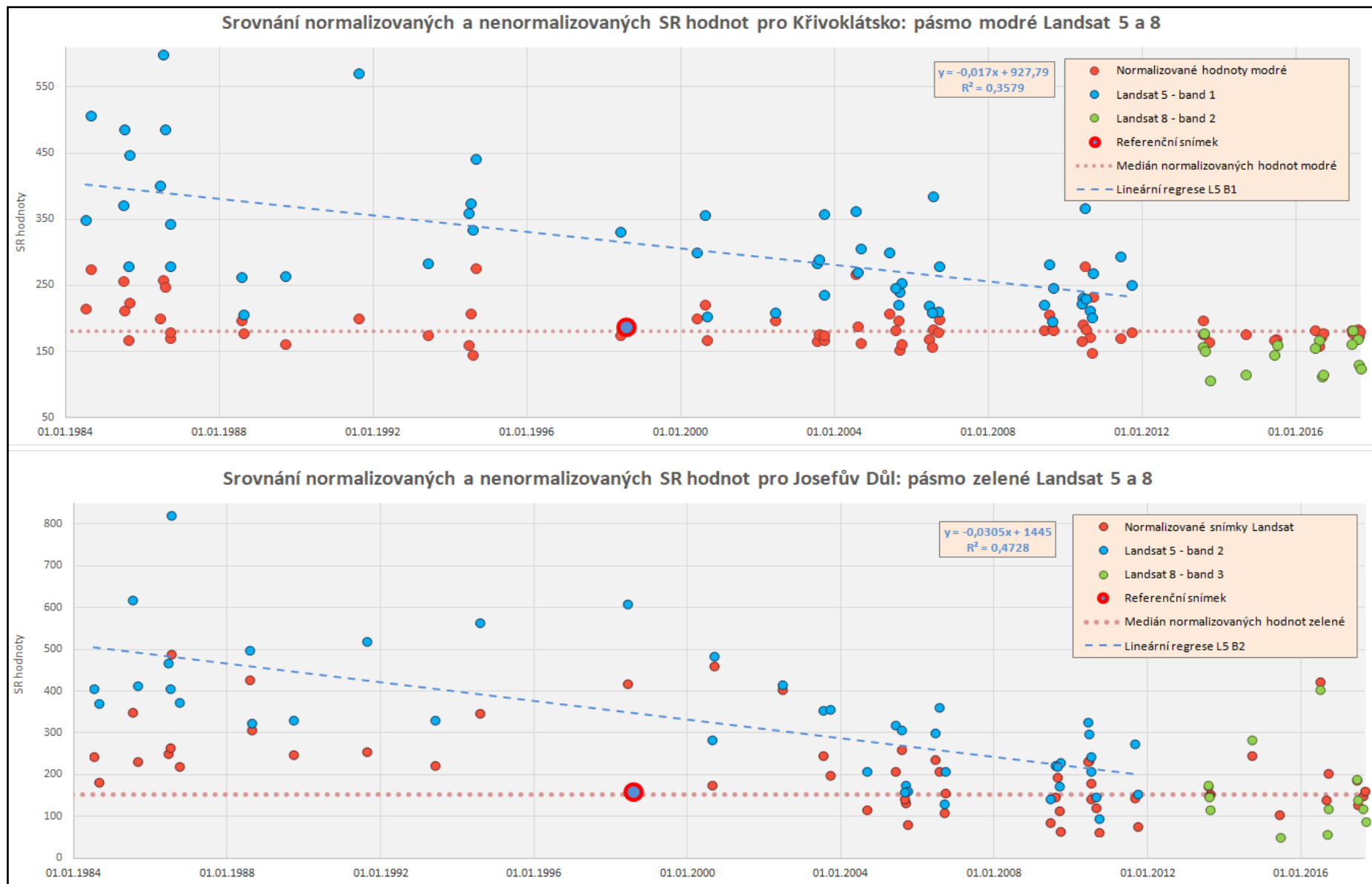
- Příloha 1 Seznam snímků v časové řadě
- Příloha 2 Časová řada modré pásmo, Křivoklátsko; Časová řada zelené pásmo, Josefův Důl
- Příloha 3 Tabulky k podkapitole 4.2.5
- Příloha 4 Boxploty
- Příloha 5 Korelace SR hodnot mezi jednotlivými lokalitami pásmo modré
- Příloha 6 Vliv data pořízení a pozice WRS-2 na hodnoty snímků

Příloha 1 Seznam snímků v časové řadě

Celý název snímku	Oblačnost
LT05_L1TP_191025_19840711_20170220_01_T1	0%
LT05_L1TP_191025_19840828_20171213_01_T1	1%
LT05_L1TP_192025_19850603_20170219_01_T1	18%
LT05_L1TP_192025_19850705_20170219_01_T1	5%
LT05_L1TP_191025_19850714_20171212_01_T1	0%
LT05_L1TP_192025_19850822_20170218_01_T1	4%
LT05_L1TP_191025_19850831_20171212_01_T1	1%
LT05_L1TP_191025_19860615_20170217_01_T1	1%
LT05_L1TP_191025_19860701_20170217_01_T1	17%
LT05_L1TP_191025_19860717_20170217_01_T1	1%
LT05_L1TP_192025_19860809_20170217_01_T1	10%
LT05_L1TP_191025_19860919_20170216_01_T1	18%
LT05_L1TP_192025_19860926_20170216_01_T1	14%
LT05_L1TP_192025_19880729_20170208_01_T1	10%
LT05_L1TP_192025_19880814_20170207_01_T1	0%
LT05_L1TP_192025_19890918_20170201_01_T1	9%
LT05_L1TP_191025_19910816_20170126_01_T1	3%
LT05_L1TP_191025_19930602_20170118_01_T1	4%
LT05_L1TP_191025_19930805_20170117_01_T1	16%
LT05_L1TP_192025_19940628_20170114_01_T1	19%
LT05_L1TP_192025_19940714_20170113_01_T1	3%
LT05_L1TP_192025_19940730_20170113_01_T1	7%
LT05_L1TP_192025_19940831_20170112_01_T1	20%
LT05_L1TP_192025_19980607_20161224_01_T1	20%
LT05_L1TP_192025_19980810_20161223_01_T1	0%
LT05_L1TP_191025_20000605_20171210_01_T1	7%
LT05_L1TP_192025_20000815_20171212_01_T1	8%
LT05_L1TP_191025_20000909_20171211_01_T1	4%
LT05_L1TP_192025_20020618_20161208_01_T1	1%
LT05_L1TP_191025_20030716_20161205_01_T1	12%
LT05_L1TP_191025_20030801_20161205_01_T1	14%
LT05_L1TP_191025_20030918_20161204_01_T1	2%
LT05_L1TP_192025_20030925_20161203_01_T1	4%
LT05_L1TP_191025_20040718_20161201_01_T1	19%
LT05_L1TP_192025_20040810_20161201_01_T1	2%
LT05_L1TP_191025_20040904_20161130_01_T1	1%
LT05_L1TP_191025_20050603_20161125_01_T1	13%
LT05_L1TP_192025_20050728_20161125_01_T1	2%
LT05_L1TP_192025_20050829_20161124_01_T1	1%
LT05_L1TP_191025_20050907_20161124_01_T1	1%
LT05_L1TP_191025_20050923_20161124_01_T1	0%
LT05_L1TP_192025_20060613_20161121_01_T1	4%

LT05_L1TP_192025_20060715_20161120_01_T1	17%
LT05_L1TP_191025_20060724_20161120_01_T1	16%
LT05_L1TP_191025_20060910_20161118_01_T1	0%
LT05_L1TP_192025_20060917_20161118_01_T1	19%
LT05_L1TP_191025_20060926_20161119_01_T1	6%
LT05_L1TP_191025_20090614_20161025_01_T1	0%
LT05_L1TP_191025_20090801_20161022_01_T1	0%
LT05_L1TP_192025_20090824_20161022_01_T1	0%
LT05_L1TP_192025_20090909_20161020_01_T1	0%
LT05_L1TP_191025_20090918_20161020_01_T1	15%
LT05_L1TP_192025_20100608_20161015_01_T1	20%
LT05_L1TP_191025_20100617_20161015_01_T1	3%
LT05_L1TP_191025_20100703_20161016_01_T1	2%
LT05_L1TP_192025_20100710_20161014_01_T1	3%
LT05_L1TP_191025_20100820_20161014_01_T1	6%
LT05_L1TP_192025_20100912_20161013_01_T1	3%
LT05_L1TP_191025_20100921_20161013_01_T1	5%
LT05_L1TP_191025_20110604_20161009_01_T1	5%
LT05_L1TP_191025_20110706_20161008_01_T1	13%
LT05_L1TP_191025_20110823_20161007_01_T1	3%
LT05_L1TP_191025_20110924_20161006_01_T1	1%
LC08_L1TP_191025_20130727_20170503_01_T1	2 %
LC08_L1TP_192025_20130803_20170503_01_T1	2 %
LC08_L1TP_191025_20130812_20170503_01_T1	6 %
LC08_L1TP_191025_20130929_20170502_01_T1	6 %
LC08_L1TP_192025_20140907_20170419_01_T1	13 %
LC08_L1TP_191025_20140916_20170419_01_T1	12 %
LC08_L1TP_192025_20150606_20170408_01_T1	3 %
LC08_L1TP_192025_20160624_20170323_01_T1	0 %
LC08_L1TP_191025_20150701_20170407_01_T1	18 %
LC08_L1TP_191025_20150919_20170404_01_T1	10 %
LC08_L1TP_191025_20160804_20170322_01_T1	10 %
LC08_L1TP_192025_20160827_20170321_01_T1	0 %
LC08_L1TP_192025_20160912_20170321_01_T1	0 %
LC08_L1TP_192025_20170611_20170627_01_T1	2 %
LC08_L1TP_191025_20170620_20170630_01_T1	0 %
LC08_L1TP_191025_20170807_20170813_01_T1	10 %
LC08_L1TP_192025_20170814_20170825_01_T1	14 %
LC08_L1TP_192025_20170830_20170914_01_T1	0 %

