

UNIVERZITA KARLOVA
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Kartografie a geoinformatika



Bc. Martin Hofrajtr

VYUŽITÍ DÁLKOVÉHO PRŮZKUMU ZEMĚ PRO ZKOUMÁNÍ TEPLOTNÍCH CHARAKTERISTIK POVRCHU

TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF SURFACE
USING REMOTE SENSING METHODS

Diplomová práce

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

Praha 2019

Zadání diplomové práce

pro Bc. Martina Hofrajtra
obor Kartografie a geoinformatika

Název tématu:

Využití dálkového průzkumu Země pro zkoumání teplotních charakteristik povrchu

Zásady pro vypracování

Úkolem této diplomové práce je navržení a aplikace metody pro přesnější stanovení povrchových teplot v oblastech s heterogenním krajinným pokryvem, konkrétně v městských oblastech, z infračervených termálních dat Landsat 8.

Pro dosažení úkolu práce budou řešeny následující cíle:

- Shrnutí dosavadního stavu poznání v oboru dálkového průzkumu Země v oblasti infračerveného termálního snímání pro analýzu povrchových teplot.
- Návrh a otestování metodiky pro přesnější stanovení povrchové teploty v městských oblastech s různorodým krajinným pokryvem. Specifický přínos navržené metodiky tkví v přesnějším stanovení emisivity povrchu a spektrálního záře opouštějící zemský povrch/land leaving radiance (Ramachandran et al., 2010) pro jednotlivé typy land cover.
- Pro stanovení přesnějších hodnot povrchové teploty dat Landsat bude aplikována subpixelová metoda s využitím leteckých snímků sensoru TASI-600.
- Klíčovými aspekty řešené metodiky pro výpočet povrchové teploty je: 1) přesné stanovení emisivity povrchu a 2) přesnější stanovení spektrálního záře opouštějící zemský povrch na subpixelové úrovni.
- Pro stanovení povrchové teploty v městském prostředí bude navržen a otestován klasifikační systém land cover.
- Dosažené výsledky povrchové teploty budou srovnány s tradičně používanými metodami, které se liší ve způsobu určení emisivity, jako např. metoda určení emisivity prahováním NDVI. Dosažené výsledky budou též porovnány s hodnotou povrchové teploty určené na základě TES (Temperature and Emissivity Separation) z leteckých dat.
- Na závěr bude připojena diskuze o přínosu nové metodiky, možnosti jejího dalšího zlepšení a využití v praxi.
- Pro konstrukci metody budou využita letecká a družicová data – konkrétně o letecká data z hyperspektrálních sensorů CASI-1500, TASI-600 a družicová data ze sensorů OLI a TIRS družice Landsat 8. Dále budou využita data spektrální odrazivosti materiálů ze spektrální knihovny ECOSTRESS SpecLib.
- Pro účely analýzy byla zájmovým územím zvolena centrální část města Brna.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: 60–80 stran

Seznam odborné literatury:

- GIANNINI, M., B., BELFIORE, O., R., PARENTE, C., SANTAMARIA, R. (2015): Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images – comparison of different methods using airborne thermal data. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, č. 3, s. 83–90.
- VAN DE GRIEND, A., A., OWE, M. (1993): On the relationship between thermal emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, č. 11, s. 1119-1131.
- QIN, Z., KARNIELI, A., BERLINER, P. (2001): A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, č. 22, s. 3719–3746.
- RAMACHANDRAN, B. A KOL. (2010): Land remote sensing and global environmental change: NASA's Earth observing system and the science of ASTER and MODIS. Springer Science & Business Media, 873 s.
- SOBRINO, J., A., OLTRA-CARRIÓ, R. A KOL. (2012): Emissivity mapping over urban areas using a classification-based approach: Application to the Dual-use European Security IR Experiment (DESIREX). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, č. 18, s. 141–147.
- ZEMEK, F. A KOL. (2014): Letecký dálkový průzkum Země. *Centrum výzkumu globální změny, AV ČR, v. v. i., Brno*, 155 s.

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

Konzultant diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 9. 1. 2019

Termín odevzdání diplomové práce: 31. 7. 2019

doc. RNDr. Přemysl Štych, Ph.D.

doc. Ing. Jan Kolář, CSc.

.....

.....

Vedoucí diplomové práce

Garant studijního oboru

V Praze dne 9. 1. 2019

Prohlášení

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

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

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

V Praze dne 31. 7. 2019

.....

Bc. Martin Hofrajtr

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu své diplomové práce doc. RNDr. Přemyslu Štychovi, Ph.D. za věnovaný čas a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Hanušovi, vedoucímu oddělení leteckých činností z Ústavu výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. – CzechGlobe za poskytnutí hyperspektrálních leteckých dat z území Brna a rady k jejich zpracování. Taktéž děkuji Ing. Vladimíru Jirkovi, CSc. z ENKI, o.p.s. za jeho rady v oblasti emisivity povrchů. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu nejen během zpracování této práce, ale i v průběhu celého studia.

Využití dálkového průzkumu Země pro zkoumání teplotních charakteristik povrchu

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je návrh metodiky pro zpřesnění hodnot povrchové teploty získané z družicových dat Landsat 8 v oblastech s různorodým krajinným pokryvem. V rešeršní části jsou popsány faktory ovlivňující vyzařování zemského povrchu. Taktéž jsou zde zmíněny současné metody používané ke zpracování infračervených termálních dat a k výpočtu povrchové teploty. V praktické části jsou popsána družicová a letecká data použitá v rámci analytického a verifikačního procesu. Všechny části využití metody vedoucí k subpixelové hodnotě povrchové teploty jsou podrobně popsány v metodické části. Výsledky jsou následně porovnány s verifikačními leteckými daty s lepším prostorovým rozlišením a taktéž se současně používanými metodami. Na závěr jsou zmíněny klady i zápory této metody a její možné vylepšení v budoucnu.

Klíčová slova: povrchová teplota, povrchová emisivita, družicová data, Landsat 8, letecká data, subpixelová metoda, Česká republika

Temperature characteristics of surface using remote sensing methods

Abstract

The aim of this thesis is to design a methodology for refining the land surface temperature values obtained from Landsat 8 satellite data in areas with diverse land cover. The research section describes factors influencing the radiation of the Earth's surface. Also mentioned are current methods used for processing infrared thermal data and calculate land surface temperature. The practical part describes satellite and airborne data used in the analytical and verification process. All parts of the applied method leading to the subpixel value of the land surface temperature are described in detail in the method part. The results are then compared with airborne verification data with better spatial resolution and with currently used methods. Finally, the pros and cons of this method and its possible improvement in the future are mentioned.

Key words: land surface temperature, land surface emissivity, satellite data, Landsat 8, airborne data, subpixel method, Czech Republic

OBSAH

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK	15
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	17
1. Úvod	19
2. Úvod do problematiky a literární rešerše	22
2.1 Elektromagnetické záření.....	22
2.1.1 Radiometrické veličiny	23
2.1.2 Elektromagnetické spektrum	25
2.1.3 Vznik záření a jeho zdroje	26
2.2 Infračervené termální záření.....	27
2.2.1 Faktory ovlivňující vyzařování.....	29
2.2.1.1 Termodynamická teplota.....	29
2.2.1.2 Emisivita.....	30
2.2.2 Předzpracování termálních dat	31
2.2.2.1 Radiometrická kalibrace	31
2.2.2.2 Geometrické korekce	33
2.2.2.3 Atmosférické korekce.....	33
2.2.3 Zpracování termálních dat	35
2.2.3.1 Stanovení jasové teploty	36
2.2.3.2 Stanovení emisivity	36
2.2.3.3 Stanovení termodynamické teploty	40
2.2.4 Zdroje termálních dat.....	40
3. Metodika	43
3.1 Analýza.....	43
3.1.1 Zájmové území.....	43
3.1.2 Použitá data.....	46
3.1.2.1 Družicová data	47
3.1.2.2 Letecká data.....	51
3.1.2.3 Spektrální knihovna	52
3.1.3 Použitý software	53
3.1.4 Pracovní postup.....	53
3.1.4.1 Určení tříd krajinného pokryvu zájmového území	55
3.1.4.2 Výpočet koeficientů spektrální záře $K_{L\lambda}$	59
3.1.4.3 Výpočet hodnoty normalizované spektrální záře $L_{\lambda N}$	61
3.1.4.4 Výpočet hodnoty subpixelové spektrální záře $L_{\lambda S}$	62
3.1.4.5 Výpočet povrchové teploty	63
3.2 Verifikace.....	63
4. Výsledky práce	65
4.1 Stanovené hodnoty povrchové teploty	65

4.2	Rozdíly v povrchové teplotě	68
4.3	Teplotní profil	69
4.4	Optimalizované hodnoty spektrální záře	71
5.	Diskuze.....	76
5.1	Zvolený pracovní postup	76
5.1.1	Data.....	76
5.1.2	Klasifikační systém	77
5.1.3	Určení koeficientů spektrální záře.....	78
5.2	Dosažené výsledky	79
5.3	Naplnění cílů a ověření hypotéz	80
5.4	Možnosti dalšího výzkumu	80
6.	Závěr	81
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	82
	SEZNAM ZDROJŮ	85
	SEZNAM PŘÍLOH	86

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

ASTER	Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer
AVHRR	Advanced very-high-resolution radiometer
BQA	Band quality assessment
BRDF	Bidirectional reflectance distribution function
BREFCOR	BRDF effects correction
CASI – 1500	Compact airborne spectrographic imager
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DMR 4G	Digitální model reliéfu České republiky 4. generace
DN	Digital number
DPZ	Dálkový průzkum Země
ESA	European space agency
ETM+	Enhanced thematic mapper plus sensor
FLAASH	Fast line-of-sight atmospheric analysis of hypercubes
GNSS/IMU	Global navigation satellite system / Inertial measurement unit
LOWTRAN	Low resolution transmission model
LSE	Land surface emissivity
LST	Land surface temperature
MERIS	Medium resolution imaging spectrometer
MODIS	Moderate resolution imaging spectroradiometer
MODTRAN	Moderate resolution atmospheric radiance and transmittance model
NASA	National aeronautics and space administration
NDVI	Normalized difference vegetation index
NOAA	National oceanic and atmospheric administration
OLI	Operational land imager
TASI – 600	Thermal airborne spectrographic imager
TES	Temperature emissivity separation algorithm ...
TIRS	Thermal infrared sensor
TM	Thematic mapper sensor
UA	Urban Atlas

USGS	United states geological survey
UTC	Universal time coordinated
UTM	Universal transverse mercator coordinate system
WGS-84	World geodetic system 1984
WRS	Worldwide reference system

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obrázek 2. 1: Elektromagnetická vlna a její složky	23
Obrázek 2. 2: Základní oblasti elektromagnetického spektra	25
Obrázek 2. 3: Závislost spektrálního vyzařování na termodynamické teplotě	27
Obrázek 2. 5: Spektrální křivky odezvy termálních pásem senzorů Landsat TM, ETM+ a TIRS	32
Obrázek 2. 6: Atmosférická okna a absorpční pásy	34
Obrázek 3. 1: Přehledové mapy zájmového území v Brně	44
Obrázek 3. 4: Denní chod teploty vzduchu ve dnech, kdy byla pořízena družicová (19. 8. 2018) a letecká (20. 8. 2018) data zájmového území v Brně	46
Obrázek 3. 3: Posloupnost kroků subpixelové metody s názornou ukázkou – tlustá čára značí původní pixel o velikosti 30 m, tenká čára pixel s lepším prostorovým rozlišením (zde 10 m)	54
Obrázek 3. 4: Klasifikované třídy krajinného pokryvu dle klasifikačního systému	58
Obrázek 4. 1: Mapy povrchových teplot	66
Obrázek 4. 2: Mapy rozdílů povrchových teplot od povrchových teplot stanovených z leteckých dat	68
Obrázek 4. 3: Teplotní profil	70
Obrázek 4. 4: Profil povrchových teplot	70
Obrázek 4. 5: Mapy povrchových teplot získaných z optimalizovaných hodnot spektrální záře	72
Obrázek 4. 6: Profil povrchových teplot získaných z optimalizovaných hodnot spektrální záře	73
Obrázek 4. 7: Mapy povrchových teplot získaných z optimalizovaných hodnot spektrální záře ve vybraných lokalitách	74
Obrázek 5.1: Změna jasové teploty odlišných typů zemského povrchu během dne	77
Tabulka 2. 1: Hlavní absorbenty elektromagnetického záření vzhledem k vlnové délce	34
Tabulka 2. 2: Třídy pro klasifikaci emisivity povrchu	38
Tabulka 3. 1: Hodnoty meteorologických ukazatelů v zájmovém území	46
Tabulka 3. 2: Pásmo, vlnové délky a prostorové rozlišení senzorů OLI a TIRS družice Landsat 8	49
Tabulka 3. 3: Klasifikační systém s hodnotami emisivity	57
Tabulka 3. 4: Hodnocení přesnosti klasifikace zájmového území – UP (uživatelská přesnost), ZP (zpracovatelská přesnost)	59
Tabulka 3. 5: Hodnoty průměrné spektrální záře L_{λ} jednotlivých tříd a jim přiřazených koeficientů spektrální záře $K_{L\lambda}$	61
Tabulka 4. 1: Průměrné teploty a směrodatné odchylky povrchových teplot jednotlivých tříd	67
Tabulka 4. 2: Absolutní rozdíly povrchových teplot v zájmovém území Brna	69
Tabulka 4. 3: Průměrné teploty a směrodatné odchylky povrchových teplot získaných z optimalizovaných hodnot spektrální záře ve vybraných lokalitách	75
Tabulka 4. 4: Absolutní rozdíly povrchových teplot z optimalizovaných hodnot spektrální záře	75

KAPITOLA 1

Úvod

Kontinuální měření teploty vzduchu probíhají již po několik století a jejich analýza je jedním ze základních parametrů pro hodnocení stavu počasí a podnebí i jejich případných změn. Data jsou však získávána pouze z lokálních měření a jejich aplikace na větší území celky může být problematická. Pozemní monitoring teplot vzduchu v současné době rozšiřují data o teplotě povrchu získávaná prostřednictvím dálkového průzkumu Země – tzv. infračervená termální data. Tento způsob získávání dat má výhodu především ve spojitých hodnotách teploty povrchu z celého zkoumaného území a v relativně krátkém intervalech mezi dvěma po sobě jdoucími měřeními. Termální data jsou využívána pro analýzu energetické bilance zemského povrchu (POKORNÝ A KOL. 2018), stavu vegetace a změn krajinného pokryvu (BERNALES A KOL. 2016), k monitorování efektu městských tepelných ostrovů (MAJKOWSKA A KOL. 2017) či k mapování výskytu požárů (SCHROEDER A KOL. 2016).

Stanovení přesných hodnot povrchové teploty je nejvíce ovlivněno určením dvou faktorů – stavu atmosféry a emisivity povrchu (WINDAHL, BEURS 2016). Atmosféra může při zvýšené koncentraci molekul plynných složek a aerosolů výrazně ovlivňovat množství naměřené zářivé energie vyzážené zemským povrchem. V případě analýzy absolutních hodnot teploty povrchu jsou tedy atmosférické korekce nedílnou součástí předzpracování dat. Emisivita povrchu hraje zásadní roli při převodu radiační teploty na termodynamickou teplotu povrchu. Nesprávnost jejího určení může výrazně ovlivnit výsledné hodnoty teploty, a tudíž vést k nesprávným závěrům. Emisivita se u většiny povrchů mění s vlnovou délkou a termodynamickou teplotou, její hodnota je však ovlivněna i barvou a drsností povrchu, obsahem vody (SNYDER A KOL. 1998) či úhlem pozorování (MCATEE A KOL. 2003).

V současné době je pro stanovení emisivity z družicových dat využíváno několik metod, jejich použitelnost je však limitována typem senzoru a počtem kanálů v infračervené termální části elektromagnetického spektra. U dat Landsat jsou nejvíce používány dvě metody – prahování emisivity z NDVI a analýza lineární kombinace emisivity. Předpokladem těchto metod však je, že většina zemského povrchu je pokryta vegetací nebo holými půdami; to však neplatí u městských oblastí, které jsou tvořeny

různorodými typy povrchu s odlišnými vlastnostmi v oblasti emisivity, ale i vyzařování v důsledku odlišných tepelných charakteristik – kondukce, konvekce a inercie.