Příloha 2 Časová řada modrého pásma, Křivoklátsko; Časová řada pásma zeleného, Josefův Důl



Příloha 3 Tabulky k podkapitole 4.6: Tabulka A Průměrné hodnoty pro jednotlivé výběry

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný
Modrá	191_old	435,6 (1.)	214,2	455,8 (1.)	214,1	402,8 (1.)	194,4	437 (1.)	206,9	396,3 (1.)	182,1
	192_old	338,2 (2.)	197,6	360,7 (2.)	217,0	308,7 (2.)	179,8	359,5 (2.)	231,6	340,7 (2.)	194,5
	191_new	280,7 (3.)	190,2	327,9 (3.)	217,5	284,6 (3.)	184,6	225 (4.)	131,6	268,5 (3.)	169,0
	192_new	240,9 (4.)	181,7	275,9 (4.)	215,3	242,2 (4.)	182,1	233,9 (3.)	179,0	220,4 (4.)	159,8
Zelená	191_old	551,8 (1.)	345,5	574,4 (1.)	347,2	521,9 (1.)	323,0	485,5 (1.)	278,0	433,8 (1.)	241,2
	192_old	457,2 (2.)	325,0	470,6 (2.)	344,0	423,9 (2.)	304,4	419,5 (2.)	311,0	405,7 (2.)	278,0
	191_new	395,4 (3.)	312,3	440,6 (3.)	345,8	396,4 (3.)	307,7	241,5 (4.)	159,0	320,2 (3.)	232,6
	192_new	362,6 (4.)	304,5	402,2 (4.)	344,5	367,9 (4.)	310,0	285,2 (3.)	223,6	287,5 (4.)	226,7
Červená	191_old	413,7 (1.)	256,9	437,6 (1.)	264,9	383,8 (1.)	233,0	331,7 (1.)	171,8	322,7 (1.)	169,3
	192_old	366,7 (2.)	246,5	385,3 (2.)	274,2	325,9 (2.)	217,5	277,5 (2.)	174,7	305,9 (2.)	184,8
	191_new	294,8 (3.)	235,2	351,6 (3.)	281,2	288,6 (3.)	220,4	181,8 (4.)	111,5	224,1 (3.)	154,1
	192_new	276,7 (4.)	224,8	322,7 (4.)	273,4	275,1 (4.)	222,8	235,7 (3.)	183,9	212,6 (4.)	154,8
NIR	191_old	2085,1 (1.)	1794,5	2440,9 (1.)	2073,7	2085,5 (1.)	1795,4	452 (1.)	172,6	562,7 (1.)	287,4
	192_old	1793,7 (4.)	1730,0	1965,3 (4.)	1957,9	1820,1 (4.)	1809,5	342,8 (2.)	256,1	451,5 (2.)	292,8
	191_new	2047,3 (2.)	1771,6	2270 (2.)	1998,5	2072,9 (2.)	1829,8	321,7 (4.)	199,3	359,6 (3.)	215,3
	192_new	1884,6 (3.)	1746,1	2120,9 (3.)	1975,9	1916,5 (3.)	1816,7	341,6 (3.)	239,3	319,8 (4.)	212,8
SWIR-1	191_old	844,9 (2.)	741,0	1144,2 (1.)	1010,3	915,2 (1.)	805,9	122,5 (2.)	62,7	126,6 (2.)	77,6
	192_old	742,1 (4.)	735,2	956,7 (4.)	977,7	793,4 (3.)	795,8	117,3 (4.)	122,5	127,6 (1.)	88,0
	191_new	851,5 (1.)	744,5	1100,6 (2.)	1004,4	878,1 (2.)	781,4	119,5 (3.)	158,1	83,6 (4.)	55,9
	192_new	776,4 (3.)	740,7	1025,6 (3.)	1002,8	778,6 (4.)	759,0	124,6 (1.)	80,2	85,1 (3.)	72,6
SWIR-2	191_old	348,9 (2.)	287,5	486 (1.)	409,1	387,6 (1.)	321,2	72,6 (4.)	25,9	62,8 (2.)	26,7
	192_old	312 (4.)	299,5	394,6 (4.)	396,4	325,4 (3.)	316,3	85,4 (3.)	79,0	72,7 (1.)	46,5
	191_new	348,9 (1.)	298,9	454,9 (2.)	409,8	361,2 (2.)	314,1	89,6 (2.)	70,8	46,4 (4.)	34,6
	192_new	314,8 (3.)	300,2	412,7 (3.)	403,9	314,6 (4.)	306,4	99,7 (1.)	75,0	50 (3.)	45,9

Příloha 3 Tabulky k podkapitole 4.6: Tabulka B Mediány hodnoty pro jednotlivé kombinace

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný
Modrá	191_old	447,4 (1.)	209,8	436,1 (1.)	209,8	398,8 (1.)	197,4	370,9 (1.)	191,0	388,8 (1.)	169,5
	192_old	342,8 (2.)	207,9	369,8 (2.)	207,9	292,8 (2.)	174,8	289,7 (2.)	233,1	366,4 (2.)	171,2
	191_new	282,6 (3.)	212,0	299,6 (3.)	212,0	272,9 (3.)	183,3	210,8 (4.)	100,1	260,2 (3.)	151,6
	192_new	226 (4.)	215,2	261,8 (4.)	215,2	238,6 (4.)	182,1	228,4 (3.)	147,3	202,2 (4.)	150,4
Zelená	191_old	550 (1.)	330,5	561,3 (1.)	330,5	518,9 (1.)	316,1	415,8 (1.)	252,0	463,6 (1.)	237,1
	192_old	482,7 (2.)	344,4	483 (2.)	344,4	437 (2.)	307,3	374,3 (2.)	308,4	418,7 (2.)	260,1
	191_new	392,7 (3.)	344,1	428,6 (3.)	344,1	384,9 (3.)	302,4	216,7 (4.)	138,2	303,4 (3.)	212,5
	192_new	358,6 (4.)	342,0	397 (4.)	342,0	370,4 (4.)	307,4	265,9 (3.)	188,0	251,3 (4.)	189,6
Červená	191_old	413,6 (1.)	262,9	437,8 (1.)	262,9	383,3 (1.)	225,4	285,9 (1.)	136,5	343,3 (1.)	152,5
	192_old	383,8 (2.)	269,0	396,7 (2.)	269,0	326,7 (2.)	224,5	231,2 (2.)	174,3	319,4 (2.)	159,5
	191_new	304 (3.)	275,7	332,1 (3.)	275,7	281,3 (3.)	217,8	144,3 (4.)	84,2	210,9 (3.)	139,3
	192_new	277 (4.)	270,3	314,9 (4.)	270,3	280,4 (4.)	221,5	215,7 (3.)	166,8	179,8 (4.)	145,6
NIR	191_old	2199,8 (1.)	2048,4	2451,1 (1.)	2048,4	2153,7 (1.)	1779,3	401,7 (1.)	194,8	553 (1.)	302,6
	192_old	1812,6 (3.)	1951,0	1997,2 (4.)	1951,0	1825,6 (4.)	1816,4	255 (4.)	282,9	419,1 (2.)	279,8
	191_new	2117,5 (2.)	1997,2	2247,2 (2.)	1997,2	2080 (2.)	1833,1	266,3 (3.)	138,5	337,6 (3.)	194,5
	192_new	1807,9 (4.)	1976,0	2066,3 (3.)	1976,0	1889,6 (3.)	1841,1	295,2 (2.)	207,2	291,4 (4.)	188,9
SWIR-1	191_old	874,8 (1.)	1009,0	1174,8 (1.)	1009,0	947,4 (1.)	803,8	117,7 (1.)	58,2	121,4 (1.)	84,7
	192_old	763,3 (4.)	974,3	945,6 (4.)	974,3	770,9 (4.)	801,4	91,9 (3.)	120,1	97,1 (2.)	66,5
	191_new	867,2 (2.)	1006,5	1105,2 (2.)	1006,5	847,1 (2.)	773,5	61,4 (4.)	47,4	71,9 (3.)	58,3
	192_new	768,1 (3.)	1012,8	1029 (3.)	1012,8	777,6 (3.)	765,2	99,1 (2.)	68,2	66,4 (4.)	68,9
SWIR-2	191_old	340,7 (2.)	402,7	490,3 (1.)	402,7	395,4 (1.)	319,6	70,7 (2.)	27,9	64,8 (1.)	24,8
	192_old	307,9 (3.)	393,0	397 (4.)	393,0	326,7 (3.)	311,2	62 (3.)	67,8	53,7 (2.)	35,1
	191_new	355,9 (1.)	412,6	438,9 (2.)	412,6	355,2 (2.)	307,0	36,7 (4.)	17,3	41,2 (3.)	36,3
	192_new	303,6 (4.)	409,8	415,3 (3.)	409,8	307,6 (4.)	309,1	81,6 (1.)	50,4	32,3 (4.)	30,7

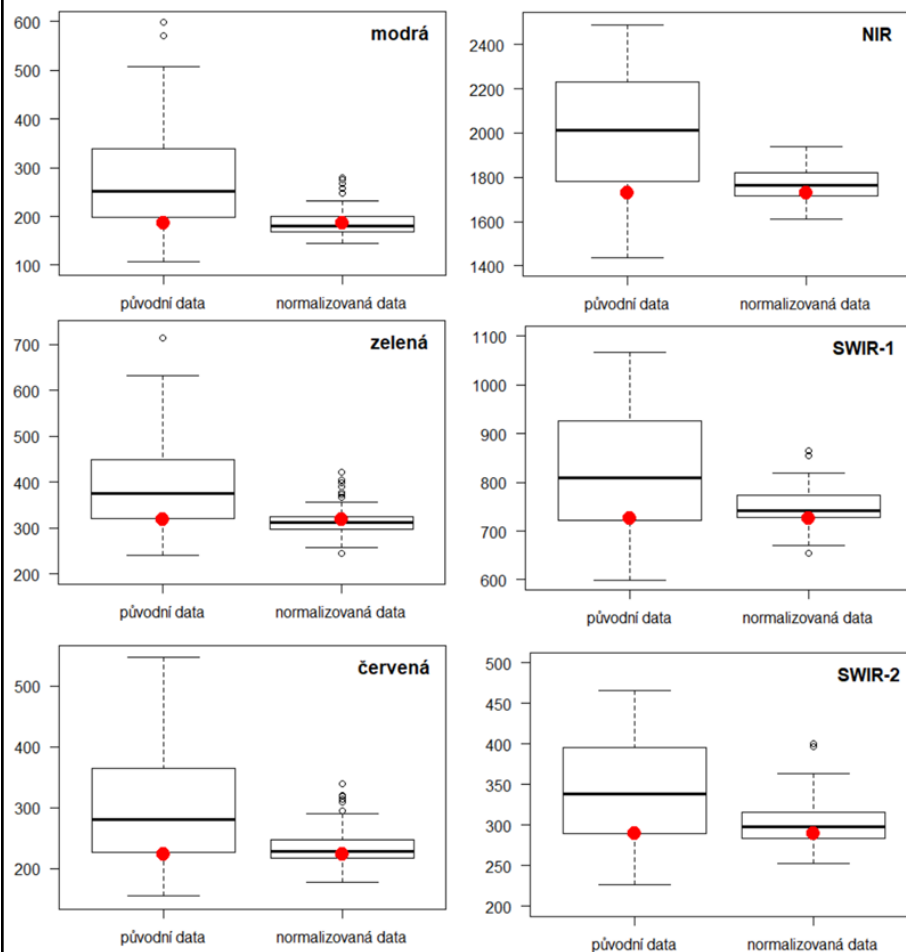
Příloha 3 Tabulky k podkapitole 4.6: Tabulka C Směrodatné odchyly pro jednotlivé kombinace

		Křivoklátsko		Tuchoměřice		Kokořínský Důl		Josefův Důl		Slapy	
		Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný	Původní	Normalizovaný
Modrá	191_old	110 (1.)	32,5	106,7 (1.)	29,8	90,2 (1.)	24,5	151,9 (1.)	66,8	119,7 (1.)	52,7
	192_old	78,3 (2.)	42,1	86,8 (3.)	40,2	76 (2.)	24,4	91,9 (4.)	74,0	113 (2.)	64,4
	191_new	53,5 (3.)	33,3	96,7 (2.)	34,4	62,7 (3.)	23,1	95,3 (2.)	83,7	88,8 (3.)	59,7
	192_new	46 (4.)	17,2	52,5 (4.)	24,0	38,6 (4.)	14,6	92,9 (3.)	83,0	62,9 (4.)	41,0
Zelená	191_old	97,5 (1.)	33,6	94,8 (1.)	35,3	73,6 (1.)	20,3	144,5 (1.)	86,1	115,8 (1.)	62,6
	192_old	79,5 (2.)	44,0	71 (3.)	33,9	64,4 (2.)	25,2	96,1 (4.)	74,1	103,2 (2.)	62,8
	191_new	62,6 (3.)	39,7	78,8 (2.)	37,2	53,2 (3.)	24,1	100,7 (3.)	92,7	95,9 (3.)	84,9
	192_new	42,8 (4.)	21,8	52,9 (4.)	22,2	48,6 (4.)	11,6	122,5 (2.)	93,7	77,7 (4.)	69,2
Červená	191_old	79,1 (1.)	38,8	86,9 (1.)	47,0	51,9 (3.)	20,7	103,8 (2.)	73,5	91,9 (2.)	61,5
	192_old	71,4 (2.)	46,1	80,9 (2.)	45,2	55,9 (2.)	23,9	84,1 (4.)	82,1	97,9 (1.)	75,8
	191_new	56,1 (3.)	31,9	76,2 (3.)	36,9	56,6 (1.)	20,1	87,5 (3.)	90,7	83,5 (3.)	69,5
	192_new	41,7 (4.)	15,8	46,4 (4.)	21,7	51,1 (4.)	17,3	111,1 (1.)	94,7	76,7 (4.)	66,5
NIR	191_old	227,7 (2.)	66,3	193,8 (3.)	76,4	160,7 (2.)	75,2	137,3 (3.)	97,8	165,8 (1.)	121,3
	192_old	195,9 (4.)	61,6	184,1 (4.)	43,4	145,2 (4.)	62,0	136,4 (4.)	87,8	147,4 (2.)	97,2
	191_new	253,2 (1.)	72,6	265,4 (1.)	50,9	193,8 (1.)	50,7	176,7 (1.)	226,2	126,6 (3.)	116,2
	192_new	196,3 (3.)	54,0	238,4 (2.)	51,0	154,2 (3.)	80,2	138,4 (2.)	149,4	98,4 (4.)	94,7
SWIR-1	191_old	97,4 (3.)	22,2	85 (3.)	38,1	77,6 (3.)	19,3	33,6 (4.)	21,2	36,8 (4.)	45,4
	192_old	91,5 (4.)	35,6	74,9 (4.)	26,3	72,1 (4.)	17,5	61,8 (3.)	30,0	79 (1.)	52,2
	191_new	123,8 (1.)	39,6	97,5 (1.)	21,7	104,1 (1.)	30,5	162,5 (1.)	260,4	52,7 (3.)	41,6
	192_new	99 (2.)	28,3	94,5 (2.)	33,6	88,1 (2.)	43,2	91,4 (2.)	56,8	69,9 (2.)	42,8
SWIR-2	191_old	46,7 (3.)	15,7	45,5 (2.)	28,7	49,7 (2.)	10,1	13,9 (4.)	13,3	17,9 (4.)	17,1
	192_old	52,5 (2.)	35,6	27,9 (4.)	20,5	34 (4.)	18,7	48 (3.)	43,0	50,5 (2.)	36,8
	191_new	60,7 (1.)	28,9	48,5 (1.)	23,1	53,5 (1.)	19,2	138,2 (1.)	171,8	31 (3.)	17,4
	192_new	43,1 (4.)	19,2	41,8 (3.)	24,3	37,8 (3.)	14,6	77,1 (2.)	59,2	58,2 (1.)	47,9