Diplomová práce se zabývá možností přesnějšího stanovení povrchové teploty v oblastech s různorodým krajinným pokryvem, konkrétně s městskými povrchy. Motivací pro tuto práci byl fakt, že jeden pixel v městských oblastech neobsahuje pouze jeden typ krajinného pokryvu se stejnými vlastnostmi v oblasti emisivity a vyzařování a je nutné na něj nahlížet jako na mozaiku těchto vlastností. Cílem této práce je zpřesnění hodnoty povrchové teploty stanovené z družicových dat Landsat 8 na základě dat krajinného pokryvu zájmového území s lepším prostorovým rozlišením s přiřazenou informací o hodnotě pravděpodobné emisivity a spektrální záře. Výsledky této metody budou porovnány s výsledky metod používaných v současnosti a budou verifikovány nad daty povrchových teplot stanovených z leteckých infračervených termálních dat pořízených ve stejném termínu.

Hlavním cílem práce je stanovení přesnějších hodnot povrchové teploty v krajině s různorodým krajinným pokryvem, konkrétně s městskými povrchy, z družicových dat Landsat 8.

Dílčí cíle

1. Literární rešerše současného stavu poznání v oblasti infračerveného termálního snímání. Zjištění faktorů ovlivňujících naměřená data.
2. Srovnání výhod, nevýhod a omezení stávajících metod pro stanovení emisivity zemského povrchu a následně i povrchové teploty z družicových dat Landsat 8.
3. Návrh a implementace metody se schopností přesnějšího stanovení povrchové teploty z družicových dat Landsat 8.
4. Porovnání této metody se současně používanými metodami a její verifikace nad podrobnějšími leteckými daty ze stejného termínu.

Diplomová práce sestává ze dvou hlavních částí: 1) teoretické, s literární rešerší a vzhledem do aktuální problematiky infračerveného termálního snímání se zaměřením na družicová data Landsat 8; 2) praktické, obsahující metodický postup prací, analýzu metody a její vyhodnocení. Práce je rozdělena na šest hlavních kapitol.

Druhá kapitola se věnuje rešerši české a zahraniční literatury zabývající se: aktuálnímu stavu poznání v oboru dálkového průzkumu Země v infračervené termální části spektra, faktorům ovlivňujícím stanovení povrchové teploty z dat dálkového průzkumu, možnostem stanovování hodnot povrchových teplot z družicových dat Landsat 8 a uvedení problematických částí stávajících metod.

Ve třetí kapitole je uveden podrobný popis metodického postupu pro výpočet přesnějších hodnot povrchových teplot z družicových dat Landsat 8. Jednotlivé kroky metody jsou zde diskutovány a je uveden důvod jejich použití. Jsou zde popsány parametry všech využitých dat. Taktéž je zde uveden způsob hodnocení výsledků a seznam ostatních použitých metod, které byly použity pro porovnání výsledků nové metody.

Ve čtvrté kapitole jsou uvedeny výsledky použité metody doplněné o mapové výstupy, tabulky a grafy. Výsledky jsou vztaženy k verifikačním leteckým datům pořízených ve stejném termínu a jsou porovnány s výsledky současně používaných metod.

V páté kapitole je diskutována použitá metoda a její výsledky. Jsou zde zmíněny faktory omezující využití metody a nastíněna možná vylepšení, díky kterým by bylo možné metodu optimalizovat.

V poslední, tedy šesté kapitole jsou ještě jednou shrnuty dosažené výsledky a přínos nové metody v oblasti přesnějšího stanovení povrchové teploty z družicových dat Landsat 8. Jsou navrženy možné směry, kam by se budoucí výzkum v této oblasti mohl ubírat.

KAPITOLA 2

Úvod do problematiky a literární rešerše

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole této práce, povrchová teplota stanovená z družicových dat je zatížena nejrůznějšími vlivy v průběhu měření. Pro eliminaci těchto vlivů se používá řada metod, aby však bylo možné tyto metody zhodnotit z hlediska jejich aplikační vhodnosti, je nutné pochopit problematiku dálkového průzkumu v infračervené termální části spektra. Tato problematika je velice komplexní a je tedy nutné uvést i některé obecné základy dálkového průzkumu Země.

Dálkový průzkum je metoda, kterou jsou zjišťovány údaje o objektech, aniž by bylo nutné s nimi být v přímém kontaktu (KOLÁŘ 1990). V případě dálkového průzkumu Země se jedná o zkoumání zemského povrchu a spodních vrstev atmosféry měřením odraženého nebo vyzářeného elektromagnetického záření (DOBROVOLNÝ 1998). Základní principy elektromagnetického záření související s jeho vznikem, vlastnostmi a způsoby jeho měření jsou vysvětleny v následujících kapitolách. Pozornost je taktéž zaměřena na infračervené termální záření, konkrétně na jeho vlastnosti, interakci s prostředím, zdroje termálních dat, možnosti jejich zpracování a následné využití.

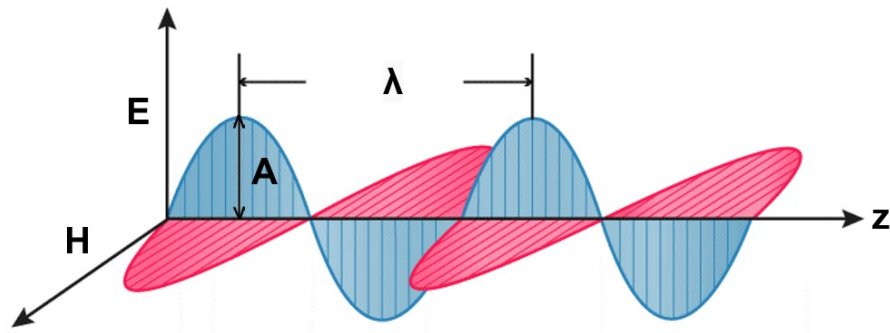
2.1 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření je projevem příčného vlnění elektromagnetického pole v prostoru. Elektromagnetická vlna má dvě od sebe neoddělitelné složky – elektrickou a magnetickou. Tyto složky periodicky mění velikost intenzity daného pole, jsou v každém okamžiku navzájem kolmé, mají stejnou fázi a jsou současně kolmé i ke směru šíření elektromagnetické vlny, viz Obrázek 2.1.

Každá elektromagnetická vlna je charakteristická následujícími parametry:

- amplituda A – maximální velikost periodicky se měnící veličiny
- vlnová délka λ [μm] – vzdálenost mezi stejnými velikostmi vlny
- perioda T [s] – doba trvání jednoho cyklu
- frekvence f [Hz] – počet cyklů za vteřinu
- směry E, H, z – směr šíření elektrické/magnetické energie a směr pohybu vlny

Obrázek 2. 1: Elektromagnetická vlna a její složky



Zdroj: vlastní tvorba dle BYJU's (2019)

Vlna se šíří prostředím ve směru pohybu rychlostí c , ovlivněnou elektromagnetickými vlastnostmi daného prostředí, tj. permitivitou, permeabilitou a konduktivitou¹, určenou Rovnicí 2.1.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \quad (2.1)$$

kde permitivita $\varepsilon [F \cdot m^{-1}]$ je fyzikální veličina vyjadřující vliv daného prostředí na elektrické pole, permeabilita $\mu [H \cdot m^{-1}]$ je fyzikální veličina, vyjadřující vliv daného prostředí na magnetické pole. Hodnoty těchto veličin ve vakuu jsou definovány jako konstanty a vychází z nich i hodnota rychlosti světla². Hodnoty permitivity a permeability v ostatních prostředích jsou vztaženy k vakuu a jedná se o tzv. relativní permitivitu a relativní permeabilitu; jejich velikost je taktéž závislá na vlnové délce.

2.1.1 Radiometrické veličiny

Aby bylo možné elektromagnetickou energii měřit, byly pro tyto účely definovány fyzikální veličiny. Problematice měření elektromagnetického záření se věnuje vědní obor radiometrie. Pro kvantitativní vyjádření hodnot naměřené energie přenesené tímto zářením se používají tzv. radiometrické veličiny³. V případě, že se tyto hodnoty měří pouze pro určitý interval vlnové délky, používáme pojem spektrální radiometrické veličiny; u symbolů se přidává index λ a u jednotek činitel μm^{-1} .

¹ Konduktivita $\sigma [S \cdot m^{-1}]$ je fyzikální veličina, vyjadřující schopnost prostředí vést elektrický proud.

² Rychlost světla c ve vakuu činí $299\,792\,458 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

³ Pro určování hodnot energie ve viditelné části spektra se používá termín **fotometrické veličiny**.

Základní radiometrickou veličinou je **zářivá energie** $Q_E [J]$, která vyjadřuje množství energie, které do svého okolí vyzářil daný zdroj záření za určitý čas. **Zářivý tok** $\Phi_E [W]$, někdy též nazýván jako zářivý výkon, vyjadřuje množství zářivé energie, které projde plochou za jednotku času t v určeném směru, viz Rovnice 2.2.

$$\Phi_E = \frac{\partial Q_E}{\partial t} \quad (2.2)$$

Zářivost $I_E [W \cdot sr^{-1}]$ vyjadřuje podíl zářivého toku bodového zdroje a jednotkového prostorového úhlu⁴ Ω v daném směru. Jedná se tedy o zářivý tok vyzářený zdrojem do jednotkového prostorového úhlu, viz Rovnice 2.3.

$$I_E = \frac{\partial \Phi_E}{\partial \Omega} \quad (2.3)$$

Zář $L_E [W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}]$, neboli radiance, vyjadřuje podíl zářivého toku plošného zdroje a jednotkového prostorového úhlu Ω v daném směru promítající se na jednotku plochy S , viz Rovnice 2.4.

$$L_E = \frac{\partial I_E}{\partial S \cdot \cos \alpha} \quad (2.4)$$

Intenzita vyzařování $M_E [W \cdot m^{-2}]$, neboli exitance, vyjadřuje množství zářivé energie, která je zdrojem vyzařována do okolního prostoru vztažená na jednotku plochy S za jednotku času t v určeném směru. Jedná se tedy o zářivý tok, který vyzařuje zdroj záření na jednotku plochy, viz Rovnice 2.5.

$$M_E = \frac{\partial \Phi_E}{\partial S} \quad (2.5)$$

Intenzita ozáření $E_E [W \cdot m^{-2}]$ vyjadřuje množství zářivé energie, která dopadá na jednotku plochy S za jednotku času v určeném směru. Jedná se tedy o zářivý tok, který ozářil jednotku plochy, viz Rovnice 2.6.

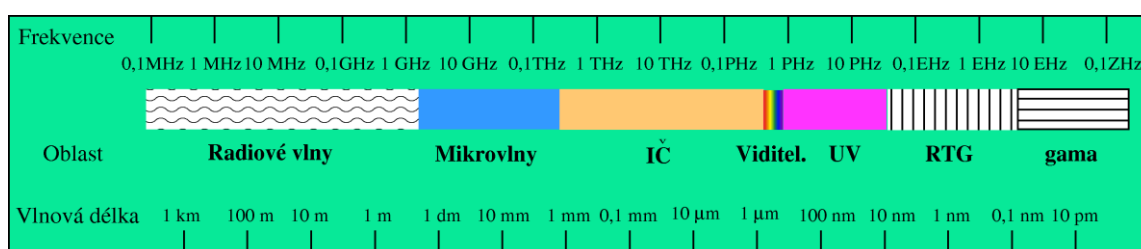
$$E_E = \frac{\partial \Phi_E}{\partial S} \quad (2.6)$$

⁴ Jednotkový prostorový úhel Ω , neboli **steradián**, je úhel vymezený na jednotkové kouli jednotkovou plochu. Tj. na kouli o poloměru 1 m vymezí plochu o velikosti 1 m².

2.1.2 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické záření všech přípustných vlnových délek je možné definovat jako spojitou stupnici, která nese název elektromagnetické spektrum. Spektrum je rozděleno na sedm základních oblastí podle společných charakteristik záření v daném intervalu vlnových délek, tj. záření radiové, mikrovlnné, infračervené, viditelné, ultrafialové, rentgenové a gama, viz Obrázek 2.2. Rozpětí těchto oblastí se však mohou dle jednotlivých autorů a oborů lišit a částečně i překrývat. Pro účely dálkového průzkumu se nejvíce využívají vlnové délky viditelného, infračerveného a mikrovlnného záření.

Obrázek 2. 2: Základní oblasti elektromagnetického spektra



Zdroj: WIKIPEDIA (2019A)

Viditelné záření, známější pod pojmem světlo, je elektromagnetické záření o vlnových délkách $\lambda = 0,400\text{--}0,720 \mu\text{m}$. Oblast viditelného záření je dále možné rozdělit na základě lidského vnímání specifických barev pro určité intervaly vlnových délek. Rozlišujeme viditelné záření: fialové, modré, zelené, žluté, oranžové a červené. Zdrojem tohoto záření je Slunce, proto je možné jej využívat pro účely dálkového průzkumu Země pouze během světlé části dne. Jeho další nevýhodou je vysoká míra ovlivnění záření při průchodu nehomogenním prostředím, např. atmosférou, a nutnost provádění atmosférických korekcí.

Infračervené záření je elektromagnetické záření o vlnových délkách $\lambda = 0,720\text{--}1000 \mu\text{m}$. Rozlišujeme infračervené záření: blízké, krátkovlnné, tepelné a vzdálené. Charakteristiky infračerveného záření s důrazem na tzv. termální část a jeho využitím pro dálkový průzkum jsou podrobně rozebrány v dalších kapitolách.

Mikrovlnné záření, též nazývané mikrovlny, je elektromagnetické záření o vlnových délkách $\lambda = 1 \text{ mm} - 1 \text{ m}$. Jeho nespornou výhodou pro účely dálkového průzkumu je schopnost šíření se prostředím i za horších atmosférických podmínek, tj. proniká oblačností či srážkami a také do určité hloubky pod povrch Země. Na odrazivost objektů

má pro tyto vlnové délky vliv především jejich drsnost a vlhkost. Pro snímání se využívají jak pasivní (mikrovlňný radiometr), tak aktivní přístroje (radar).

2.1.3 Vznik záření a jeho zdroje

Elektromagnetické záření vzniká pohybem nabitých částic uvnitř atomů. Nulový pohyb nastává pouze v případě, že je absolutní teplota daného objektu rovna nule; tzn., že každé těleso s absolutní teplotou vyšší než 0 K je zdrojem záření. Pro popis zákonů vyzařování bylo definováno tzv. **černé těleso**, někdy též absolutně černé těleso, černý zářič nebo ideální zářič, které je v těchto případech dokonalé těleso, které pohlcuje veškeré elektromagnetické záření všech vlnových délek dopadající na jeho povrch a zároveň ze všech těles o stejné termodynamické teplotě vyzařuje největší množství zářivé energie; tento fyzikální model popisuje **Kirchhoffův zákon záření**.

Závislost intenzity vyzařování černého tělesa M_0 na jeho teplotě T popisuje **Stefan-Boltzmannův zákon**. Ten říká, že celková intenzita vyzařování černého tělesa napříč všemi vlnovými délkami je přímo úměrná čtvrté mocnině jeho absolutní teploty, viz Rovnice 2.7.

$$M_0 = \sigma T^4 \quad (2.7)$$

kde σ vyjadřuje tzv. Stefan-Boltzmannovu konstantu⁵.

Závislost intenzity vyzařování černého tělesa na vlnové délce λ a teplotě T , tzv. spektrální intenzitu vyzařování $M_{0\lambda}$, popisuje **Planckův vyzařovací zákon**, viz Rovnice 2.8 a Obrázek 2.3.

$$M_{0\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right)} - 1} \quad (2.8)$$

kde h vyjadřuje tzv. Planckovu konstantu⁶, k tzv. Boltzmannovu konstantu⁷ a c rychlost světla.

Každé reálné těleso však vždy vyzařuje menší množství energie než černé těleso. Poměr mezi intenzitou vyzařování reálného M_R a černého M_0 tělesa o stejné

⁵ Stefan-Boltzmannova σ udává poměr intenzity vyzařování absolutně černého tělesa ke čtvrté mocnině jeho absolutní teploty; je rovna $5,670\,367 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$.

⁶ Planckova konstanta h je jedna ze základních fyzikálních konstant a udává základní kvantum fyzikální akce; je rovna $6,626\,070\,040 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

⁷ Boltzmannova konstanta k je jedna ze základních fyzikálních konstant a udává vztah mezi teplotou a energií plynu; je rovna $1,380\,648\,520 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$.

termodynamické teplotě se nazývá **emisivita** ε , kterou lze vyjádřit následujícím vztahem, viz Rovnice 2.9.