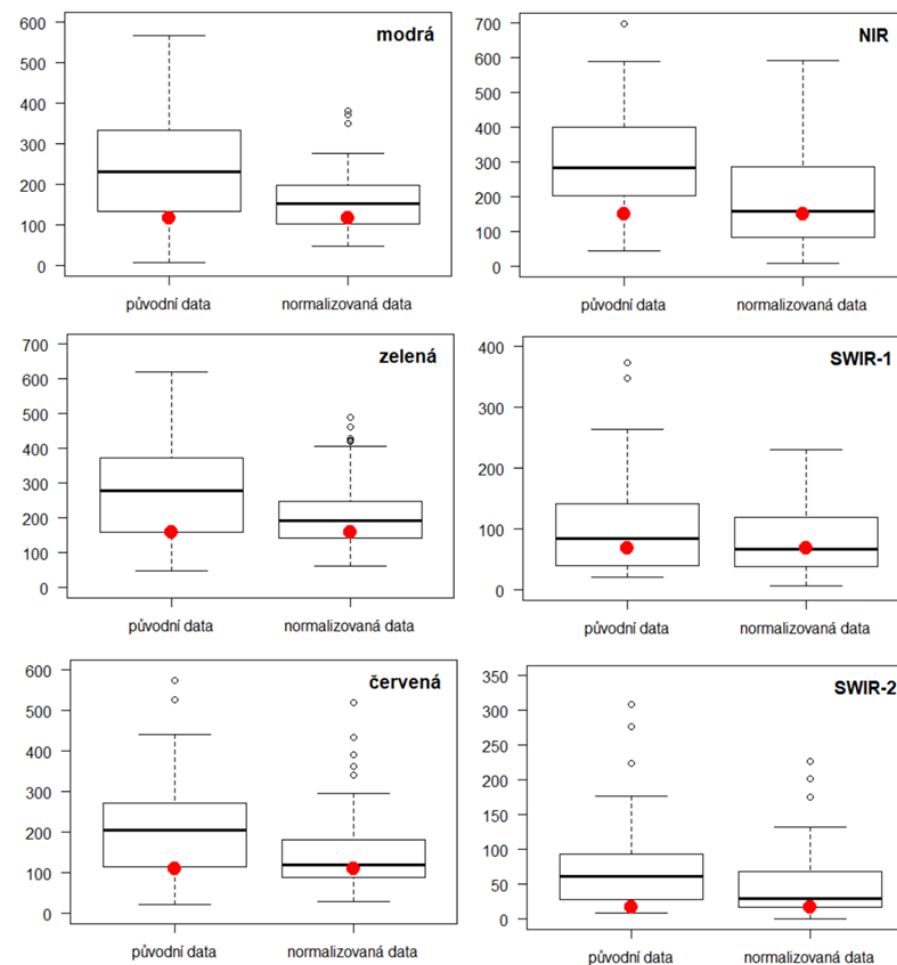
Příloha 4 Boxploty

Boxploty A – Srovnání odrazivosti normalizovaných a původních dat

Lokalita Křivoklátsko



Lokalita Josefův Důl



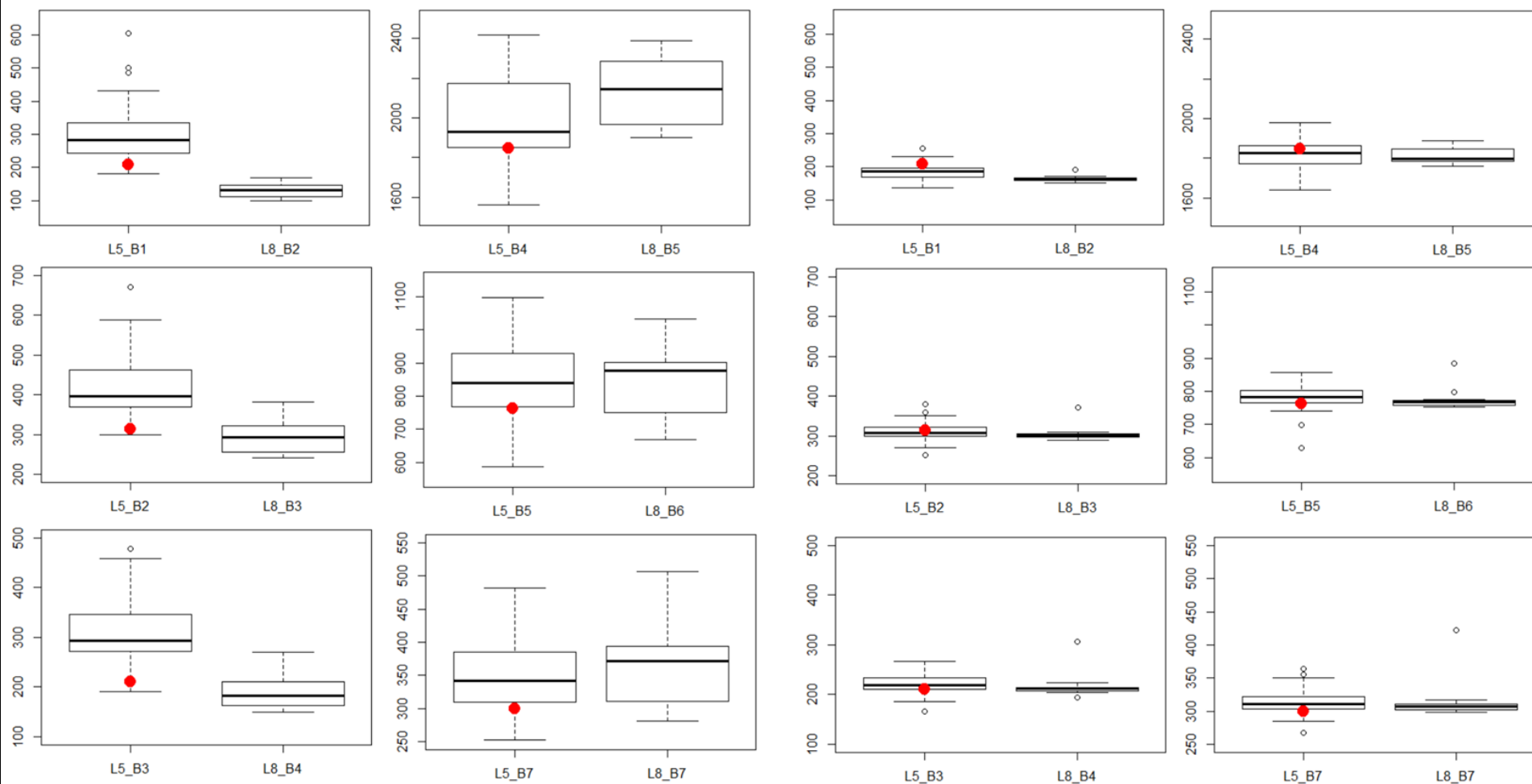
Na vertikální ose jsou hodnoty odrazivosti (SR)

Příloha 4 Boxploty

Boxploty B - Srovnání hodnot odrazivosti ze senzoru OLI a TM v lokalitě Kokořínský Důl

Před normalizací

Po normalizaci



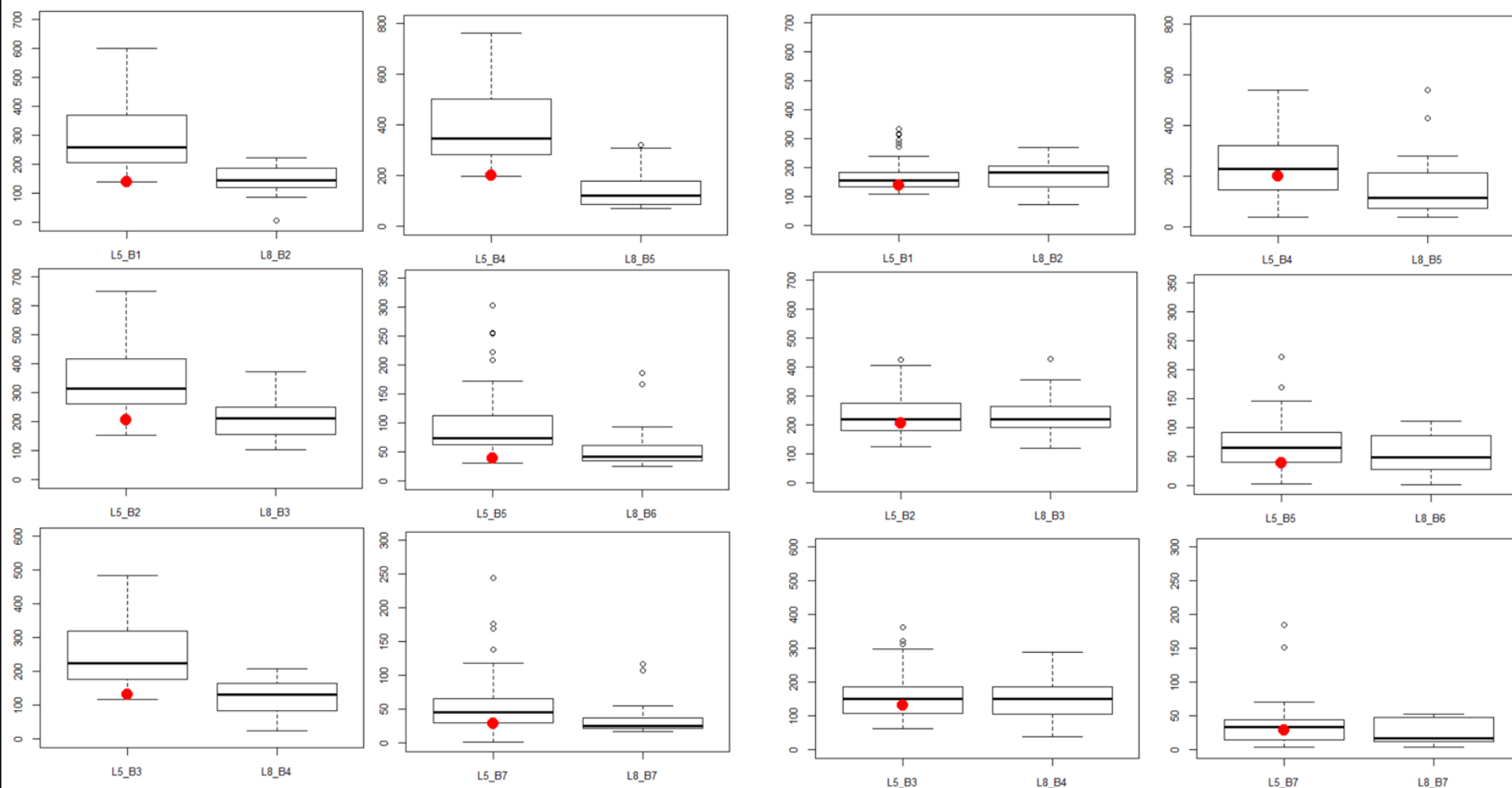
Na vertikální ose jsou hodnoty odrazivosti (SR)

Příloha 4 Boxploty

Boxploty C - Srovnání hodnot odrazivosti ze senzoru OLI a TM v lokalitě Slapy

Před normalizací

Po normalizaci



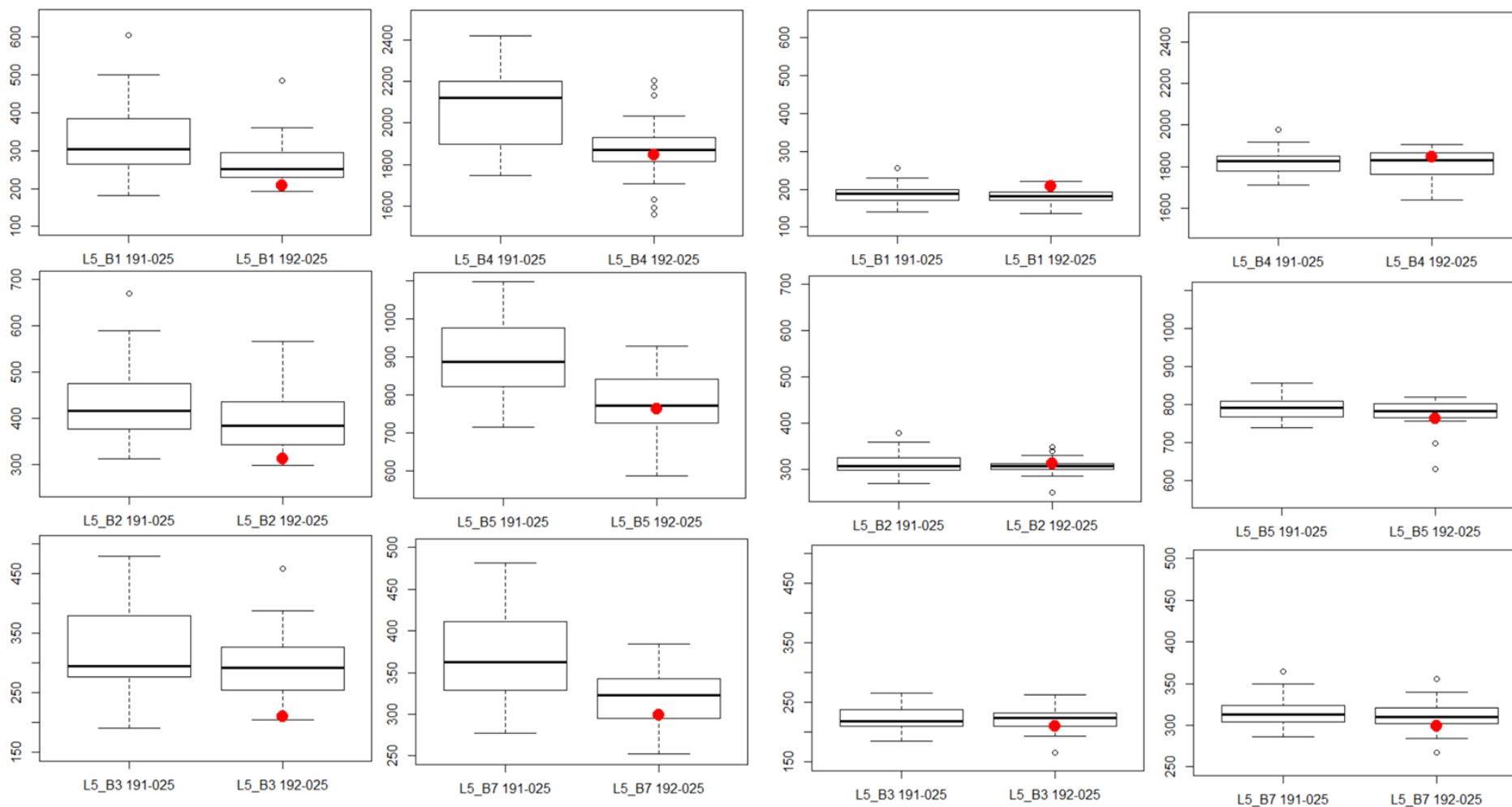
Na vertikální ose jsou hodnoty odrazivosti (SR)

Příloha 4 Boxploty

Boxploty D - Srovnání odrazivosti z různých pozic pro senzor TM v lokalitě Kokořínský Důl

Před normalizací

Po normalizaci



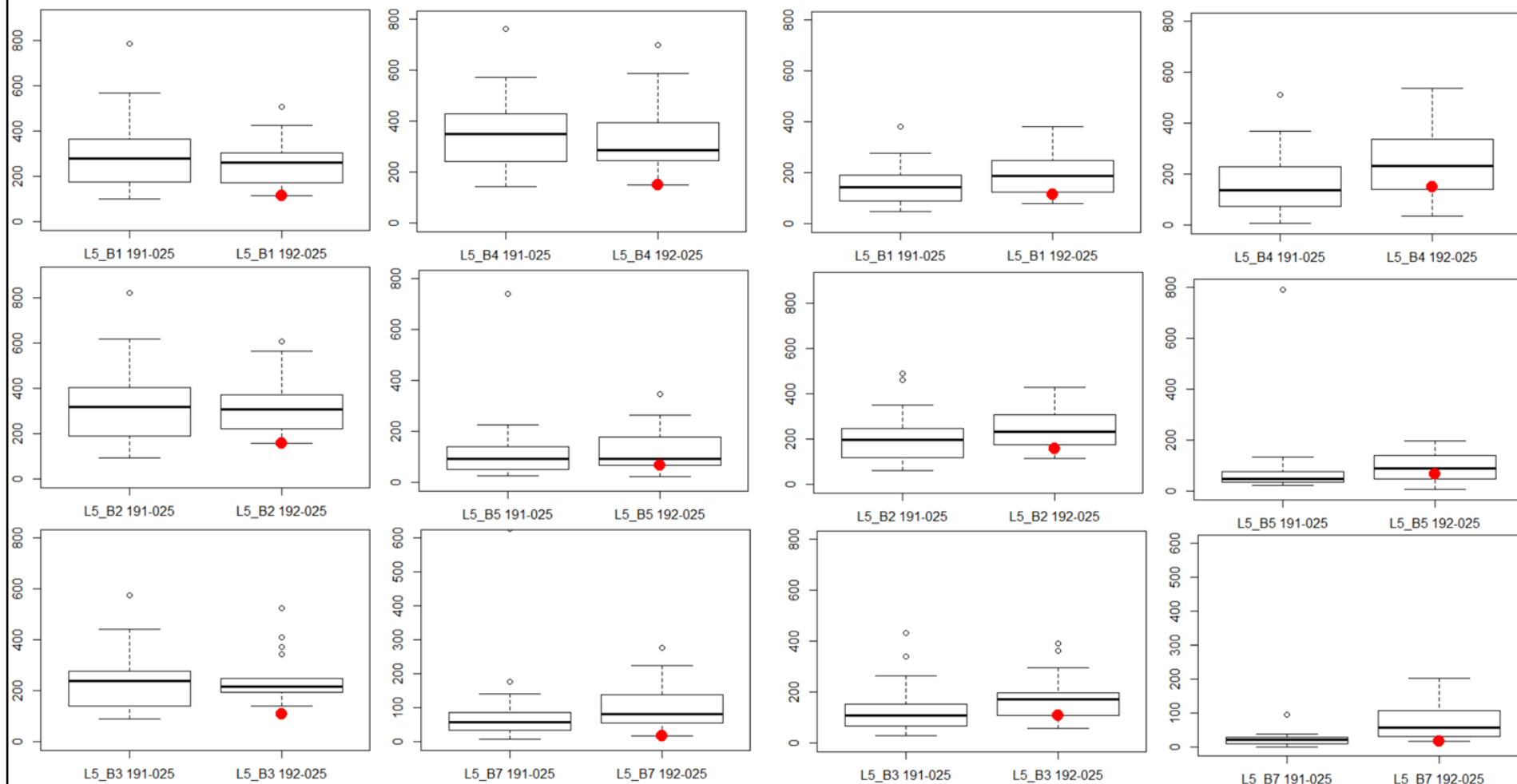
Na vertikální ose jsou hodnoty odrazivosti (SR)

Příloha 4 Boxploty

Boxploty E - Srovnání odrazivosti z různých pozic pro senzor TM v lokalitě Josefův Důl

Před normalizací

Po normalizaci



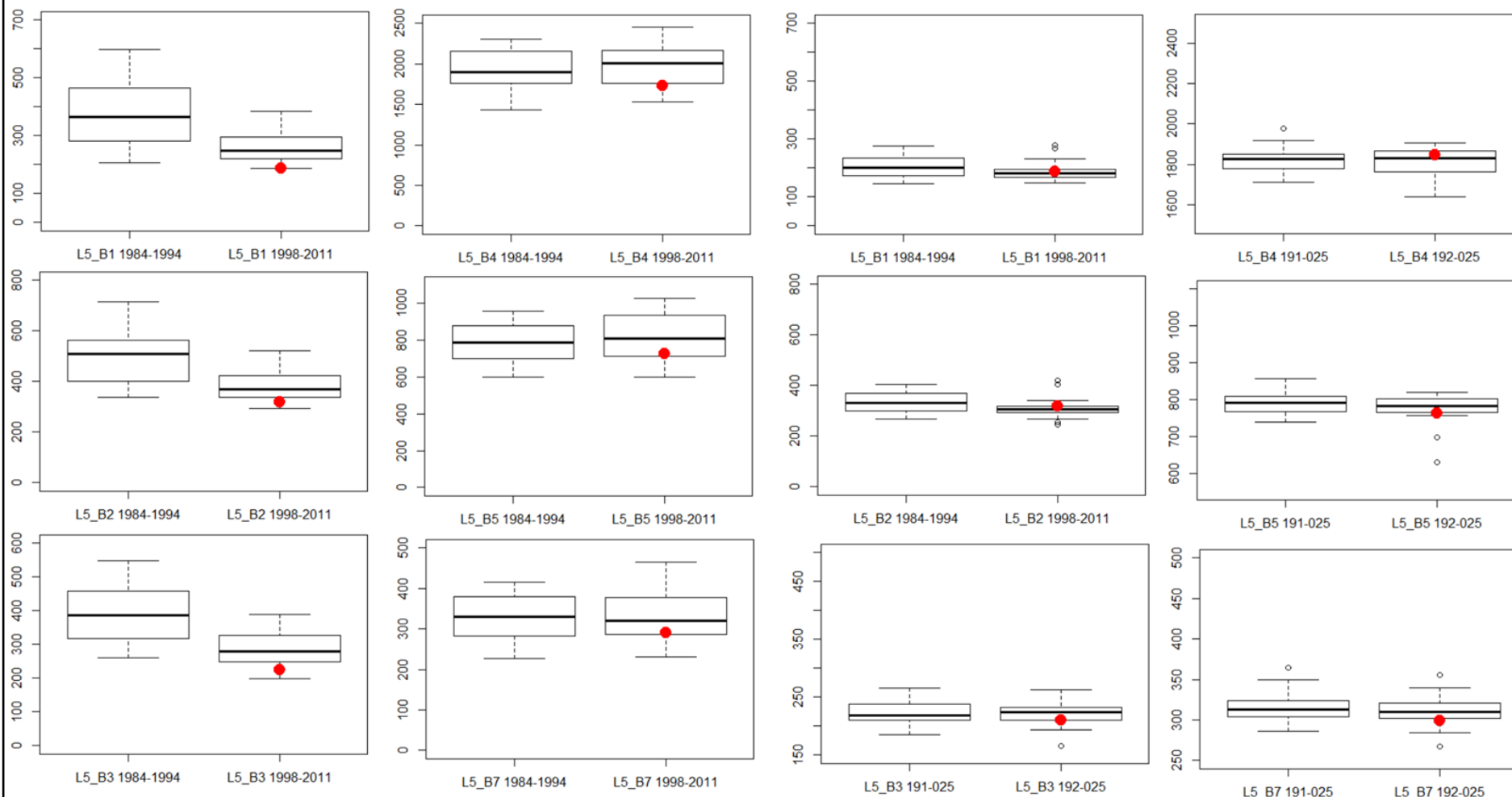
Na vertikální ose jsou hodnoty odrazivosti (SR)