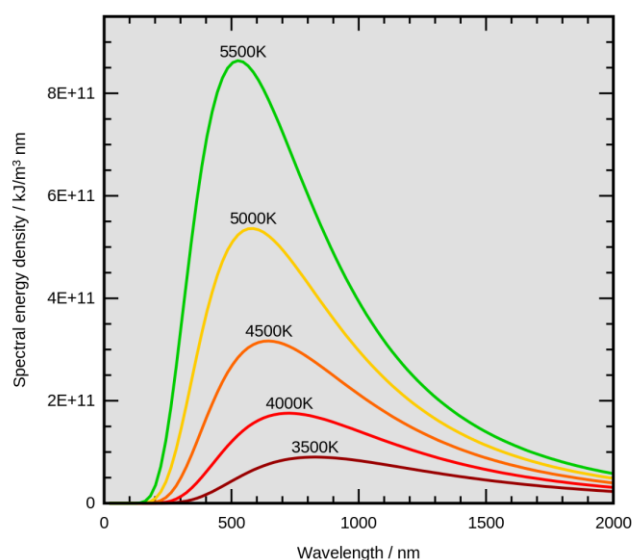
$$\varepsilon = \frac{M_R}{M_0} \quad (2.9)$$

Nepřímou úměru mezi vlnovou délkou s nejvyšší intenzitou vyzařování λ_{max} a teplotou T vyjadřuje **Wienův posunovací zákon**. Ten říká, že čím vyšší je termodynamická teplota tělesa, tím je maximální množství energie vyzářeno na kratších vlnových délkách, viz Obrázek 2.3. Tento vztah je definován Rovnicí 2.10.

$$\lambda_{max} = \frac{c}{T} \quad (2.10)$$

kde c vyjadřuje Wienovu konstantu⁸.

Obrázek 2. 3: Závislost spektrálního vyzařování na termodynamické teplotě



Zdroj: WIKIPEDIA (2019B)

2.2 Infračervené termální záření

Termální záření, též radiace, je proces vyzařování elektromagnetické energie daným tělesem v důsledku jeho nenulové vnitřní energie, jedná se tedy o jeden ze způsobů

⁸ Wienova konstanta posunu c je konstanta úměrnosti pro Wienův posunovací zákon; je rovna $2\,897,773\ \mu\text{m}\cdot\text{K}$.

předávání tepla (dalšími jsou kondukce⁹ a konvekce¹⁰). Jak vyplývá z Wienova posunovacího zákona, zemský povrch, který většinou nabývá termodynamické teploty mezi 270–300 K, vyzařuje maximální množství energie na vlnových délkách cca $\lambda = 8,8\text{--}10,7 \mu\text{m}$. Záření v této oblasti infračervené části elektromagnetického spektra tak bývá nazýváno infračervené termální záření, konkrétně se jedná o celý interval vlnových délek $\lambda = 3\text{--}15 \mu\text{m}$. Dálkový průzkum Země zde narozdíl od viditelného a mikrovlnného záření využívá odlišný typ měřené energie – neměří se množství energie odraženého záření, nýbrž množství energie, kterou objekty samy vyzařují.

Pro pochopení problematiky termálního snímání a jeho využití pro mapování teplotních charakteristik povrchu je důležité rozlišovat dva pojmy – teplo a teplota. **Teplo** $Q [J]$ je celková energie molekul daného objektu, respektive její změna. **Teplota** $T [K]$ je naměřená hodnota průměrné energie molekul daného objektu, která charakterizuje jeho tepelný stav. Teplotu lze dále dělit na – **termodynamickou** neboli absolutní, která je interním projevem energie molekul daného objektu, je měřena teploměrem přímo u objektu a přenáší se kondukcí nebo konvekcí; a **radiální** neboli jasovou, která je externím projevem energie molekul daného objektu, je měřena radiometrem na základě zářivé energie přenášené radiací a díky emisivitě je vždy menší než reálná termodynamická teplota objektu.

Infračervené termální záření kratších vlnových délek je využíváno v nočních hodinách, případně k pozorování fenoménů vyzařujících na těchto vlnových délkách, např. požárů či vulkanické činnosti. Infračervené termální záření delších vlnových délek je možné využít k analýze energetické bilance zemského povrchu, zkoumání krajinného pokryvu a jeho změn, hodnocení stavu vegetace a studiu evapotranspirace, monitorování efektu městských tepelných ostrovů, mapování výskytu minerálů a hornin či k modelování vodních a uhlíkových cyklů.

⁹ Kondukce neboli vedení tepla je proces, kdy daný objekt předává teplo, svojí vnitřní energii, druhému objektu přímým kontaktem s ním. Je typickým příkladem pro šíření tepla mezi objekty v pevném skupenství.

¹⁰ Konvekce neboli proudění je proces, kdy daný objekt předává teplo, svojí vnitřní energii, druhému objektu prouděním. Nedochozí k přímému kontaktu těchto dvou objektů – je tedy nutné, aby bylo mezi objekty látkové prostředí, kterým se teplo může pohybovat. Je typickým příkladem pro šíření tepla mezi objekty v kapalném a plynném skupenství.

2.2.1 Faktory ovlivňující vyzařování

Množství energie, které je objektem ve formě termálního záření určité vlnové délky vyzařeno do okolí, je závislé na jeho termodynamické teplotě a emisivitě; těmto faktorům je pozornost věnována hned v následující podkapitole. V případě, že je tato energie měřena metodou dálkového průzkumu Země, je však nutné uvažovat i faktory, které mají vliv na naměřené hodnoty, zejména interakci záření s atmosférou a se senzorem; tyto faktory jsou rozebrány následně v dalších kapitole.

2.2.1.1 Termodynamická teplota

Primárním zdrojem energie Země je krátkovlnné sluneční záření. Část této energie je odražena nebo absorbována atmosférou a oblačností. Zbylá část, přibližně 50 % původní energie, projde až k zemskému povrchu, kde je absorbována, přeměněna na teplo a ve formě dlouhovlnného infračerveného záření vyzařena zpět do prostoru. V atmosféře může být toto záření odraženo zpět k zemskému povrchu, absorbováno nebo propuštěno do vesmírného prostoru. Kromě získávání tepla formou slunečního záření či zpětně odraženého záření může zemský povrch měnit svou termodynamickou teplotu prostřednictvím konvekce ve formě proudění atmosféry a kondukcí ve formě vedení tepla zemským povrchem (ZEMEK A KOL. 2014).

Množství energie získané prostřednictvím slunečního záření závisí především na výšce Slunce nad obzorem¹¹ a jeho změna má výrazný vliv na roční chod teploty zemského povrchu. Dále hraje velkou roli reliéf (nadmožská výška, členitost, sklonitost a orientace), barva, tvar a struktura daného objektu. Množství energie získané prostřednictvím zpětně odraženého záření závisí na složení atmosféry a oblačnosti.

Množství energie získané prostřednictvím atmosférického proudění závisí na místním klimatu a počasí (teplotě, vlhkosti a tlaku vzduchu a rychlosti větru).

Množství energie získané prostřednictvím vedení tepla povrchem závisí na jeho fyzikálním a chemickém složení, které je určující pro základní tepelné vlastnosti povrchu – tepelnou kapacitu, konduktivitu a inercií. **Tepelná kapacita** $C [J \cdot K^{-1}]$ je vlastnost objektu, která vyjadřuje jeho schopnost udržet teplo, respektive množství tepla, které je potřebné k jeho ohřátí o 1 K. **Tepelná konduktivita** $k [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$, neboli vodivost, je

¹¹ Výška Slunce nad obzorem je závislá na zeměpisné šířce a poloze Země na oběžné dráze okolo Slunce – během roku se tedy mění.

vlastnost objektu, která vyjadřuje jeho schopnost vést teplo, respektive rychlost šíření tepla. **Tepelná inercie** I [$J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1/2}$], neboli setrvačnost, je vlastnost objektu, která vyjadřuje jeho schopnost odolávat změnám v teplotě, respektive rychlost změny jeho teploty. Tyto tepelné vlastnosti zemského povrchu zásadně ovlivňují denní chod jeho termodynamické teploty. Výrazný rozdíl v těchto vlastnostech lze pozorovat u odlišných typů krajinného pokryvu, kdy může být obrovské množství energie transformováno formou fázové přeměny vody při procesech výparu (evapotranspirace¹²) a následné kondenzace (POKORNÝ, HESSLEROVÁ A KOL. 2018)

2.2.1.2 Emisivita

Jak vyplývá z Rovnice 2.9, emisivita je určena poměrem intenzity vyzařování reálného tělesa ku intenzitě vyzařování černého tělesa. Jelikož je emisivita funkcí termodynamické teploty a vlnové délky, lze o ní mluvit jako o spektrální emisivitě ε_λ . přičemž je nutné původní rovnici doplnit o index λ , viz Rovnice 2.11.

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_{R\lambda}}{M_{0\lambda}}, \quad (2.11)$$

Jedná se o bezrozměrnou hodnotu, která může nabývat od 0 do 1, nemá tedy žádnou ustanovenou jednotku. Čím vyšších hodnot emisivita nabývá, tím větší je i schopnost daného objektu emitovat energii prostřednictvím elektromagnetického záření. V případě, že emisivita nabývá pro všechny vlnové délky a téže teplotu konstantní hodnoty, jedná se o tzv. **šedé těleso** (ARTIS A CARNAHAN 1982).

Znalost emisivity je zcela zásadní pro hodnocení tepelných charakteristik zemského povrchu z termálních dat. V důsledku rozdílné emisivity, a tedy rozdílných hodnot intenzity vyzařování, mohou objekty o stejné termodynamické teplotě vykazovat odlišné hodnoty radiační teploty¹³. Vztah mezi termodynamickou T_T a radiační teplotou T_R v závislosti na emisivitě vychází ze Stefan-Boltzmannova zákona a je vyjádřen Rovnicí 2.12.

$$T_R = \varepsilon^{\frac{1}{4}} \cdot T_T \quad (2.12)$$

¹² Evapotranspirace je součet veškerého výparu ze zemského povrchu do atmosféry. Výpar dešťové vody, vody z vodních ploch či vody z půdy je tzv. evaporace neboli vypařování, výpar z rostlin prostřednictvím listů je pak označován jako transpirace.

¹³ Radiační teplota nabývá vždy nižších hodnot než termodynamická teplota – žádný reálný objekt nemá vlastnosti černého tělesa.

Vyšší hodnoty emisivity obecně vykazují povrchy tmavé barvy, dále hrají roli i drsnost, struktura nebo obsah vody (SNYDER A KOL. 1998, ZHANG, WANG 2008). Rozhodujícím faktorem může být i anizotropie emisivity, tzn., že nejvyšší emisivita povrchu je vyzařována ve směru k němu kolmém (MCATEE A KOL. 2003). Většina povrchů, které je možné dálkovým průzkumem detekovat, nabývá emisivity v rozmezí 0,70–0,95. Jsou však i případy, kdy má povrch emisivitu výrazně nižší, např. u lesklých kovových střeš.

2.2.2 Předzpracování termálních dat

Surová termální data ve formě DN hodnot jsou zatížena chybami vzniklými v průběhu měření. Pro jejich odstranění a zpětné převedení hodnot na radiometrické veličiny se používá sled kalibrací a korekcí – radiometrické kalibrace, atmosférické korekce, geometrické korekce. Jejich provedení je nezbytné pro správnou interpretaci dat.

2.2.2.1 Radiometrická kalibrace

Záření měřené radiometrem je ukládáno jako digitalizovaný signál ve formě DN hodnot¹⁴. Pro jeho převod na hodnoty spektrální záře L_λ , se využívají radiometrické korekce. Přesněji se jedná o spektrální zář v horní vrstvě atmosféry L_{TOA} (z angl. top of atmosphere), tedy přímo u senzoru, protože doposud nebyly provedeny korekce odstraňující vliv atmosféry. Lineární závislost naměřené spektrální záře s přiřazenou DN hodnotou lze vyjádřit následovně, viz Rovnice 2.13.

$$L_{TOA} = a \cdot DN + b \quad (2.13)$$

kde a vyjadřuje multiplikační konstantu, b aditivní konstantu. Obě konstanty jsou specifické pro daný senzor a danou vlnovou délku. Konstanty jsou určeny na základě měření zářivé energie dvou těles o známé teplotě a emisivitě přímo u senzoru. Jejich teplota by měla odpovídat teplotním extrémům, které mohou být senzorem změřeny na zemském povrchu. Jak uvádí QIN A KOL. (2001), rovnice vychází z Rovnice 2.14, vytvořené Markhamem a Barkerem z NASA v roce 1986.

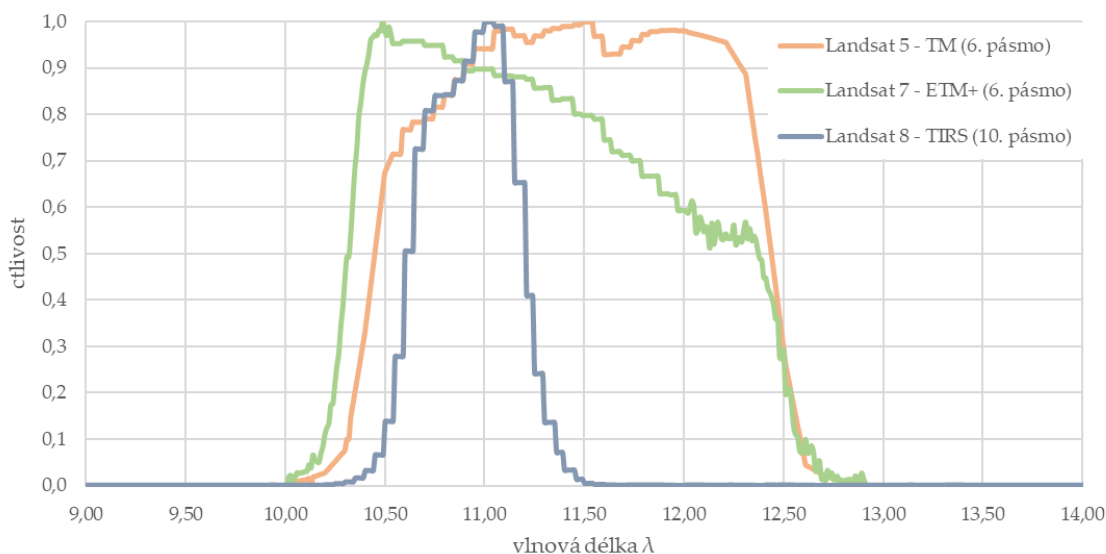
¹⁴ DN hodnota, z angl. digital number, je hodnota přiřazovaná pixelu na základě detekované velikosti dopadajícího záření. Rozpětí hodnot je vymezeno radiometrickou rozlišovací schopností daného senzoru udávanou bitech, např. 8bitová data mají 2^8 tedy 256 hodnot.

$$L_{\lambda} = L_{\min(\lambda)} + (L_{\max(\lambda)} - L_{\min(\lambda)}) \cdot \frac{DN}{DN_{\max}} \quad (2.14)$$

kde $L_{\min(\lambda)}$ a $L_{\max(\lambda)}$ vyjadřují minimální a maximální zaznamenanou spektrální zář a DN_{\max} maximální možnou DN hodnotu v závislosti na kapacitě paměti senzoru.

Přesnost přepočteného signálu je ovlivněna radiometrickou rozlišovací schopností, tedy rozsahem hodnot, kterých může digitalizovaný signál nabývat. Důležitá je taktéž spektrální rozlišovací schopnost, která udává, v jakém intervalu vlnových délek sensor zaznamenává dopadající zářivou energii. Se spektrální rozlišovací schopností se úzce pojí i citlivost radiometru, která bývá vyjadřována formou tzv. spektrální křivky odezvy, viz Obrázek 2.5. Její hodnoty bývají většinou zjištěné z laboratorních měření, křivka samotná pak ukazuje, v jakých vlnových délkách je sensor schopen detekovat největší podíl dopadajícího záření.

Obrázek 2. 4: Spektrální křivky odezvy termálních pásem sensorů Landsat TM, ETM+ a TIRS



Zdroj: vlastní tvorba dle dat z webové aplikace BARSİHO A KOL. 2003, 2005

Součástí radiometrické kalibrace může být také odstranění chyb způsobených nepřesností senzoru nebo jeho defektem. Konkrétně se může jednat o náhodné bitové chyby, chybějící řádky, páskování obrazu, nebo v případě senzoru TIRS družice Landsat 8 o zbloudilé záření, tzv. stray light USGS (2016), které kvůli nestejněměrnosti skenování či proměnlivosti chyby absolutní kalibrace znemožnilo využití termálních dat z 11. pásma (MONTANARO A KOL. 2015).