Příloha 4 Boxploty

Boxploty F - Srovnání odrazivosti z rozdílných časových úseků v lokalitě Křivoklátsko

Před normalizací

Po normalizaci



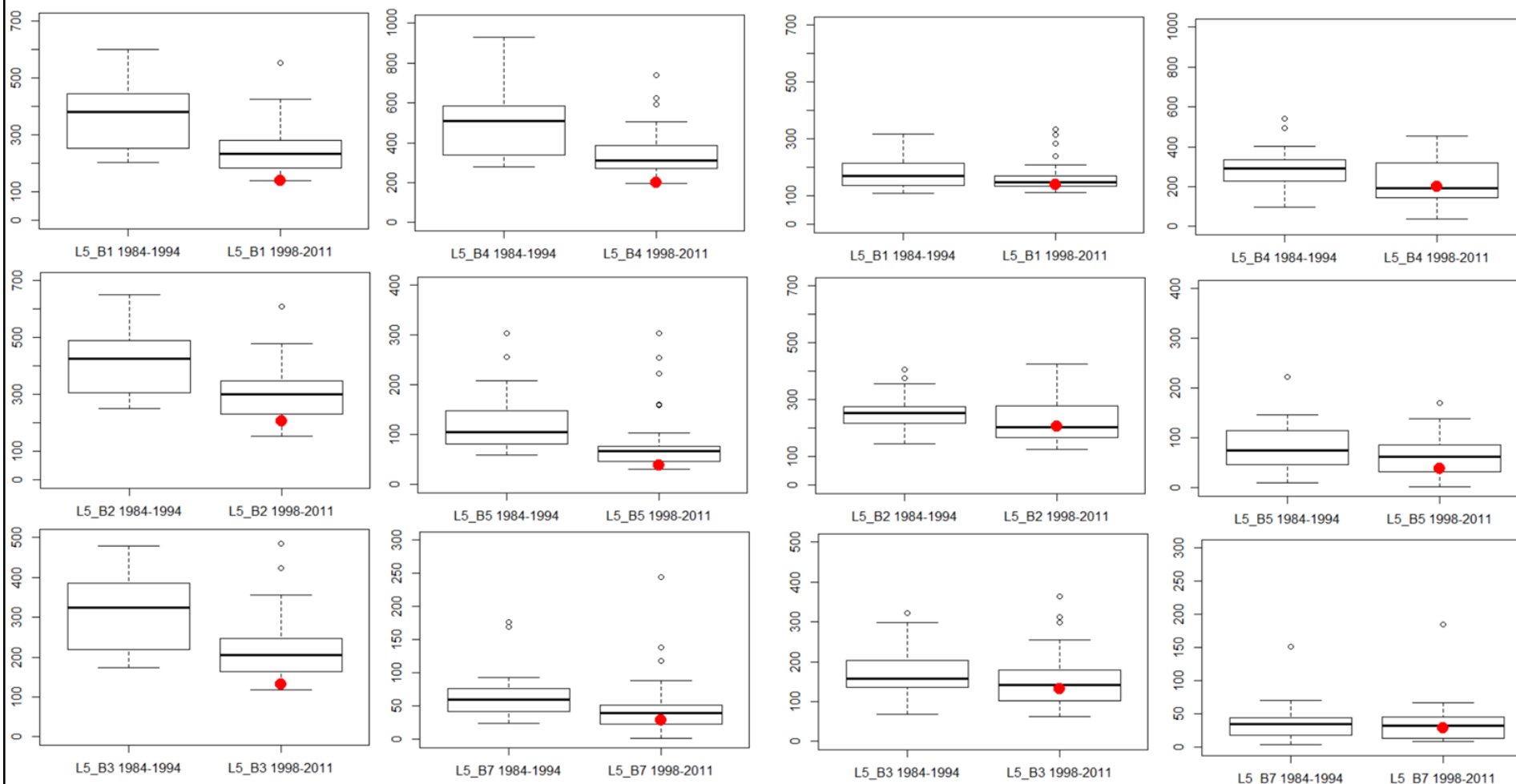
Na vertikální ose jsou hodnoty odrazivosti (SR)

Příloha 4 Boxploty

Boxploty G - Srovnání odrazivosti z rozdílných časových úseků v lokalitě Slapy

Před normalizací

Po normalizaci

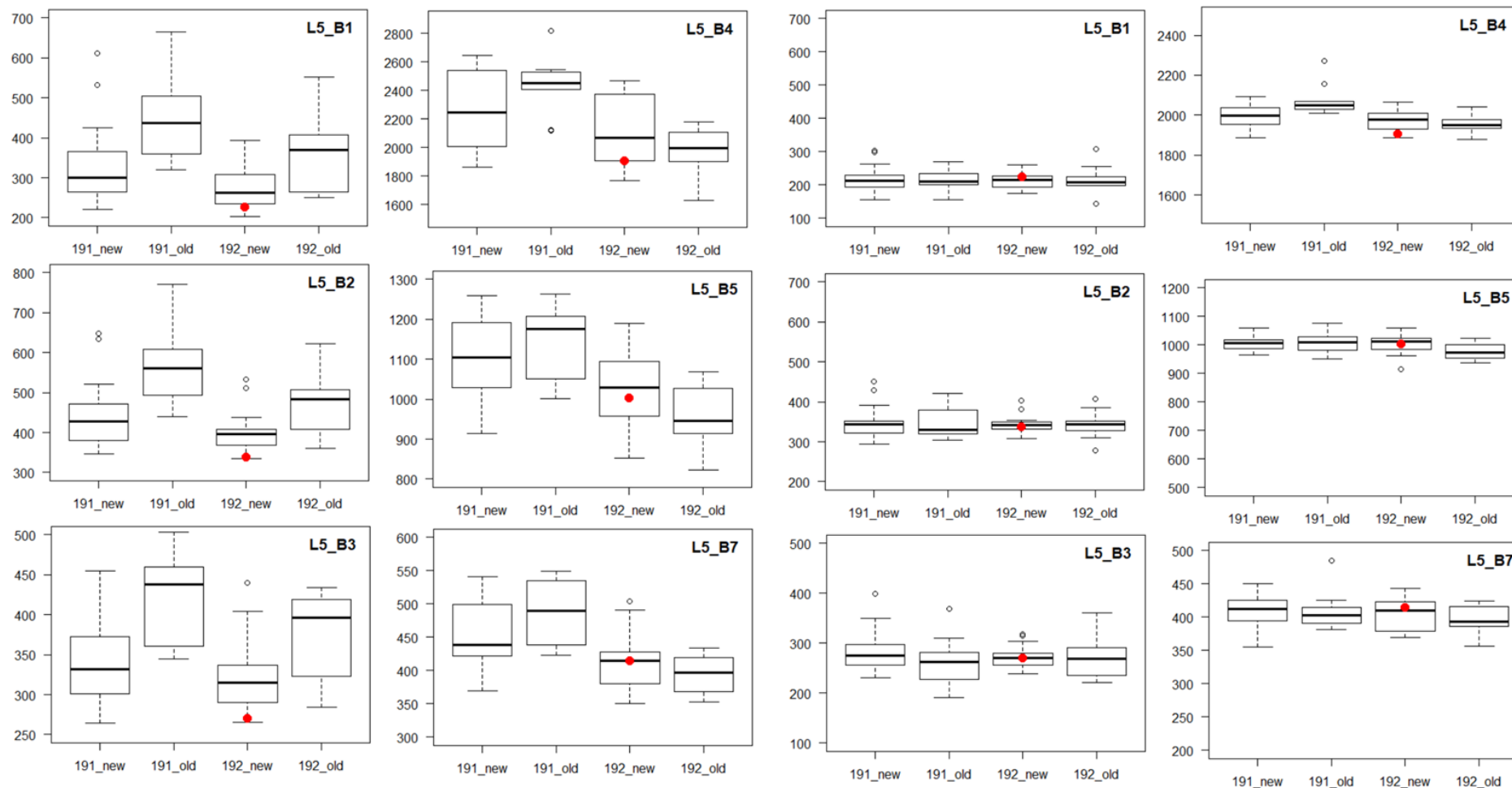


Na vertikální ose jsou hodnoty odrazivosti (SR)

Boxploty H – Vliv kombinace polohy a časového úseku na snímky TM v lokalitě Tuchoměřice