2.2.2.2 Geometrické korekce

Procesem geometrických transformací jsou upravována zkreslení způsobená nestálostí geometrických podmínek v průběhu měření, jejich aplikace je stejná jako u jiných dat dálkového průzkumu. Korigují se např. změny způsobené vlivem polohy, sklonu a rychlosti družice, rotací a zakřivením Země, či reliéfem zemského povrchu. Surová data taktéž neobsahují prostorovou informaci, a jsou proto nejprve ortorektifikována – původní hodnoty souřadnic x , y jsou transformovány¹⁵ do požadovaných souřadnic X , Y . Jednotlivé pixely jsou poté převzorkovány¹⁶ na požadovanou velikost. V případě, že měření neprobíhá v zenitní poloze, je nutné při geometrických měřeních uvažovat i úhel pozorování.

2.2.2.3 Atmosférické korekce

Atmosféra (plynný obal Země) výrazně ovlivňuje parametry odraženého nebo emitovaného elektromagnetického záření, a to především procesy rozptylu a pohlcování. Tyto jevy jsou způsobeny částicemi obsaženými v atmosféře, tj. molekulami plyných složek a aerosoly¹⁷, jejichž koncentrace a složení se mohou v různých vrstvách atmosféry měnit. Množství pohlceného záření či odraženého záření a jeho směr jsou závislé jak na vlnové délce záření, tak na množství, velikosti, tvaru a chemickém složení těchto částic, indexu lomu a úhlu, pod kterým záření s částicemi interaguje. Infračervené termální záření je ovlivňováno především pohlcováním, přičemž nejvýrazněji na něj působí zvýšené koncentrace ozonu (O_3), vodní páry (H_2O), oxidu uhličitého (CO_2) a metanu (CH_4), viz Tabulka 2.1. Pro účely družicových měření je nutné uvažovat délku dráhy v atmosféře, kterou musí záření překonat, než je změřeno; čím delší je tato vzdálenost, tím více je měřené záření atmosférou ovlivněno.

¹⁵ K transformaci souřadnic se používají různé typy transformací – podobnostní, afinní nebo polynomické 2. nebo 3. stupně. Využívány k tomu jsou tzv. vlíčovací body, tj. body o známé poloze, které lze jednoznačně identifikovat v daném snímku.

¹⁶ Převzorkování je proces, při kterém je měněna velikost pixelu a jeho sklon vzhledem k požadovanému souřadnicovému systému. Pro tento účel se využívají především tři metody – metoda nejbližšího souseda, bilineární interpolace a kubická konvoluce.

¹⁷ Aerosoly jsou heterogenní směs malých pevných nebo kapalných částic v plynném prostředí, např. prach, pyl, vodní pára.

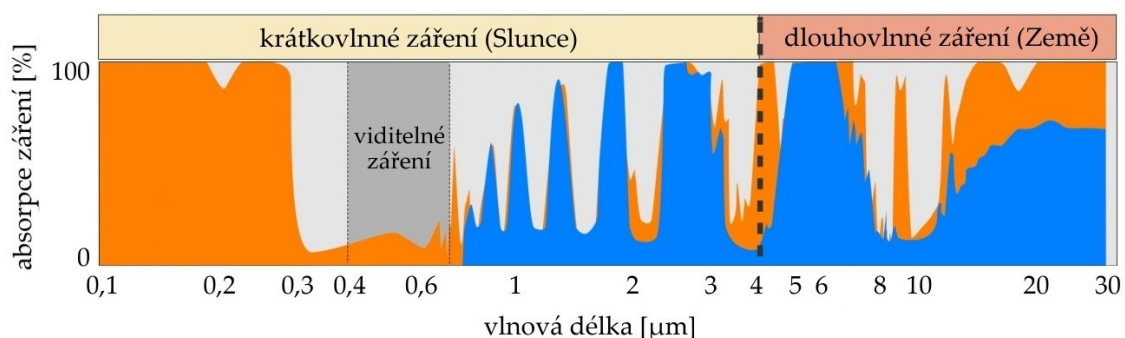
Tabulka 2. 1: Hlavní absorbenty elektromagnetického záření vzhledem k vlnové délce

Absorbent	Střed absorpčního pásu [μm]
vodní pára (H_2O)	0,9; 1,1; 1,4; 1,9; 2,7; 6,3
oxid uhličitý (CO_2)	2,7; 4,3; 15
ozon (O_3)	9,6
oxid uhelnatý (CO)	4,8
metan (CH_4)	3,3; 7,8
oxid dusný (N_2O)	4,6; 7,8

Zdroj: KOLÁŘ A KOL. 1997

Pro každou část elektromagnetického spektra jsou charakteristická tzv. **atmosférická okna**¹⁸ – intervaly vlnových délek, ve kterých je dané záření rozptylováno a pohlcováno atmosférou minimálně, a jsou tedy vhodné pro účely dálkového průzkumu Země. V infračervené termální části spektra se nachází dvě atmosférická okna, konkrétně se jedná o intervaly vlnových délek $\lambda = 3\text{--}5$ a $8\text{--}14$ μm , viz Obrázek 2.6. První atmosférické okno ($3\text{--}5$ μm) je během světlé části dne silně ovlivněno slunečním zářením o kratších vlnových délkách a využívá se tak především v nočních hodinách. Druhé atmosférické okno ($8\text{--}14$ μm) je využíváno pro účely DPZ nejvíce. Jeho hlavní výhodou je fakt, že v těchto vlnových délkách vyzařuje povrch Země nejintenzivněji a naměřené hodnoty nejsou ovlivněny slunečním zářením ani během denních hodin. Okolo vlnové délky $9,6$ μm je však tepelné záření pohlcováno ozonem a při konstrukci senzorů je potřeba brát tento fakt v potaz (JACKSON 2009).

Obrázek 2. 5: Atmosférická okna a absorpční pásy (modře – absorpce záření vodní parou, oranžově – ostatní absorbenty)



Zdroj: vlastní tvorba dle <http://elte.prompt.hu/>

¹⁸ Opakem atmosférických oken jsou **absorpční pásy** – intervaly vlnových délek, ve kterých je dané záření intenzivně pohlcováno atmosférou.

Atmosféra ovlivňuje termální záření zeslabováním a zpětným odrazem vyzařování zemského povrchu a vlastním vyzařováním atmosféry. Pro stanovení exaktních hodnot emisivity, respektive povrchové teploty jsou tedy atmosférické korekce nezbytnou součástí. Pro tyto účely se využívá tzv. **rovnice radiálního přenosu**, viz Rovnice 2.15, která upravuje naměřenou spektrální zář na horní hranici atmosféry L_{TOA} o vliv atmosféry a stanovuje hodnotu spektrální záře opouštějící zemské povrch L_T jakožto černého tělesa o teplotě T . Je však důležité uvažovat změnu parametrů rovnice v závislosti na změně vlnové délky.

$$L_T = \frac{L_{TOA} - (1-\varepsilon) \cdot L_{atm}^{\downarrow} - L_{atm}^{\uparrow}}{\varepsilon\tau} \quad (2.15)$$

kde ε vyjadřuje emisivitu zemského povrchu, τ transmisivitu neboli propustnost atmosféry, L_{atm}^{\downarrow} je zpětně odražené záření zemského povrchu, L_{atm}^{\uparrow} je přímé vyzařování atmosféry (MUÑOZ, SOBRINO 2006). Hodnoty transmisivity, zpětně odraženého záření zemského povrchu a přímého vyzařování atmosféry je možné zjistit např. z webové aplikace Atmospheric Correction Parameter Calculator (BARSÍ A KOL. 2003, 2005). Pro zpřesnění výsledků je možné výpočet doplnit o hodnoty nadmořské výšky, teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu v místě a čase měření. Taktéž byly pro tyto účely vyvinuty atmosférické modely, jmenovitě např. MODTRAN či LOWTRAN, které na základě informací z radiosond¹⁹ modelují pravděpodobné vlastnosti jednotlivých vrstev atmosféry pro zvolené místo a čas (ZHANG, WANG 2008).

2.2.3 Zpracování termálních dat

Jedním z cílů zpracování termálních dat je získání informace o absolutní teplotě zemského povrchu, případně o rozdílech, které na něm panují. Povrchovou teplotu lze považovat za indikátor vypovídající o transformaci slunečního záření (POKORNÝ, HESSLEROVÁ A KOL. 2018), ale i energie obecně, na zemském povrchu. Díky jejímu studiu je možné provádět management životního prostředí s důrazem na změnu krajinného pokryvu a využití vody v krajině.

¹⁹ Radiosondy jsou přístroje vypouštěné do výšky až 30–35 km nad zemský povrch, které měří teplotu, tlak a vlhkost vzduchu v jednotlivých částech atmosféry a pomáhají tak určovat její zvrstvení. Na základě signálu GPS je taktéž monitorována její poloha, která pomáhá s určováním směru a rychlosti větru v jednotlivých výškách atmosféry.

Povrchová teplota měřená prostřednictvím dálkového průzkumu Země, známá též pod angl. slovním spojením land surface temperature (LST), je obecný termín pro termodynamickou teplotu svrchní části zemského povrchu o mocnosti cca 50 μm (DOBROVOLNÝ, 1998). Svrchní částí je v tomto případě myšlen povrch, který je během měření k senzoru nejbližší; v případě vegetace je to tedy např. svrchní část koruny stromů či keřů, u domů např. střechy atd. Naměřená data však nemusí popisovat průměrnou teplotu jednoho typu povrchu, jelikož hodnota spektrální záře každého pixelu odpovídá průměrnému spektrální záře z celé plochy zemského povrchu, který je v pixelu zobrazen (BHATTACHARYA A KOL. 2018). Stejně je tomu i u hodnot emisivity.

V následujících třech kapitolách je popsány kroky a současně používané techniky sloužící ke stanovení povrchové teploty zemského povrchu. Při výpočtu této hodnoty musíme brát v úvahu, že je bezpodmínečně nutné určit jednu ze dvou neznámých – emisivitu nebo termodynamickou teplotu povrchu, viz Rovnice 2.12. Ve většině případů je stanovovanou proměnnou hodnota emisivity, povrchová teplota může být měřena lokálně v místě měření pro ověření teploty povrchu stanovené pomocí DPZ.

2.2.3.1 Stanovení jasové teploty

Díky předzpracování dat z Rovnice 2.15 je možné hodnoty spektrální záře opouštějící zemský povrch L_T jakožto černého tělesa o teplotě T převést na jasovou teplotu T_R , k čemuž slouží Rovnice 2.16 (USGS 2018A).

$$T_R = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_T} + 1\right)} \quad (2.16)$$

kde k_1 a k_2 vyjadřují kalibrační teplotní konstanty specifické pro daný senzor a danou vlnovou délku.

2.2.3.2 Stanovení emisivity

Základním problémem pro stanovení povrchové termodynamické teploty je neznalost další proměnné, kterou je emisivita. I v případě, že disponujeme termálními daty z více pásem, vždy je řešena rovnice s $n + 1$ neznámými, kde n je emisivita v n termálních pásmech a 1 je povrchová teplota (VALOR A CASELLES 1996). Emisivita se u většiny zemského povrchu pohybuje v intervalu 0,85–0,99 (LILLESAND, KIEFER 2000). Pokud bychom uvažovali průměrnou termodynamickou teplotu povrchu 290 K, při dosazení

mezních hodnot emisivity do Rovnice 2.12 bychom dosáhli až o 4 % větší hodnoty; v obou případech by při této povrchové teplotě rozdíl činil téměř 11 K. MUÑOZ A SOBRINO (2006) uvádí, že stanovení emisivity je hlavním zdrojem chyb při odvozování povrchové teploty – dle jejich měření může 10% chyba dosahovat rozdílu 4 K oproti reálné povrchové teplotě.

V současné době existuje několik metod pro odhad emisivity a teploty zemského povrchu, jejich použitelnost je však ovlivněná počtem termálních pásem, ve kterých byla data pořízena. Tato práce se zaměřuje na data Landsat a zmíněny tak budou pouze metody, které se zabývají stanovením emisivity u dat s jedním termálním pásmem²⁰ – tzv. absolutní emisivity (SOBRINO, MUÑOZ 2002).

Konstantní hodnota emisivity

Hodnota emisivity může být nastavena konstantní pro celé zájmové území. V případě, že se jedná o území s výrazným zastoupením odlišných povrchů, bude tato metoda vykazovat výrazné rozdíly od skutečné emisivity povrchu (GIANNINI A KOL. 2015). Lze ji tedy uplatnit pouze v situaci, kdy v zájmovém území převládá jeden typ krajinného pokryvu, jehož emisivitu známe. Ve většině případů se používá hodnota blízká 0,95, tedy hodnota na nejbližší emisivitě vegetace.

Klasifikace krajinného pokryvu

Lepších výsledků je možné dosáhnout pomocí klasifikace jednotlivých druhů povrchů, kterým je přiřazena odpovídající hodnota emisivity. Velice jednoduchou, avšak ne příliš exaktní metodu zvolili LI A KOL. (2012), kteří zkoumané území klasifikovali na čtyři třídy, konkrétně na vegetaci, holé půdy, vodní plochy a zastavěné plochy, kterým přiřadili konstantní hodnotu emisivity – 0,95, 0,92, 0,9925 a 0,923.

Obdobně postupovali i SNYDER A KOL. (1998), kteří pro stanovení emisivity vegetace a holých ploch využili data MODIS (postup lze uplatnit i u dat Landsat či AVHRR). Jejich předpokladem byl fakt, že emisivita není statická a může se měnit dynamicky se změnou ročního období, během dne nebo i kratšího intervalu. Na základě analýzy

²⁰ V případě dat Landsat se jedná pouze o jedno pásmo, s výjimkou u Landsat 8, který nabízí tato pásma dvě. Problémem však je špatná kalibrace senzoru pořizující data v 11. pásmu a ve většině případů se tedy používá téměř výhradně 10. pásmo.

několika stovek spekter bylo zvoleno 14 tříd přírodního krajinného pokryvu²¹, viz Tabulka 2.2, které vstupovaly do následné klasifikace.

Tabulka 2. 2: Třídy pro klasifikaci emisivity povrchu dle Snydera a kol. (1998)

mladý jehličnatý les	mladá lesnatá savana	vlhké holé půdy	voda
starý jehličnatý les	stará lesnatá savana	suché holé půdy	sníh, led
mladý listnatý les	mladá křovinatá savana		
starý listnatý les	stará křovinatá savana		
	mladá travnatá savana		
	stará travnatá savana		

Zdroj: vlastní tvorba dle SNYDER A KOL. (1998)

Ještě před klasifikací byl však vytvořen model, který jednotlivým druhům povrchu přiřazoval průměrnou hodnotu a rozptyl emisivity na základě jejich geometrických a objemových faktorů určených z obousměrné distribuční funkce odrazu záření (BRDF). Bylo zjištěno, že v případě suchých holých půd a stárnoucí vegetace je rozptyl emisivity značný. Nevýhodou této konkrétní metody byla absence faktoru vlhkosti v analýze; jak sami autoři uvádí, vlhkost a voda obecně může zvýšit emisivitu daného materiálu až téměř k hodnotě emisivity vody (cca 0,97).

Regresní analýza závislosti emisivity na NDVI

Určitý vztah mezi povrchovou teplotou a normalizovaným vegetačním indexem NDVI dal vzniknout dvěma metodám, které vychází z předpokladu, že většinu zemského povrchu tvoří vegetace a holé půdy (GIANNINI A KOL. 2015). První metoda využívá regresní analýzy závislosti emisivity na NDVI. Konkrétní analýza byla provedena na území savan v Botswaně, s výslednou hodnotou korelačního koeficientu rovnou 0,94 (VAN DE GRIEND, OWE 1993). Vztah závislosti mezi emisivitou a NDVI v intervalu 0,157–0,727 (ZHANG, WANG 2008) byl určen následovně, viz Rovnice 2.17.

$$\varepsilon = a + b \cdot \ln(NDVI), \quad (2.17)$$

kde $a = 1,0094$, $b = 0,047$ jsou koeficienty zjištěné z regresní analýzy a $NDVI$ je hodnota normalizovaného diferenčního vegetačního indexu vycházející z Rovnice 2.18.

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}, \quad (2.18)$$

²¹ Hlavním důvodem ustoupení od tříd umělých povrchů byla globální analýza emisivity – celosvětově tvoří umělé povrchy pouze malou část pevniny.

kde NIR vyjadřuje odrazivost v blízkém infračerveném pásmu a R odrazivost v červeném pásmu.

Tento model je však možné použít pouze v oblastech, které jsou klimaticky i vegetačně podobné analyzovanému území. VALOR A CASELLES (1996) uvádí, že v případě aplikace tohoto modelu na jiné oblasti, s odlišnými atmosférickými a geometrickými podmínkami (v Evropě se jednalo např. o území Francie a Španělska) se průměrná chyba ve stanovení emisivity pohybuje okolo 0,6 %. GIANNINI A KOL. (2015) zmiňují, že na základě jejich analýzy povrchové teploty, validovanou daty ze senzoru MERIS, se tato metoda pro stanovení emisivity hodí pro italské venkovské oblasti.

Prahování emisivity z NDVI

Druhá metoda vychází z analýzy SOBRINA A KOL. (2004), kteří modifikovali původní metodu Van de Grienda a Oweho. Na základě hodnoty NDVI, viz Rovnice 2.18, rozlišují tři typy krajinného pokryvu – vegetaci ($NDVI > 0,5$), holou půdu ($NDVI < 0,2$) a smíšený pokryv ($0,2 \leq NDVI \leq 0,5$). V případě, že je krajinný pokryv určen jako vegetace nebo holá půda, je mu přiřazena konstantní hodnota definovaná pro daný typ pokryvu, je-li však určen jako smíšený pokryv, je pro výpočet emisivity využita Rovnice 2.19.

$$\varepsilon = m \cdot P_V + n \quad (2.19)$$

kde m a n jsou koeficienty emisivity, a P_V je vegetační poměr. Koeficienty emisivity lze vyjádřit následovně, viz Rovnice 2.20 a 2.21.

$$m = \varepsilon_v - \varepsilon_s - (1 - \varepsilon_s) \cdot F \cdot \varepsilon_v \quad (2.20)$$

$$n = \varepsilon_s + (1 - \varepsilon_s) \cdot F \cdot \varepsilon_v \quad (2.21)$$

kde ε_v vyjadřuje emisivitu vegetace, ε_s emisivitu holé půdy a F tvarový faktor. Jako emisivita vegetace byla autory zvolena hodnota 0,99, kterou považují jako průměrnou. Podobně tomu bylo u emisivity holých půd, která byla vypočtena jako průměr ze 49 spekter všech půd ve spektrální knihovně ASTER a byla stanovena na hodnotu 0,973. Tvarový faktor byl taktéž zvolen jako průměrná hodnota, konkrétně 0,55, uvažující rozdílné geometrické rozložení povrchu. Vegetační poměr poté vychází z Rovnice 2.22.

$$P_V = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (2.22)$$

kde $NDVI$ vyjadřuje hodnotu normalizovaného diferenčního vegetačního indexu, viz Rovnice 2.18, $NDVI_{min}$ a $NDVI_{max}$ stanovené prahy rozlišující mezi smíšeným pokryvem

a vegetací, respektive holými půdami, tedy 0,2 a 0,5. Rovnici 2.22 je pak možné doplnit o zjištěné hodnoty koeficientů m a n a zapsat ji jako Rovnici 2.23.

$$\varepsilon = 0,004 \cdot P_V + 0,986 \quad (2.23)$$

Ačkoli má metoda dobré výsledky (chyba stanovené emisivity do 2 %), je použitelná pouze pro oblasti s vegetací. V případě území s povrchy o vysoké emisivitě (voda, sníh) může metoda vykazovat větší chybovost (SOBRINO A KOL. 2004).

2.2.3.3 Stanovení termodynamické teploty

Z korigovaných hodnot radiační teploty T_R a emisivity ε je možné určit termodynamickou teplotu zemského povrchu T_T , viz Rovnice 2.24 (ARTIS, CARNAHAN 1982) vycházející z inverze Planckova vyzařovacího zákona.

$$T_T = \frac{T_R}{1 + \frac{\lambda \cdot T_R}{\left(\frac{h \cdot c}{k}\right) \ln \varepsilon}} \quad (2.24)$$

kde λ vyjadřuje vlnovou délku daného kanálu a senzoru, ε emisivitu zemského povrchu pro danou vlnovou délku, h Planckovu rovnou $6,626\ 070\ 040 \times 10^{-34}$ J·s, k Boltzmannovu konstantu rovnou $1,380\ 648\ 520 \times 10^{-23}$ J·K⁻¹ a c rychlost světla rovnou $2,997\ 924\ 58 \times 10^8$ m·s⁻¹ ve vakuu. Přičemž $\frac{h \cdot c}{k}$ lze vyjádřit konstantu rovnou $14\ 388$ $\mu\text{m} \cdot \text{K}$. Pro vyjádření termodynamické teploty ve stupních Celsia je nutné Rovnici 2.16 doplnit o odečet hodnoty -273,15, která v Celsiově teplotní stupnici odpovídá hodnotě absolutní nuly.

2.2.4 Zdroje termálních dat

Pro získávání infračervených termálních dat se používá celá řada nosičů a senzorů. Nosiče mohou být pozemní, letecké i družicové. U pozemních senzorů snímajících radiační teplotu můžeme rozlišovat bodové (pyrometr) a plošné (termokamery) systémy (ZEMEK A KOL. 2014). V případě leteckých nosičů jsou využívány především maticové termokamery, u družicových nosičů jsou to pak skenovací systémy.

Stejně tak jako u optických či radarových dat je možné infračervená termální data dělit dle jejich rozlišovací schopnosti – radiometrické, spektrální, prostorové a časové. **Radiometrické rozlišení** je velmi důležitým parametrem; jeho hodnota udávaná v bitech vyjadřuje schopnost radiometru rozlišit mezi jednotlivými hodnotami naměřené zářivé energie. Ve většině případů jsou pořizována 8–16bitová termální data,

tn. že je během měření rozlišováno $2^8-2^{16} = 256-65\,536$ hodnot, kterých může daný pixel nabývat. **Spektrální rozlišení** můžeme dělit dle počtu pásem a dle šířky pásem; do jisté míry jsou však tyto vlastnosti navzájem propojené. U termálních dat mohou být získávána širokospektrální a hyperspektrální data. Širokospektrální data zaznamenávají hodnoty zářivé energie do jednoho pásma náležící širokému intervalu vlnových délek z velké části atmosférického okna. Hyperspektrální data se liší tím, že zaznamenávají zářivou energii do více pásem, a to pouze v úzkých intervalech vlnových délek. Výhodou hyperspektrálních dat je možnost odhadování stavu atmosféry či emisivity přímo z těchto dat bez nutnosti doplňkových dat. **Prostorové rozlišení** lze vyjádřit velikostí nejmenšího prvku v obraze, tedy pixelu. Toto rozlišení je u termálních dat velmi proměnlivé; v případě družicových dat mohou velikosti pixelů nabývat hodnot v intervalu od 60 metrů až po kilometry, oproti tomu u leteckých dat to mohou být jednotky metrů nebo centimetrů. S tím úzce souvisí i velikost scény, respektive šířka záběru, kterou je senzor schopný postihnout – většinou čím vyšší je prostorové rozlišení, tím menší je šířka záběru. Zároveň je nutné počítat s tím, že pokud senzor snímá zemský povrch v jiné než zenitní poloze, skutečné prostorové rozlišení se snižuje s narůstajícím úhlem pořízení scény (GISAT). **Časové rozlišení** je specifickým rozlišením senzorů u družicových nosičů a udává, jaký je interval mezi dvěma po sobě jdoucími měřeními téhož území. U polárních drah se měření opakuje většinou v době cca 16 dní v závislosti na výšce družice a šířce záběru, u geostacionárních drah je snímáno stále stejné území - a to až několikrát denně - avšak s výrazně nižším prostorovým rozlišením, než je tomu u polárních drah.

Družicové senzory pořizující infračervená termální data mohou obíhat po geostacionárních drahách (data slouží především pro meteorologické účely, mají nízké prostorové rozlišení, ale pořizují data v krátkých intervalech) a polárních drahách (slouží pro účely dálkového průzkumu Země, mají vysoké prostorové rozlišení, ale pořizují data v relativně dlouhých intervalech). Pro meteorologické účely jsou využívány například senzor AVHRR (Advanced very-high-resolution radiometer) spravovaný americkým Národním úřadem pro oceán a atmosféru (NOAA) či senzor Seviri na družicích Meteosat (MSG-2, MSG-3 a MSG-4) spravovaných evropskou mezinárodní organizací Eumetsat. Pro potřeby dálkového průzkumu Země jsou využívány například senzory ASTER na družici Terra, či MODIS na družicích Terra a Aqua spravovaných Národním úřadem pro letectví a kosmonautiku (NASA), senzor

SLSTR na družicích Sentinel-3A a 3B spravovaných Evropskou kosmickou agenturou (ESA), či senzory TM, ETM+ a TIRS na družicích Landsat 5, Landsat 7 a Landsat 8.

KAPITOLA 3

Metodika

V předchozí kapitole byly uvedeny faktory ovlivňující přesnost stanovení povrchové teploty z infračervených termálních dat. Výrazná pozornost zde byla soustředěna na metody pro odhad emisivity povrchu, které se v současné době používají u dat Landsat, tedy u dat s pouze jedním infračerveným termálním kanálem. Byla také zmíněna omezení těchto metod a jejich zaměření na oblasti přírodního charakteru, tvořené převážně vegetací a holými půdami. Cílem této práce bylo vytvoření metody, která by dokázala s větší přesností stanovit povrchovou teplotu z družicových dat Landsat 8 v oblastech s různorodým krajinným pokryvem, konkrétně s městskými povrchy. Tyto povrchy však kromě odlišeného chování v oblasti emisivity mají odlišené chování i co se týče spektrální záře. Hypotézou bylo, že při podrobnější znalosti krajinného pokryvu je možné na základě znalosti pravděpodobné hodnoty emisivity a spektrální záře jeho jednotlivých částí zpřesnit hodnotu povrchové teploty na subpixelové úrovni – vytvoření tzv. subpixelové metody. Text následující kapitoly je pro přehlednost rozdělen na analytickou a verifikační část.

3.1 Analýza

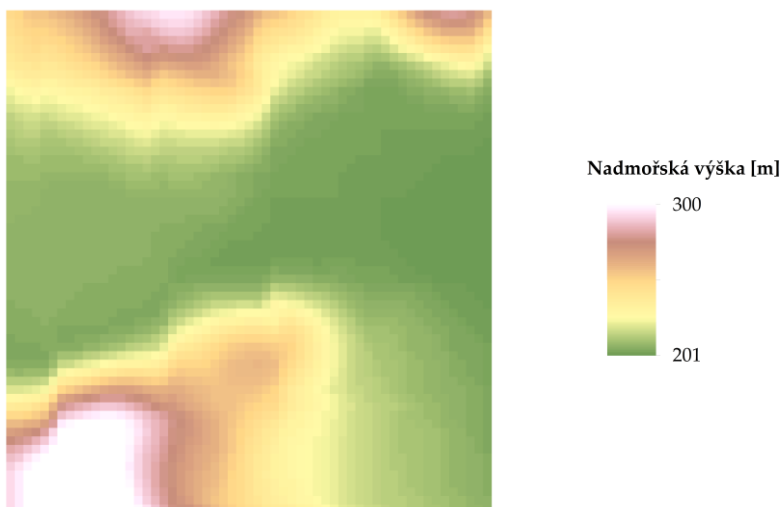
V analytické části jsou zmíněny informace o zájmovém území, použitých datech a využitém pracovním postupu. Pracovní postup je sepsán po jednotlivých krocích, doplněn o grafické a statistické výstupy, které slouží pro jeho snadnější pochopení a možné další využití či navázání na něj.

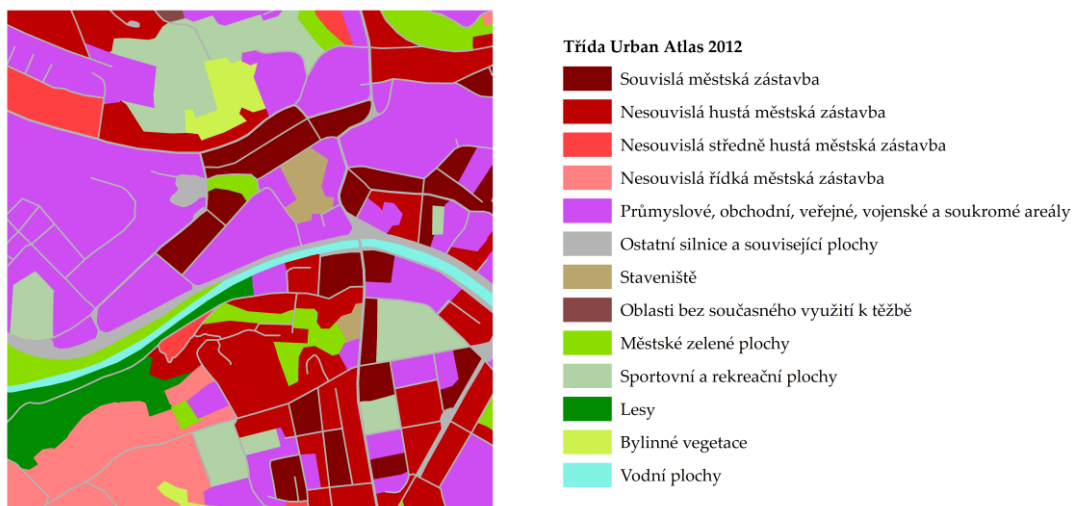
3.1.1 Zájmové území

Pro účely analýzy byla zájmovým územím zvolena centrální část města Brna, viz Obrázek 3.1 nahoře. Území má obdélníkový tvar, který vychází z průniku dostupných družicových i leteckých dat. Jeho délka je 1 710 m, šířka 1 770 m, zeměpisné souřadnice středu území odpovídají $49^{\circ} 11' 9,6252''$ s. š. a $16^{\circ} 35' 22,974''$ v. d. a jeho rozloha činí 302,67 ha. Naprostá většina území spadá pod městskou část Brno-střed, pouze jeho malá část v jihozápadní části spadá pod městskou část Brno-Bohunice. Nadmořská výška zájmového území se pohybuje mezi 200 a 300 m s průměrnou hodnotou 223 m n. m, viz

Obrázek 3.1 uprostřed. Ze středu území, tedy z údolí Svratky, vystupují směrem na sever a jihozápad dvě vyvýšeniny – Žlutý, respektive Červený kopec (ARCČR 2019). Co se týče krajinného pokryvu a využití ploch, největší část, celkem 33,02 % zájmového území, pokrývají dle URBAN ATLAS (2012) průmyslové, obchodní, veřejné, vojenské a soukromé areály. Velkou část, konkrétně 26,90 % území, pokrývá nesouvislá městská zástavba, oproti tomu městská souvislá zástavba tvoří pouze 9,43 %. Podobnou část pokrývají lesy, městské plochy zeleně a ostatní vegetace (10,19 %), silnice, staveniště a oblasti bez aktuálního využití (9,85 %) a sportovní a rekreační plochy (8,88 %). Vodní plochy, konkrétně řeka Svratka, tvoří pouze 1,73 % z celkové plochy zájmového území, viz Obrázek 3.1 dole.