Před normalizací

Po normalizaci

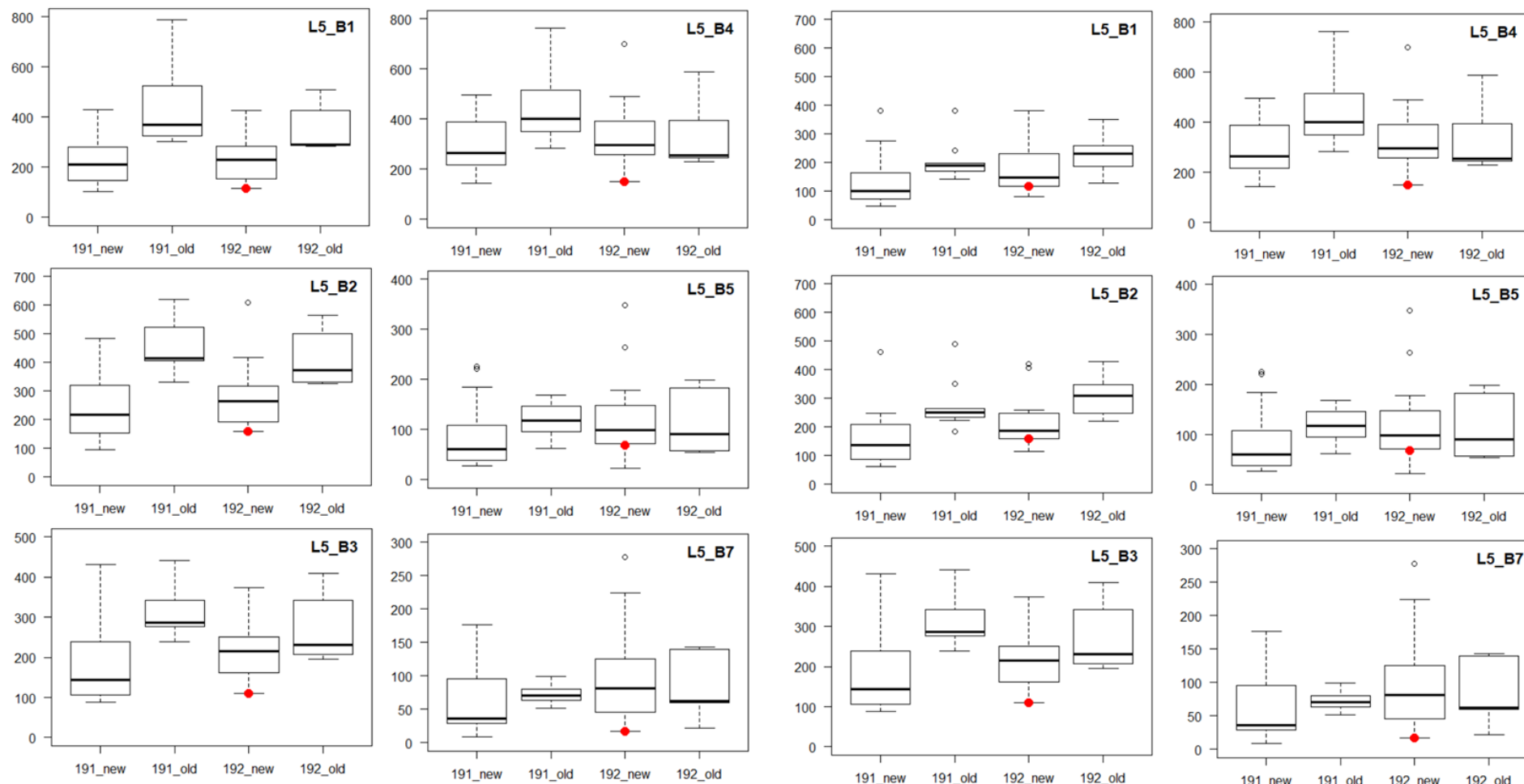


Na vertikální ose jsou hodnoty odrazivosti (SR)

Boxploty CH – Vliv kombinace polohy a časového úseku na snímky TM v lokalitě Josefův Důl

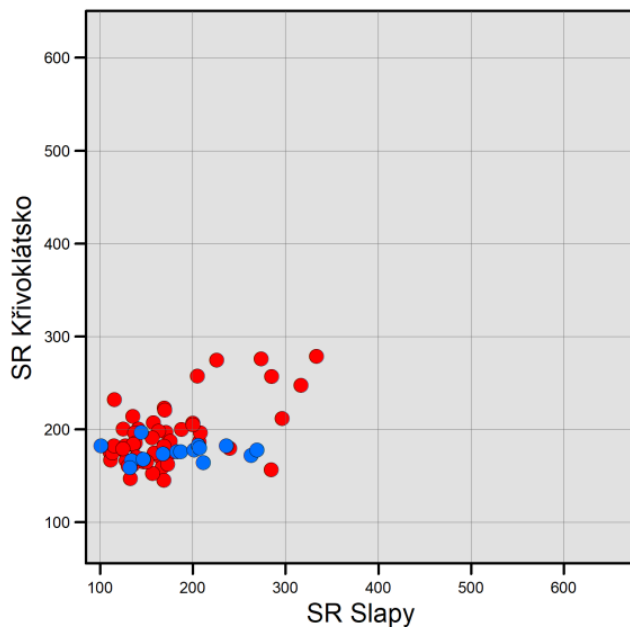
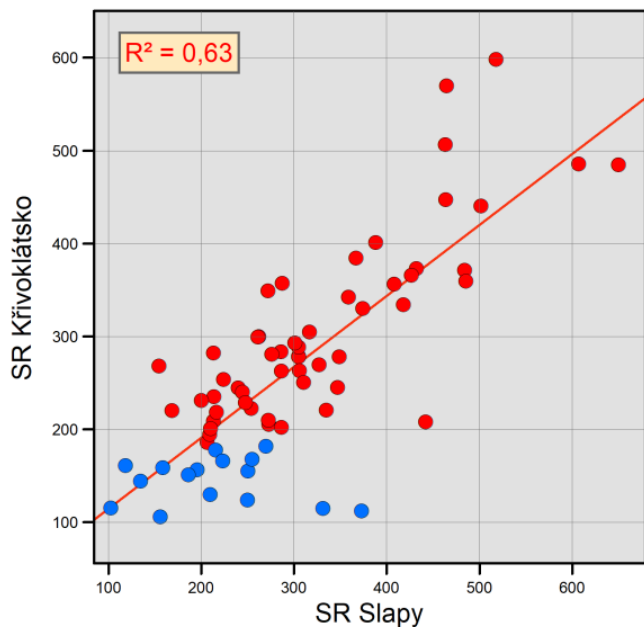
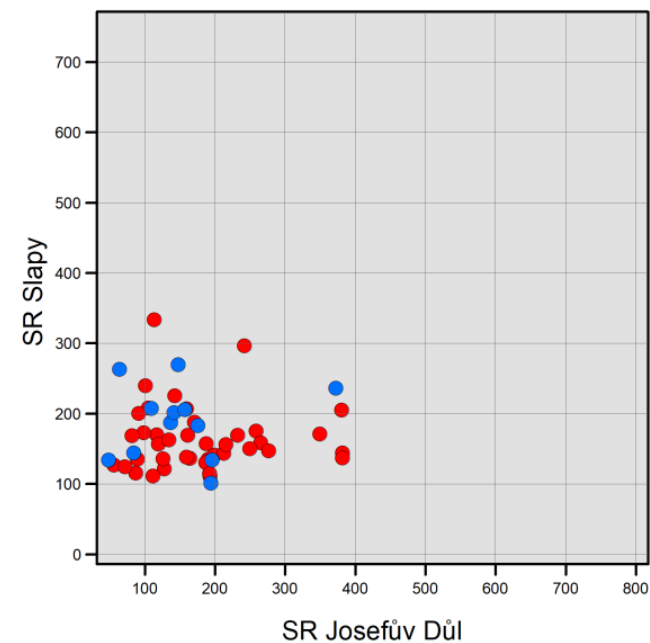
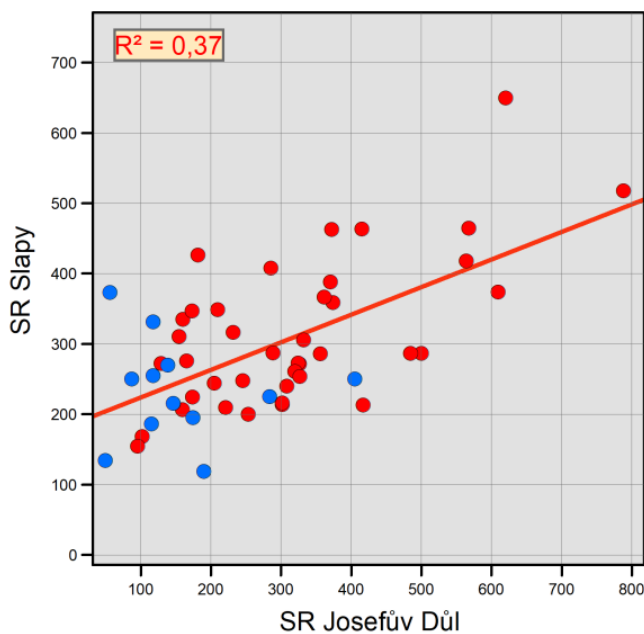
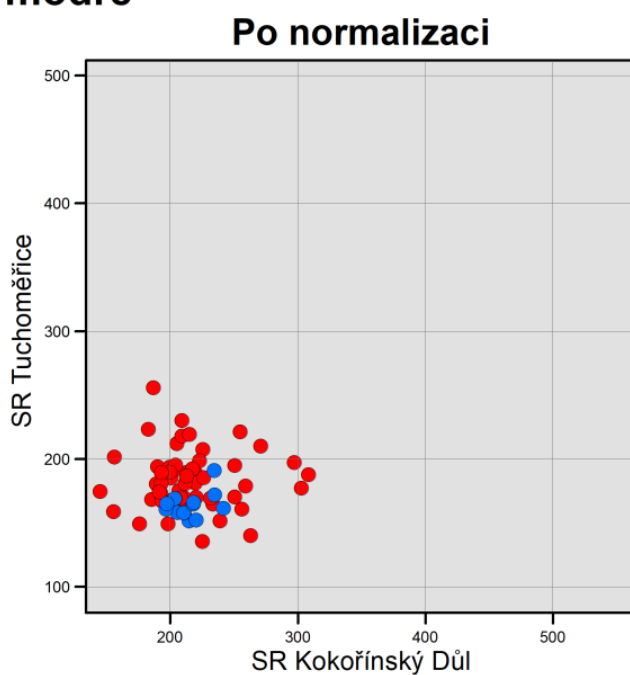
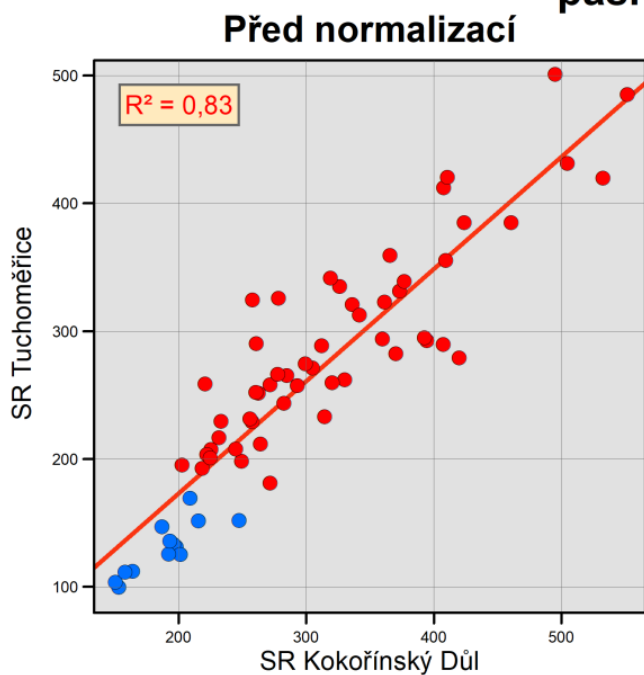
Před normalizací