Obrázek 3. 1: Přehledové mapy zájmového území v Brně – ortofoto (nahore), digitální model terénu (uprostřed) a Urban Atlas (dole)

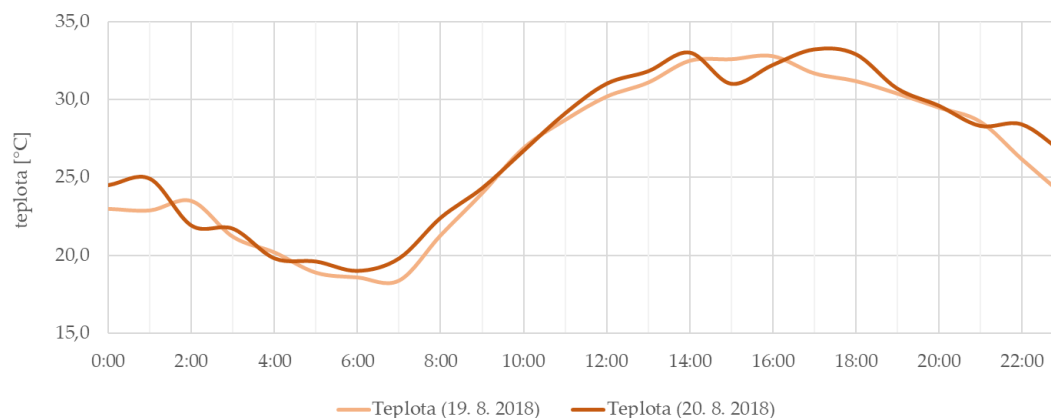




Zdroj: ČÚZK (2019), ARCČR (2019), THE URBAN ATLAS (2012)

V rámci analýzy i verifikace byla využita družicová a letecká data téhož území. Důležitými parametry pro jejich porovnatelnost jsou stejný nebo alespoň velmi blízký termín jejich pořízení a konstantní meteorologické podmínky v průběhu jejich získávání – družicová data zájmového území v Brně byla pořízena dne 19. 8. 2018, letecká data téhož území pak dne 20. 8. 2018. Letecká data byla pořízena mezi 12. a 13. hodinou středoevropského letního času; družicová data byla pořízena v 9:45 koordinovaného světového času (UTC), je však nutné připočítat +1 hodinu kvůli časovému posunu od Greenwich a +1 hodinu kvůli letnímu času, čas pořízení byl tedy 11:45. Časové rozmezí pořízení snímků je tedy cca 1 hodina 15 minut. Nejbližší meteorologickou stanicí poskytující data o počasí je meteorologická stanice s profesionální obsluhou a automatizovaným měřícím systémem v Brně-Tuřanech (49° 09' 11" s. š. a 16° 41' 20" v. d.), ležící jihovýchodním směrem od zájmového území v nadmořské výšce 241 m. Jak lze vidět na Obrázku 3.2, oba dny se v době pořízení dat vyznačovaly podobnými hodnotami teploty vzduchu.

Obrázek 3. 2: Denní chod teploty vzduchu ve dnech, kdy byla pořízena družicová (19. 8. 2018) a letecká (20. 8. 2018) data zájmového území v Brně



Zdroj: vlastní tvorba dle [HTTPS://WWW.IN-POCASI.CZ](https://www.in-pocasi.cz)

Stejnou věc lze vidět i v Tabulce 3.1, teploty vzduchu byly v obou dnech velice podobné s maximálním rozdílem 0,8 °C. Úhrn srážek byl v čas pořízení v obou dnech nulový. Jediný parametr, který by se výrazněji odlišuje více a mohl by ovlivnit srovnatelnost teplot povrchu, je rychlost větru. I přesto však byla data zhodnocena jako vhodná pro analýzu a verifikace metody použité v této práci.

Tabulka 3. 1: Hodnoty meteorologických ukazatelů v zájmovém území

Čas	Teplota [°C]		Rychlost větru [km/h]		Tlak vzduchu [hPa]		Úhrn srážek [mm]	
	19.8.2018	20.8.2018	19.8.2018	20.8.2018	19.8.2018	20.8.2018	19.8.2018	20.8.2018
10:00	26,9	26,7	14,4	7,2	1 020,0	1 016,0	0,0	0,0
11:00	28,7	29,1	14,4	10,8	1 019,0	1 015,0	0,0	0,0
12:00	30,2	31,0	7,2	14,4	1 019,0	1 015,0	0,0	0,0

Zdroj: vlastní tvorba dle [WWW.IN-POCASI.CZ](http://www.in-pocasi.cz)

3.1.2 Použitá data

V rámci analýzy a verifikace nové metody byla využita letecká a družicová data v rastrové podobě – konkrétně se jednalo o letecká data z hyperspektrálních senzorů CASI-1500, TASI-600 pro oblast Brna a družicová data ze senzorů OLI a TIRS družice Landsat 8. Dále byla využita data spektrální odrazivosti materiálů ze spektrální knihovny ECOSTRESS SpecLib. Tato zmíněná data jsou popsána podrobněji v následujících podkapitolách včetně informací o jejich předzpracování před samotnou aplikací dat při analýze metody. Pro zjištění doplňujících informací byla využita data

ČÚZK – Ortofoto České republiky, ArcČR 500 a databáze využití půd a krajinného pokryvu Urban Atlas 2012.

3.1.2.1 Družicová data

Program Landsat je dlouholetý projekt, který má za cíl získávat informace o Zemi prostřednictvím družicových misí. Jeho počátky je možné datovat až do poloviny šedesátých let, konkrétně do roku 1966. Projekt je v současné době řízen americkými vládními agenturami Národním úřadem pro letectví a kosmonautiku (NASA) a Úřadem pro geologický výzkum ve Spojených státech (USGS).

V práci byla využita data družice Landsat 8, která byla vypuštěna 11. února 2013. Družice obíhá po opakované slunečně synchronní oběžné dráze s inklinací cca 98,2° ve výšce 701–703 km nad zemským povrchem. Doba oběhu družice okolo Země je cca 99 minut²². Snímky, které byly pořízeny, pokrývají s výjimkou zeměpisných šířek vyšších než cca 82,5° celý zemský povrch.

Data jsou z družice průběžně odesílána na pozemní stanice, kde probíhá jejich následné zpracování a archivace. Pro katalogizaci, odkazování a jednoduché vyhledávání jednotlivých snímků slouží tzv. celosvětový referenční systém (Worldwide Reference System, zkráceně WRS). Každý snímek, který byl družicemi Landsat pořízen, byl vytvořen pro určitou scénu²³. Každá scéna má definované jedinečné označení určené jejím umístěním v rámci tohoto systému, který je složen z drah (paths) a řádků (rows)²⁴. Data z družic Landsat 1–3 využívaly WRS-1, novější data již WRS-2. Nutnost vytvoření nového referenčního systému pro číslování scén byla způsobena odlišnými parametry oběžných drah, a tedy i jinou velikostí scén. Datové produkty jsou poskytovány prostřednictvím webových aplikací, např. USGS EarthExplorer. Zde je možné po bezplatné registraci na základě výběru požadované lokality a časového rozpětí²⁵ stahovat datové produkty konkrétních scén pořízené všemi družicemi.

²² Tento fakt zabezpečil navrácení družice do výchozího bodu po 16 dnech a opakování cyklu. V oblastech, kde se záběr družice překrývá, je časové rozlišení zkráceno na 8 dnů.

²³ Scéna je jasně definovaná část zemského povrchu, která je v jednom okamžiku snímána družicí.

²⁴ WRS-1 obsahoval 251 drah s 246 řadami pro vzestupný uzel a 248 řadami pro sestupný uzel. WRS-2 obsahoval pouze 233 drah, počtem řad pro vzestupný i sestupný uzel se však od přechozího systému nelišil.

²⁵ Parametry výběru je možné dále upravovat, požadovat lze např.: určitou kvalitu zpracování datového produktu, maximální podíl oblačnosti v dané scéně, typ senzoru, ale i další.

Velmi důležitým krokem byla v roce 2016 reorganizace archivu dat Landsat, která obnášela harmonizaci těchto dat a jejich volné zpřístupnění veřejnosti formou datových produktů I. úrovně kolekce Landsat, tzv. Landsat Collection Level-1 Tiers. Datové produkty I. úrovně sestávají ze tří základních kategorií, které odpovídají kvalitě zpracování dat: I. stupeň (Tier 1 – T1), II. stupeň (Tier 2 – T2) a reálný čas (Real-Time – RT). Data I. stupně mají konečnou a nejvyšší kvalitu zpracování odpovídající požadavkům na zařazení do této kategorie USGS (2017). Data II. stupně mají konečnou, avšak ne nejvyšší kvalitu zpracování odpovídající požadavkům na zařazení do kategorie I. stupně. Data v reálném čase jsou zveřejněna do 12 hodin od pořízení a jsou zpracována pouze na základě odhadovaných parametrů korekcí; konečnou míru zpracování nabývají do 14–16 dní u Landsat 8 a do 26 dní u Landsat 7, dle jejich výsledné kvality jsou posléze zařazeny do první nebo druhé kategorie; původní dočasná data jsou smazána. Zmíněná kvalita zpracování je ovlivněna kvalitou provedených radiometrických, a především geometrických korekcí. Součástí harmonizace je standardizace parametrů²⁶, sjednocení názvů souborů a metadat.

Sjednocení názvu souboru bylo důležitým krokem pro jednoduché a jednoznačné vyhledávání dat. Jeho zápis vypadá následovně:

LXSS_LLLL_PPPRRR_YYYYMMDD_yyyymmdd_CC_TX

kde *L* vyjadřuje Landsat, *X* senzor (*C* = OLI/TIRS kombinovaný, *O* = OLI, *T* = TIRS, *E* = ETM+, *T* = TM, *M* = MSS), *SS* družici (05 = Landsat5, 07 = Landsat 7, 08 = Landsat 8), *LLLL* úroveň zpracování (L1TP/L1GT/L1GS), *PPP* dráhu letu v systému WRS, *RRR* řádek v systému WRS, *YYYYMMDD* rok, měsíc a den pořízení snímku, *yyymmdd* rok, měsíc a den zpracování snímku, *CC* úroveň kolekce, *TX* kategorii kolekce (USGS 2018B).

Metadata, která informují uživatele o vlastnostech konkrétního datového produktu, jsou rozdělena do několika souborů: Metadata pro senzor a scénu (soubor MTL.txt) obsahují základní informace o zpracování dat (radiometrické a geometrické korekce), obecných parametrech dat a usnadňují jejich vyhledávání v databázi. Důležitou součástí tohoto souboru jsou hodnoty koeficientů nutných pro přepočet DN hodnot na hodnoty

²⁶ Mezi standardizované parametry dat patří výstupní formát (GeoTIFF), převzorkování kubickou konvoluční metodou na velikost pixelu 30 m respektive 60 m, projekce UTM, respektive UPS, souřadnicový systém WGS-84.

odrazivosti a vyzařování či dalších požadovaných charakteristik. Metadata pro jednotlivé pixely jsou rozdělena do dvou souborů. První, tzv. Quality Assessment band (soubor BQA.tif), umožňuje zjišťovat, zda jednotlivé pixely neobsahují artefakty²⁷ nebo poukazovat na pravděpodobný výskyt oblačnosti. Jejich případný výskyt je díky nim možné filtrovat. Druhá (soubor ANG.txt), obsahuje úhlové koeficienty jedinečné pro daný okamžik měření, které jsou využitelné při aplikacích, kdy je nutné do výpočtů zařadit prvky geometrie jako nadmořskou výšku, sklon, aspekt, pozorovací úhel senzoru, úhel dopadu slunečního záření. Výsledná data jsou distribuována formou kalibrovaných DN hodnot, které mohou být díky současně dostupným metadatům koncovým uživatelem přepočteny na požadované hodnoty odrazivosti či vyzařování. Díky známé kvalitě a konzistenci výsledných datových produktů jsou zajištěny možnosti porovnávání dat z různých senzorů i různých časových období.

Na družici Landsat 8 se nachází dva senzory – OLI (Operational Land Imager) a TIRS (Thermal Infrared Sensor). Senzor OLI pořizuje data v 9 pásmech v optické části spektra, senzor TIRS slouží k pořizování infračervených termálních dat. Vlnové délky jednotlivých pásem a jejich prostorové rozlišení je uvedeno v Tabulce 3.2. Časové rozlišení, tedy interval pořízení obrazových dat jedné scény na území České republiky, je 16 dní, přičemž v místech, kde se jednotlivé scény překrývají může být tento interval snížen na 8 dní. Radiometrické rozlišení dat je při pořízení 12 bitů, data poskytovaná formou datových produktů I. úrovně mají rozlišení 16 bitů.

Tabulka 3. 2: Pásma, vlnové délky a prostorové rozlišení senzorů OLI a TIRS družice Landsat 8

Pásmo	Vlnová délka [μm]	Rozlišení [m]
1 – pobřežní / aerosoly	0,435–0,451	30
2 – modré	0,452–0,512	30
3 – zelené	0,533–0,590	30
4 – červené	0,636–0,673	30
5 – blízké Infračervené	0,851–0,879	30
6 – krátkovlnné Infračervené I.	1,566–1,651	30
7 – krátkovlnné Infračervené II.	2,107–2,294	30
8 – panchromatické	0,503–0,676	15
9 – krátkovlnné Infračervené III.	1,363–1,384	30

²⁷ Může se jednat např. o chybějící obrazové řádky (porucha senzoru ETM+).

10 – dlouhovlnné Infračervené I.	10,600-11,190	100 (30)
11 – dlouhovlnné Infračervené II-	11,500-12,510	100 (30)

Zdroj: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/>

Pro účely analýzy subpixelové povrchové teploty byla využita data pořízená 19. 8. 2018 pořízená v rámci scény 190-026; unikátním kód tohoto datového produktu je *LC08_L1TP_190026_20180819_20180829_01_T1*.

Je důležité zmínit, že infračervená termální data jsou poskytována pouze po předzpracování a jejich prostorové rozlišení je na základě kubické konvoluce uměle zvýšeno. Jelikož nebylo možné dohledat dat v původním prostorovém rozlišení 100 m, byla analýza i verifikace postupu provedena nad těmito dostupnými daty. Kvůli problémům s kalibrací 11. pásma bylo pro účely analýzy využito pouze 10. pásmo. Kromě termálních daty byly pro účely porovnání nové metody se současnými metodami využity také pásma 4 a 5, která sloužila pro výpočet NDVI.

Infračervená termální data ve formě DN hodnot byla před samotnou analýzou převedena na hodnoty spektrální záře L_λ v horní vrstvě atmosféry L_{TOA} , viz Rovnice 3.1.

$$L_{TOA} = a \cdot DN + b \quad (3.1)$$

kde a vyjadřuje multiplikativní konstantu 10. pásma senzoru TIRS rovnou $3,342 \cdot 10^{-4}$, b aditivní konstantu 10. pásma senzoru TIRS rovnou 0,1. Spektrální zář L_λ v horní vrstvě atmosféry L_{TOA} byla ještě korigována o atmosférické vlivy a byla převedena na hodnotu spektrální záře opouštějící zemský povrch L_T jakožto černého tělesa o teplotě T , viz Rovnice 3.2.

$$L_T = \frac{L_{TOA} - (1-\varepsilon) \cdot L_{atm}^\downarrow - L_{atm}^\uparrow}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

kde ε vyjadřuje emisivitu zemského povrchu, τ transmisivitu neboli propustnost atmosféry, L_{atm}^\downarrow je zpětně odražené záření zemského povrchu, L_{atm}^\uparrow je přímé vyzařování atmosféry. Hodnoty transmisivity, zpětně odraženého záření zemského povrchu a přímého vyzařování atmosféry byly zjištěny z webové aplikace Atmospheric Correction Parameter Calculator.

Multispektrální data senzoru OLI byla převedena na hodnoty spektrální záře L_λ v horní vrstvě atmosféry L_{TOA} dle stejné Rovnice 3.1. Lišily se však hodnoty konstant, zde a vyjadřuje multiplikativní konstantu 4. a 5. pásma senzoru OLI rovnou $9,7542 \cdot 10^{-3}$

a $5,9691 \cdot 10^{-10}$, b aditivní konstantu 4. a 5. pásma senzoru OLI rovnou $-48,77115$ a $-29,84511$. Spektrální zář L_λ v horní vrstvě atmosféry L_{TOA} byla převedena na hodnotu odrazivosti v horní vrstvě atmosféry ρ_{TOA} , viz Rovnice 3.3.

$$\rho_{TOA} = \pi \cdot L_{TOA} \cdot \frac{d^2}{ESUN_\lambda} \cdot \cos \theta_S \quad (3.3)$$

kde d vyjadřuje vzdálenost Země-Slunce v astronomických jednotkách, $ESUN_\lambda$ průměrnou intenzitu ozařování Sluncem a θ_S solární zenitový úhel. Všechny parametry jsou dohledatelné v souboru *.MTL v rámci datového produktu Landsat.

Pro výpočet odrazivosti v horní vrstvě atmosféry ρ_{TOA} byl využit modul FLAASH v programu ENVI, který koriguje hodnoty odrazivosti o atmosférické vlivy na základě atmosférického modelu MODTRAN.