Po normalizaci



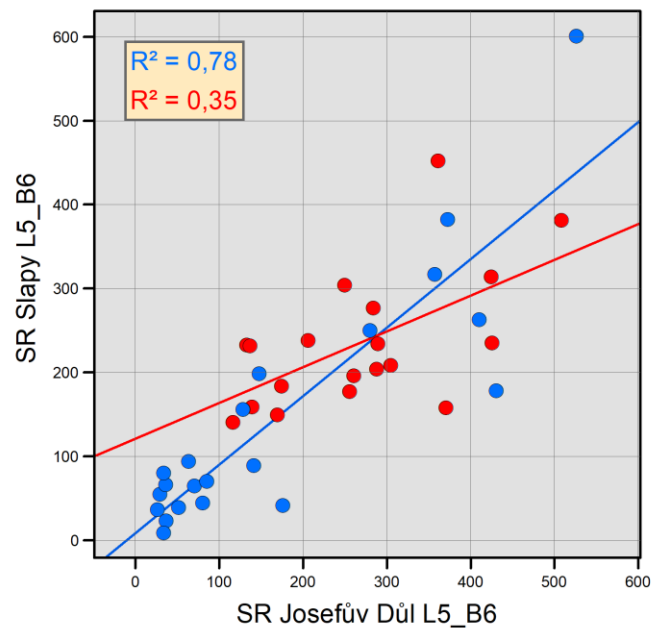
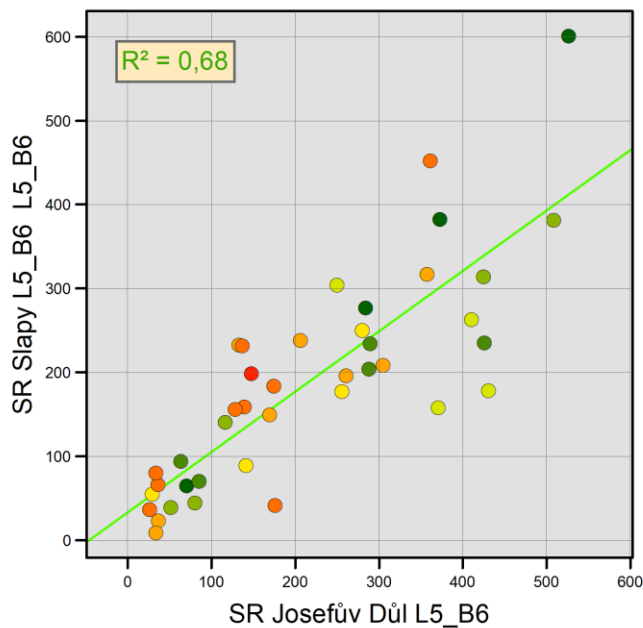
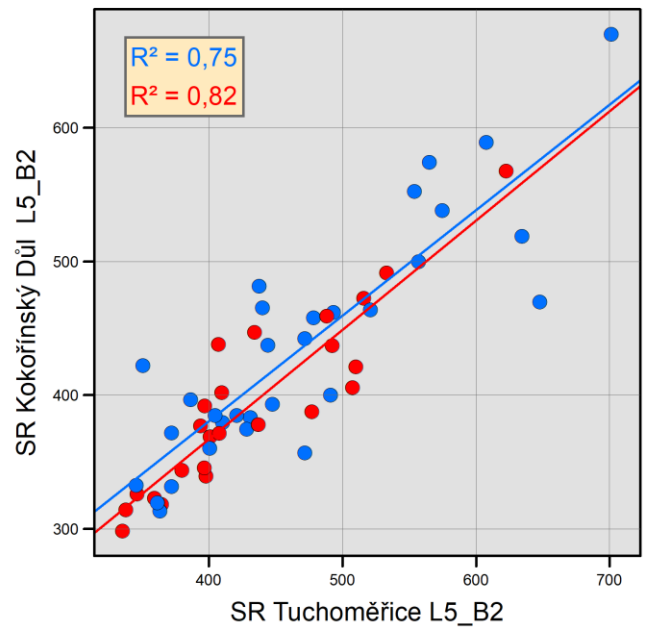
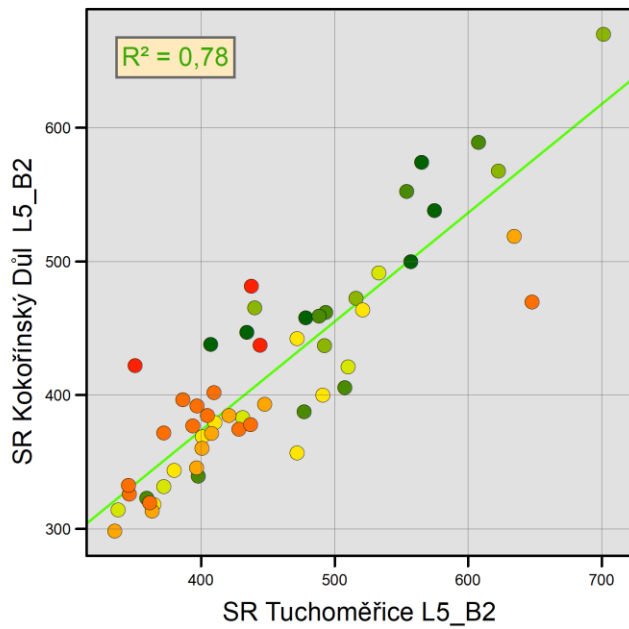
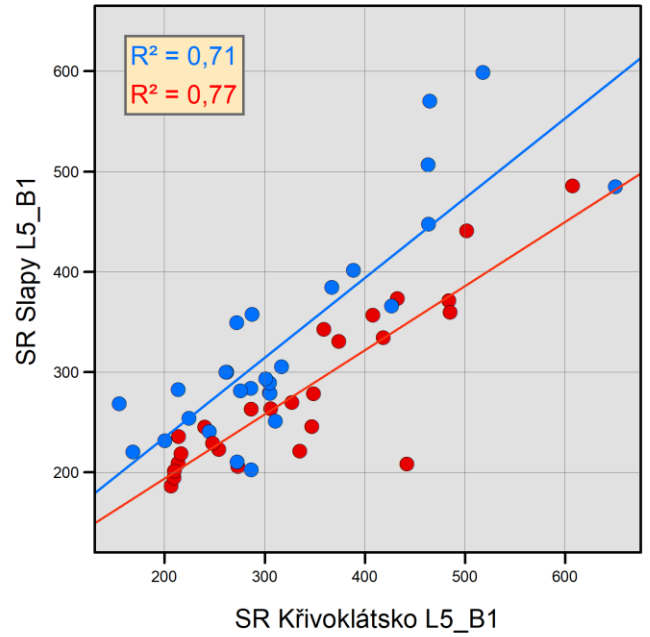
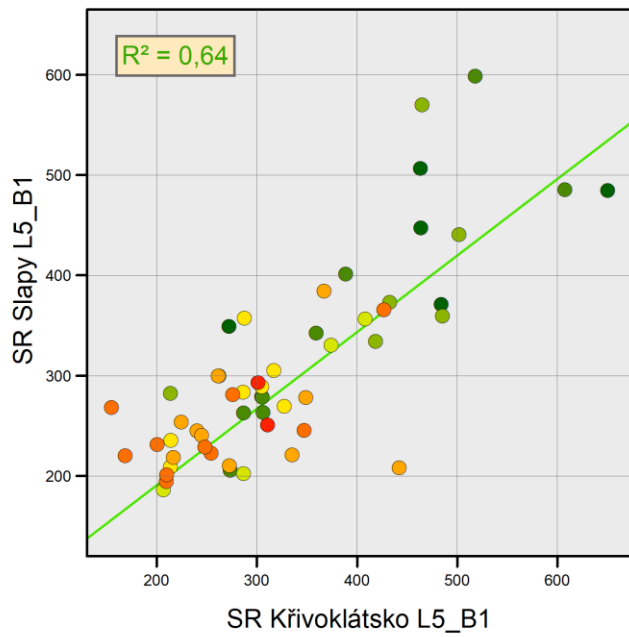
Na vertikální ose jsou hodnoty odrazivosti (SR)

Příloha 5: Korelace SR hodnot mezi jednotlivými lokalitami pásma modré



● SR hodnoty pro Landsat 8 ● SR hodnoty pro Landsat 5 — Lineární regrese

Příloha 6 Vliv data pořízení a potice WRS-2 na hodnoty snímků



Časové interval pořízení snímku				Pozice WRS-2	Přímky lineární regrese
● 1984-1985	● 1991-1994	● 2002-2004	● 2009-2010	● 191-025	— pro hodnoty z WRS-2 191-025
● 1986-1989	● 1998-2000	● 2005-2006	● 2011	● 192-025	— pro hodnoty z WRS-2 192-025