3.1.2.2 Letecká data

Pro účely analýzy byla využita letecká hyperspektrální infračervená termální data pořízená v zájmovém území Brna. Data byla poskytnuta Oddělením leteckých činností ze společnosti CzechGlobe, spadající pro Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. Data byla pořízena dne 20. 8. 2018 mezi 12. a 13. hodinou stíracími (pushbroom) skenery se senzory CASI-1500 a TASI-600 na leteckém nosiči Cessna 208B Grand Caravan (CzechGlobe 2019). Celkové spektrální rozlišení senzoru je 8–11 μm , ve kterém byla pořízena data ve 24 jednotlivých pásmech. Prostorové rozlišení dat se pohybuje dle výšky senzoru nad terénem mezi 1,25–5 m.

Data byla v rámci oddělení plně předzpracována. Geometrické korekce, ortorektifikace a georeferencování dat byly provedeny metodu parametrického geokódování na základě dat pořízených GNSS/IMU jednotkou během měření a dat digitálního modelu terénu v programu GeoCorr (Itres Lts). Data byla projektována do souřadnicového systému UTM zóny 33N využívající jako referenční plochu elipsoid WGS 84 a převzorkována metodou nejbližšího souseda na požadovanou velikost, v tomto případě 0,8 m u dat ze senzoru CASI a 2 m u dat ze senzoru TASI (CzechGlobe 2019).

Data ze senzoru CASI byla předzpracována a byla poskytnuta ve formě hodnot odrazivosti na úrovni povrchu. Na data byly aplikovány radiometrické a atmosférické korekce. Radiometrické korekce byly provedeny v programu RadCorr (Itres Ltd) na

základě laboratorně určených kalibračních parametrů, které slouží pro převod surových dat ovlivněným šumem při měření (DN hodnoty) na hodnoty spektrální záře v horní vrstvě atmosféry. Pro eliminaci vlivu atmosféry na naměřená data byly taktéž provedeny atmosférické korekce, konkrétně se jednalo o využití radiativního modelu atmosféry MODTRAN a modulu BREFCOR pro minimalizaci BRDF efektu (CZECHGLOBE 2019).

Data ze senzoru TASI byla radiometricky korigována na základě kalibračních koeficientů získaných snímáním dvou kalibračních těles během letu, surová data (DN hodnoty) byla přepočtena na hodnoty spektrální záře v horní vrstvě atmosféry. Jejich převod na hodnoty spektrální záře opouštějící zemský povrch byla využita Rovnice 3.4 radiačního přenosu.

$$L_T = \frac{L_{TOA} - (1 - \varepsilon) \cdot L_{atm}^{\downarrow} - L_{atm}^{\uparrow}}{\varepsilon\tau} \quad (3.4)$$

kde L_{atm}^{\downarrow} vyjadřuje zpětně odražené záření zemského povrchu, L_{atm}^{\uparrow} přímé vyzařováním atmosféry a ε emisivitu zemského povrchu, τ transmisivitu neboli propustnost atmosféry. Zpětně odražené záření zemského povrchu, přímé vyzařováním atmosféry a transmisivita atmosféry byly stanoveny na základě radiativního modelu atmosféry MODTRAN 5.3 upraveným o aktuální data atmosféry zjištěná z dat MODIS a radiosond vypuštěných v termínu měření (CzechGlobe 2019).

Při verifikaci metody byla využita data povrchové teploty stanovené na základě algoritmu TES (Temperature and Emissivity Separation). Je důležité zmínit, že emisivita u lesklých kovových povrchů nebyla stanovena korektně a ve snímku se vyskytují oblasti s nesprávně sníženou povrchovou teplotu.

3.1.2.3 Spektrální knihovna

Pro účely zjištění emisivity byla kromě práce SOBRINA A KOL. (2012) využita spektrální knihovna ECOSTRESS SpecLib. Tato spektrální knihovna vychází ze tří již existujících spektrálních knihoven, konkrétně se jedná o knihovny patřící Univerzitě Johnse Hopkinse, Laboratoři JPL a Úřadu pro geologický výzkum ve Spojených státech (USGS).

Spektrální knihovna ECOSTRESS SpecLib byla vyvinuta jako součást projektu ECOSTRESS a ASTER a byla zveřejněna 2. února 2018. Knihovna obsahuje celkem 6051

vzorků²⁸ (přírodní i umělé materiály) uložených v textových souborech, přičemž každý vzorek má přiřazený jedinečný název. U vzorku jsou uvedeny důležité podrobnosti včetně informací o původu, detailním popisu, typu měření. Měřené hodnoty jsou vyjádřeny ve formě dvojice čísel – hodnota X reprezentuje vlnovou délku v μm , hodnota Y odrazivost v procentech.

3.1.3 Použitý software

Ke zpracování prostorových dat byl využit program ArcGIS 10.4 společnosti ESRI, pro klasifikaci leteckých hyperspektrálních dat pak program ENVI společnosti Harris Geospatial. Pro urychlení procesů a bezchybnost v průběhu zpracování metody byly některé její části automatizovány skripty napsanými v jazyce Python; pro účely napsání skriptu bylo využito vývojové prostředí PyCharm 2018.2. Analýza výsledků metody byla provedena v programu Microsoft Excel.

3.1.4 Pracovní postup

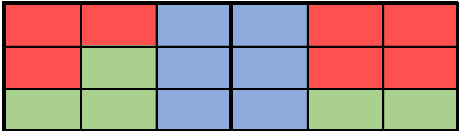
Uvedený postup subpixelové metody vychází z několika předpokladů. Prvním předpokladem je, že hodnota spektrální záře pixelu odpovídá průměrnému spektrální záři z celé plochy zemského povrchu, který je v pixelu zobrazen (BHATTACHARYA A KOL. 2018). V případě znalosti krajinného pokryvu zemského povrchu v lepším prostorovém rozlišení, než je tomu u původních multispektrálních a infračervených termálních dat Landsat 8 a znalosti poměru spektrální záře jeho jednotlivých částí, je možné hodnotu spektrální záře a následně i povrchové teploty z původního pixelu zpřesnit. Druhým předpokladem je, že je možné těmto jednotlivým částem povrchu přiřadit určitou hodnotu emisivity a to přesněji, než kdyby byla přiřazována původnímu pixelu. Třetím předpokladem je, že data využitá pro zjištění poměru spektrální záře jednotlivých částí povrchu byla pořízená ve stejném termínu a za stejných meteorologických podmínek, protože krajinný pokryv a jeho chování v oblasti vyzařování je časově i prostorově značně proměnlivý jev.

Postup sestává z několika dílčích kroků, kterými jsou – 1. Určení tříd krajinného pokryvu zájmového území, 2. Výpočet koeficientů spektrální záře $K_{L\lambda}$ těchto tříd,

²⁸ Zastoupení vzorků v knihovně je následující – antropogenní materiály (72), meteority (59), minerály (3104), nefotosyntetizující vegetace (122), horniny (647), půdy (120), vegetace (1918), voda (9).

3. Výpočet hodnoty normalizované spektrální záře $L_{\lambda N}$, 4. Výpočet hodnoty subpixelové spektrální záře $L_{\lambda S}$, 5. Výpočet hodnoty subpixelové povrchové teploty. Posloupnost jednotlivých kroků je popsána v následujícím textu; kroky jsou graficky vyjádřeny na Obrázku 3.3 včetně ukázkového příkladu.

Obrázek 3. 3: Posloupnost kroků subpixelové metody s názornou ukázkou – tlustá čára značí původní pixel o velikosti 30 m, tenká čára pixel s lepším prostorovým rozlišením (zde 10 m)

1. krok		určení tříd krajinného pokryvu dle klasifikačního systému																		
2. krok	<table border="1" data-bbox="454 719 914 848"> <tbody> <tr><td>1,0</td><td>1,0</td><td>0,8</td><td>0,8</td><td>1,0</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>1,0</td><td>0,9</td><td>0,8</td><td>0,8</td><td>1,0</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>0,9</td><td>0,9</td><td>0,8</td><td>0,8</td><td>0,9</td><td>0,9</td></tr> </tbody> </table>	1,0	1,0	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	přiřazení hodnoty koefficientu spektrální záře dle třídy krajinného pokryvu
1,0	1,0	0,8	0,8	1,0	1,0															
1,0	0,9	0,8	0,8	1,0	1,0															
0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9															
3. krok	<table border="1" data-bbox="454 889 914 1019"> <tbody> <tr><td>10,0</td><td>10,0</td><td>10,0</td><td>9,5</td><td>9,5</td><td>9,5</td></tr> <tr><td>10,0</td><td>10,0</td><td>10,0</td><td>9,5</td><td>9,5</td><td>9,5</td></tr> <tr><td>10,0</td><td>10,0</td><td>10,0</td><td>9,5</td><td>9,5</td><td>9,5</td></tr> </tbody> </table>	10,0	10,0	10,0	9,5	9,5	9,5	10,0	10,0	10,0	9,5	9,5	9,5	10,0	10,0	10,0	9,5	9,5	9,5	přiřazení hodnoty spektrální záře původního pixelu (30 m)
10,0	10,0	10,0	9,5	9,5	9,5															
10,0	10,0	10,0	9,5	9,5	9,5															
10,0	10,0	10,0	9,5	9,5	9,5															
	<table border="1" data-bbox="454 1037 914 1167"> <tbody> <tr><td>33,3</td><td>33,3</td><td>33,3</td><td>33,3</td><td>44,4</td><td>44,4</td></tr> <tr><td>33,3</td><td>33,3</td><td>33,3</td><td>33,3</td><td>44,4</td><td>44,4</td></tr> <tr><td>33,3</td><td>33,3</td><td>33,3</td><td>33,3</td><td>22,2</td><td>22,2</td></tr> </tbody> </table>	33,3	33,3	33,3	33,3	44,4	44,4	33,3	33,3	33,3	33,3	44,4	44,4	33,3	33,3	33,3	33,3	22,2	22,2	výpočet procentuálního zastoupení tříd krajinného pokryvu v původním pixelu (30 m)
33,3	33,3	33,3	33,3	44,4	44,4															
33,3	33,3	33,3	33,3	44,4	44,4															
33,3	33,3	33,3	33,3	22,2	22,2															
	<table border="1" data-bbox="454 1184 914 1314"> <tbody> <tr><td>11,1</td><td>11,1</td><td>11,1</td><td>10,4</td><td>10,4</td><td>10,4</td></tr> <tr><td>11,1</td><td>11,1</td><td>11,1</td><td>10,4</td><td>10,4</td><td>10,4</td></tr> <tr><td>11,1</td><td>11,1</td><td>11,1</td><td>10,4</td><td>10,4</td><td>10,4</td></tr> </tbody> </table>	11,1	11,1	11,1	10,4	10,4	10,4	11,1	11,1	11,1	10,4	10,4	10,4	11,1	11,1	11,1	10,4	10,4	10,4	výpočet hodnoty normalizované spektrální záře původního pixelu (30 m)
11,1	11,1	11,1	10,4	10,4	10,4															
11,1	11,1	11,1	10,4	10,4	10,4															
11,1	11,1	11,1	10,4	10,4	10,4															
4. krok	<table border="1" data-bbox="454 1355 914 1485"> <tbody> <tr><td>11,1</td><td>11,1</td><td>8,9</td><td>8,3</td><td>10,4</td><td>10,4</td></tr> <tr><td>11,1</td><td>10,0</td><td>8,9</td><td>8,3</td><td>10,4</td><td>10,4</td></tr> <tr><td>10,0</td><td>10,0</td><td>8,9</td><td>8,3</td><td>9,4</td><td>9,4</td></tr> </tbody> </table>	11,1	11,1	8,9	8,3	10,4	10,4	11,1	10,0	8,9	8,3	10,4	10,4	10,0	10,0	8,9	8,3	9,4	9,4	výpočet hodnoty subpixelové spektrální záře
11,1	11,1	8,9	8,3	10,4	10,4															
11,1	10,0	8,9	8,3	10,4	10,4															
10,0	10,0	8,9	8,3	9,4	9,4															
5. krok	<table border="1" data-bbox="454 1525 914 1655"> <tbody> <tr><td>310,3</td><td>310,3</td><td>295,0</td><td>290,9</td><td>305,8</td><td>305,8</td></tr> <tr><td>310,3</td><td>302,9</td><td>295,0</td><td>290,9</td><td>305,8</td><td>305,8</td></tr> <tr><td>302,9</td><td>302,9</td><td>295,0</td><td>290,9</td><td>298,6</td><td>298,6</td></tr> </tbody> </table>	310,3	310,3	295,0	290,9	305,8	305,8	310,3	302,9	295,0	290,9	305,8	305,8	302,9	302,9	295,0	290,9	298,6	298,6	výpočet hodnoty subpixelové jasové teploty
310,3	310,3	295,0	290,9	305,8	305,8															
310,3	302,9	295,0	290,9	305,8	305,8															
302,9	302,9	295,0	290,9	298,6	298,6															
	<table border="1" data-bbox="454 1673 914 1803"> <tbody> <tr><td>0,94</td><td>0,94</td><td>0,99</td><td>0,99</td><td>0,94</td><td>0,94</td></tr> <tr><td>0,94</td><td>0,95</td><td>0,99</td><td>0,99</td><td>0,94</td><td>0,94</td></tr> <tr><td>0,95</td><td>0,95</td><td>0,99</td><td>0,99</td><td>0,95</td><td>0,95</td></tr> </tbody> </table>	0,94	0,94	0,99	0,99	0,94	0,94	0,94	0,95	0,99	0,99	0,94	0,94	0,95	0,95	0,99	0,99	0,95	0,95	přiřazení hodnoty emisivity dle třídy krajinného pokryvu
0,94	0,94	0,99	0,99	0,94	0,94															
0,94	0,95	0,99	0,99	0,94	0,94															
0,95	0,95	0,99	0,99	0,95	0,95															
	<table border="1" data-bbox="454 1821 914 1951"> <tbody> <tr><td>41,6</td><td>41,6</td><td>22,5</td><td>18,4</td><td>37,0</td><td>37,0</td></tr> <tr><td>41,6</td><td>33,3</td><td>22,5</td><td>18,4</td><td>37,0</td><td>37,0</td></tr> <tr><td>33,3</td><td>33,3</td><td>22,5</td><td>18,4</td><td>28,9</td><td>28,9</td></tr> </tbody> </table>	41,6	41,6	22,5	18,4	37,0	37,0	41,6	33,3	22,5	18,4	37,0	37,0	33,3	33,3	22,5	18,4	28,9	28,9	výpočet hodnoty subpixelové termodynamické teploty
41,6	41,6	22,5	18,4	37,0	37,0															
41,6	33,3	22,5	18,4	37,0	37,0															
33,3	33,3	22,5	18,4	28,9	28,9															

Zdroj: vlastní tvorba

3.1.4.1 Určení tříd krajinného pokryvu zájmového území

Před samotným rozdělením zájmového území na jednotlivé třídy krajinného pokryvu bylo nutné vytvořit takový klasifikační systém, jehož třídy by uvažovaly odlišné chování povrchu jak ve vyzařování, tak i v emisivitě. Tento krok byl zcela zásadní pro celou následující analýzu a jeho přesnost významně ovlivnila výsledné hodnoty stanovené subpixelové povrchové teploty.

Klasifikační systém byl vytvořen primárně pro potřeby zpřesňování povrchové teploty na území měst a tomuto účelu bylo nutné uzpůsobit i složení tříd. Aby byl klasifikační systém jednoznačně aplikovatelný na různá zájmová území, bylo přistoupeno k určení takových tříd, které se v městech České republiky vyskytují nejčastěji. K rozdělení tříd dle emisivity bylo využito poznatků z práce SOBRINA A KOL. (2012), kteří se zabývali vytvořením mapy emisivity povrchu z hyperspektrálních leteckých dat na území španělského města Madridu. Jejich klasifikační systém s 12 třídami městských povrchů obsahoval hodnoty emisivity spočítané na základě algoritmu TES, doplněné o hodnoty emisivity spočítané ze spektrální knihovny ECOSTRESS SpecLib (ASTER), v šesti pásmech infračervené termální části spektra. Třídy z jejich klasifikačního systému byly použity i pro tuto práci, přičemž třída taškových střech byla pro účely metody použité v této práci z důvodu zvýšení přesnosti určování koeficientu spektrální záře (viz následující kapitola) rozdělena na střechy světlé a střechy tmavé. Byly tedy stanoveny následující třídy – voda, zelená tráva, suchá tráva, stromy, holá půda, beton, asfalt, světlá střecha, tmavá střecha, betonová střecha, asfaltová střecha a kovová střecha.

Emisivity jednotlivých tříd byly určeny na základě spektrální knihovny ECOSTRESS SpecLib. Takto určená emisivita vycházela z poznatků DOBROVOLNÉHO (1998), který tvrdí, že množství energie vyzářené tělesem je závislé na množství energie, které na těleso dopadá. Intenzitu záření M_I dopadající na povrch tohoto tělesa je možné vyjádřit zákonem o zachování energie, viz Rovnice 3.5.

$$M_I = M_A + M_R + M_T \quad (3.5)$$

kde M_A vyjadřuje intenzitu pohlceného záření, M_R intenzitu odraženého záření a M_T intenzitu propuštěného záření. Na základě této rovnice je možné definovat tři vlastnosti daného tělesa, které popisují jeho schopnost interakce s elektromagnetickým zářením – jedná se o pohltivost $\alpha(\lambda)$, odrazivost $\rho(\lambda)$ a propustnost $\tau(\lambda)$, viz Rovnice 3.6.

$$\alpha(\lambda) = \frac{M_A}{M_I} \quad \rho(\lambda) = \frac{M_R}{M_I} \quad \tau(\lambda) = \frac{M_T}{M_I} \quad (3.6)$$

Ze stejného zákona o zachování energie vyplývá i Rovnice 3.7, která říká, že součet všech těchto vlastností musí být roven 1.

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (3.7)$$

DOBROVOLNÝ (1998) dále poukazuje na fakt, že dle Kirchhoffova zákona emisivita objektu odpovídá jeho spektrální pohltivosti. Jelikož lze ve většině případů považovat složku propustnosti za nulovou, je možné ji z rovnice vypustit a vyjádřit si tak složku pohltivosti, respektive emisivity, viz Rovnice 3.8. Z této rovnice plyne, že čím vyšší je odrazivost daného tělesa, tím nižší je jeho emisivita a naopak.

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda) \quad (3.8)$$

Hodnota emisivity byla stanovena na základě vzorků ze spektrální knihovny ECOSTRESS SpecLib, u některých tříd se však tyto hodnoty nepodařilo dohledat a byly využity poznatky z práce SOBRINA A KOL. (2012). U emisivity měřené ze spektrální knihovny se jednalo o průměr emisivit vzorků (jejich přehled viz Příloha 1) v intervalu vlnových délek 10,8–11,2 μm (citlivost senzoru TIRS družice Landsat 8 na dopadající infračervené termální záření). Emisivita tříd trávy, stromů a holé půdy byla určena na základě práce SOBRINA A KOL. (2012). V tomto případě bylo ovšem opět kvůli specifické citlivosti senzoru TIRS nutné vypočítat průměrnou hodnotu emisivity z pásem 3 (10,25–10,95 μm) a 2 (10,95–11,65 μm). Problém byl se stanovením hodnot emisivity u kovových střech – tyto povrchy nabývají v mnoha případech nízké emisivity. Dle analýzy sedmi vzorků ze spektrální knihovny bylo zjištěno, že tato hodnota je mezi jednotlivými kovy velice odlišná – směrodatná odchylka dosahovala hodnoty 0,395 přičemž samotná emisivita se u různých vzorků pohybovala téměř v celém možném intervalu 0–1 (ECOSTRESS SPECLIB). Hodnota stanovená v práci SOBRINA A KOL. (2012) ovšem také neodpovídala skutečnosti. V případě nastavení této hodnoty v průběhu zpracování dat docházelo k umělému nadhodnocování povrchové teploty v oblastech této třídy. Empiricky byla emisivita nakonec stanovena na 0,830, kdy stanovená povrchová teplota třídy kovových střech dosahovala podobných hodnota jako její okolí. Výsledné hodnoty emisivit viz Tabulka 3.3.

Tabulka 3. 3: Klasifikační systém s hodnotami emisivity získané z práce Sobrina a kol. (2012) (Emisivita 1) a ze spektrální knihovny ECOSTRESS SpecLib (Emisivita2), * = použité hodnoty

Název a číslo třídy	Popis povrchů zařazených do třídy	Emisivita 1	Emisivita 2	
1	voda	řeky, rybníky	0,990	0,991*
2	tráva zelená*	zdravá tráva, lehce zažloutlá tráva	0,980*	-
3	tráva suchá*	žlutá až hnědá tráva	0,971*	-
4	stromy*	lesy, skupiny stromů, stromy, keře	0,990*	-
5	holá půda*	půda bez vegetace	0,952*	-
6	beton	chodníky, dlažba, parkoviště	0,950	0,952*
7	asfalt	vozovka, parkoviště	0,963	0,960*
8	střecha světlá	bílé a červené taškové střechy	0,941	0,969*
9	střecha tmavá	šedé a černé taškové střechy	0,941	0,969*
10	střecha betonová	rovné betonové střechy	0,950	0,952*
11	střecha asfaltová	rovné střechy pokryté asfaltem	0,963	0,960*
12	střecha kovová	střechy s nízkou emisivitou	0,047	-

Zdroj: vlastní tvorba dle ECOSTRESS SPECLIB a SOBRINO A KOL. (2012)

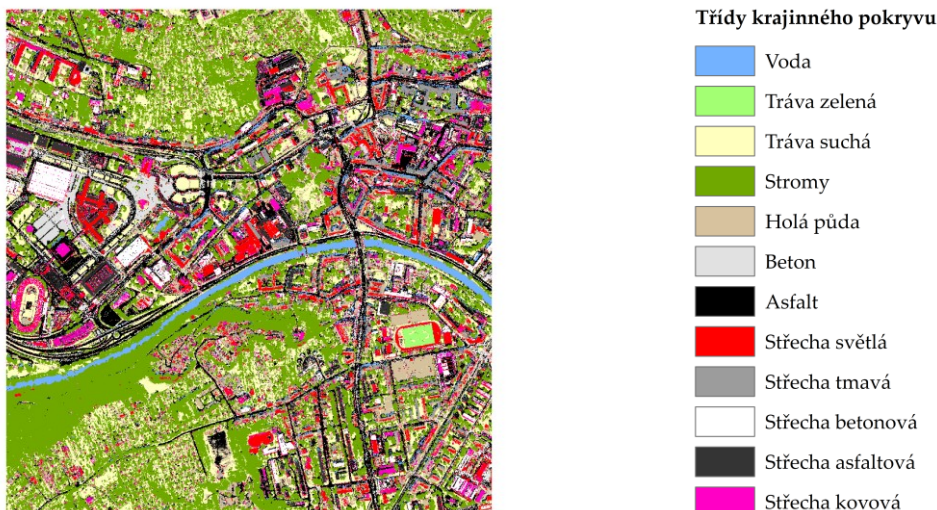
K samotnému určení povrchu zájmového území mohlo být využito dvou různých způsobů. Zprvce klasifikace družicových či leteckých dat s vyšším prostorovým rozlišením (velikost pixelu alespoň 2 m), než jaké mají infračervená termální data Landsat 8. Dostupnost kvalitních dat je však omezená a správnost klasifikace je vždy nutné ověřit následným hodnocením přesnosti; tento způsob byl zvolen. Druhým způsobem je vizuální interpretace a následná vektorizace krajinného pokryvu²⁹ z ortofotomap; tento způsob je však časově velmi náročný a bylo od něj upuštěno. V případě území zkoumaném v této práci bylo pro tyto účely využito dat povrchových teplot. U dat nebyla při zpracování korigována emisivita a ty jsou v obraze zobrazeny nesprávně jako místa s abnormálně nízkou teplotou. Dalším způsobem by mohlo být terénní šetření přímo v zájmovém území.

K rozdělení zájmového území na tyto třídy byla využita řízená klasifikace leteckých dat CASI z oblasti viditelné a blízké infračervené části spektra s 37,5x vyšším prostorovým rozlišením (pixel o velikosti 0,8 m) než družicová infračervená termální data Landsat 8 (pixel o velikosti 30 m). Přesnost klasifikace záležela na kvalitě

²⁹ V případě homogennějších typů území by bylo možné použít např. databázi využití půd Urban Atlas, ta však pochází z roku 2012 a často nereflektuje současný stav povrchu a taktéž má omezenou přesnost co se týče použitého klasifikačního systému i prostorového rozlišení.

předzpracování a rozlišení dat. Pro účely práce byl využit Klasifikátor maximální pravděpodobnosti (Maximum Likelihood Classification), který vychází z předpokladu, že každý pixel v obraze spadá do určité třídy na základě pravděpodobnosti vypočítané z rozptylu, kovariance a korelace hodnot pixelů každé třídy. Podmínkou jeho užití je normální rozložení pixelů v rámci těchto tříd. Klasifikátor je však velmi citlivý na nevhodně použitá trénovací data a při výběru trénovacích množin bylo nutné dbát na jejich spektrální čistotu. Výběr trénovacích množin proběhl na základě vizuální interpretace leteckých dat zobrazených v pravých barvách a ortofota zájmového území. Vhodnost těchto množin byla v průběhu jejich výběru ověřována na základě výpočtu základních statistických ukazatelů – průměrných hodnot spektrální záře a jejich směrodatné odchylky. Z klasifikace byla vyřazena okrajová pásma 1–3 a 47–48, která byla v důsledku horší citlivosti senzoru na dopadající záření v okrajových intervalech vlnových délek zašuměná. Vyjmuta z klasifikace byla taktéž pásma 28 a 37–45, ve kterých jsou hodnoty jednotlivých pixelů interpolovány z okolních pásem. Vznikem byl rastr zájmového území klasifikovaný na jednotlivé třídy, viz Obrázek 3.4 Výsledný klasifikovaný rastr byl pro účely metody převzorkován (*Resample*) metodou nejbližšího souseda na velikost pixelu 2 m.

Obrázek 3. 4: Klasifikované třídy krajinného pokryvu dle klasifikačního systému



Zdroj: vlastní tvorba

Hodnocení přesnosti klasifikace proběhlo na základě porovnání klasifikovaných a referenčních dat. Celková plocha referenčních dat zjišťovaných nad ortofotem činila 13,02 ha, to z celkové plochy zájmového území o ploše 302,67 ha činilo 4,3 %, pro

vyhodnocení bylo z pro každou třídu nalezeno alespoň 10 těchto referenčních ploch. Výsledná chybová matice ukazuje hodnoty uživatelské, zpracovatelské přesnosti u jednotlivých tříd a celkové přesnosti klasifikace (92,48 %). Dle dosažených výsledků je možné považovat klasifikaci za poměrně zdařilou, a to i co se týče výsledné hodnoty Kappa Indexu (0,8897), avšak dle vizuálního hodnocení byl výsledek horší. I po změnách trénovacích množin byl problém s klasifikací stinných ploch, které byly ve většině případů klasifikovány jako voda. Problém nastal také v případě třídy kovové střechy, která byla v několika případech přisouzena i střechám betonovým.

Tabulka 3. 4: Hodnocení přesnosti klasifikace zájmového území – UP (uživatelská přesnost), ZP (zpracovatelská přesnost)

Třída	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Celk.	UP
1	98,83	0,00	0,11	0,91	0,00	0,00	0,04	0,00	0,04	0,00	0,00	0,08	100	98,83
2	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100	100,00
3	0,00	0,00	79,96	8,85	11,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100	79,96
4	0,05	0,02	0,11	99,79	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100	99,79
5	0,00	0,00	0,58	0,52	89,89	0,23	0,09	5,67	1,86	0,78	0,29	0,09	100	89,89
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	98,29	0,78	0,00	0,00	0,05	0,26	0,00	100	98,29
7	0,11	0,00	1,84	2,94	31,83	1,68	42,96	0,11	1,00	1,52	15,65	0,37	100	42,96
8	0,00	0,00	0,12	0,62	4,32	0,49	0,37	85,45	0,86	1,48	0,25	6,04	100	85,45
9	0,00	0,00	0,90	0,22	8,14	0,07	0,07	3,29	84,99	0,15	2,09	0,07	100	84,99
10	0,00	0,00	0,00	0,00	3,24	4,03	4,81	0,00	0,22	87,47	0,11	0,11	100	87,47
11	0,00	0,00	0,10	0,52	27,33	0,10	0,72	0,10	3,73	1,55	65,32	0,52	100	65,32
12	0,00	0,00	0,13	1,29	1,67	0,00	0,26	0,77	0,64	2,06	0,39	92,80	100	92,80
Celk.	98,98	100,02	83,85	115,66	178,25	104,90	50,10	95,38	93,34	95,07	84,36	100,08	1 026	
ZP	99,84	99,98	95,36	86,28	50,43	93,70	85,75	89,59	91,05	92,01	77,43	92,73		85,48

Zdroj: vlastní tvorba

3.1.4.2 Výpočet koeficientů spektrální záře $K_{L\lambda}$

Dalším krokem byl výpočet tzv. koeficientů spektrální záře – hodnoty, která reprezentuje poměr spektrální záře jednotlivých tříd krajinného pokryvu vůči ostatním třídám. Jedná se o pravděpodobný poměr spektrální záře zjištěný na základě průměrné hodnoty této radiometrické veličiny spočtený pro danou denní dobu a dané roční období.

Výpočet koeficientů spektrální záře byl proveden na trénovacích množinách, které vstupovaly do klasifikace. Před samotným výpočtem však bylo nutné data spektrálního záře upravit. Obdržená letecká hyperspektrální data TASI obsahovala hodnoty

spektrálního záře opouštějící zemský povrch (tedy po atmosférických korekcích) ve 24 pásmech. Vybrána byla pouze ta pásma, která odpovídala vlnovým délkám, kde je senzor TIRS družice Landsat 8 nejcitlivější na dopadající záření, viz Obrázek 2.5. Konkrétně se jednalo o pásma 18 (střed pásma na vlnové délce 10,79225 μm), 19 (10,90175 μm), 20 (11,01125 μm) a 21 (11,12075 μm). Hodnoty spektrálního záře těchto pásem byly zprůměrovány (*Raster Calculator*) do nového rastru. Na základě zonální statistiky (*Zonal Statistics as Table*) oblastí trénovacích množin a těchto výsledných dat byly získány hodnoty průměrné spektrální záře jednotlivých tříd a jejich směrodatných odchylek, viz Tabulka 3.5. Koeficient spektrální záře dané třídy $K_{L_{\lambda} i}$ byl vypočten dle následující Rovnice 3.9 a byl dle třídy krajinného pokryvu přiřazen (*Reclassify*) novému rastru o velikosti pixelu 2 m.

$$K_{L_{\lambda} i} = \frac{L_{\lambda} \max}{L_{\lambda} i} \quad (3.9)$$

kde $L_{\lambda} \max$ vyjadřuje průměrnou hodnotu spektrální záře třídy, která jí má ze všech tříd nejvyšší, a $L_{\lambda} i$ vyjadřuje spektrální zář dané třídy. Jedná se tedy o bezrozměrnou veličinu, která může nabývat hodnot od 0 do 1. Je důležité mít na paměti, že jsou tyto koeficienty platné pouze pro danou denní dobu a roční období. Z důvodu odlišných klimatických a meteorologických podmínek se mohou koeficienty jednotlivých tříd v rámci denních a nočních hodin a měsíců v roce výrazně lišit. Velký vliv na tyto změny mají tepelné vlastnosti povrchů spadajících do dané třídy – tepelná kapacita, kondukce a inercie. Svou roli může hrát rovněž i nadmořská výška, sklon či aspekt, a tedy i výskyt stínů. Tepelné vlastnosti povrchů byly pro tuto primární analýzu opomenuty a vycházelo se z předpokladu, že jsou poměry hodnot spektrální záře jednotlivých tříd v době pořízení dat konstantní. Rovněž bylo upuštěno od vyrovnávání rozdílů mezi povrchy stejných tříd nacházejících se v jiné nadmořské výšce, sklonu či aspektu. Pro analýzu dat v jiném období by bylo nutné koeficienty aktualizovat.

Tabulka 3. 5: Hodnoty průměrné spektrální záře L_{λ} [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot m^{-1}$] jednotlivých tříd a jim přiřazených koeficientů spektrální záře $K_{L\lambda}$

Třída	Rozloha [ha]	Průměr L_{λ}	Sm. odchylka L_{λ}	$K_{L\lambda}$
voda	0,832	9,406334943	0,102293032	0,644
tráva zelená	0,3596	10,81136405	0,172900559	0,741
tráva suchá	0,7912	12,81353395	0,498923149	0,878
stromy	7,6592	10,69190577	0,247261239	0,732
holá půda	2,1568	12,68874091	1,071599732	0,869
beton	1,4308	12,38638951	0,326602001	0,848
asfalt	2,9152	12,03572582	1,006517424	0,824
střecha světlá	2,552	12,39180584	0,974135091	0,849
střecha tmavá	0,7844	13,21585637	1,128125359	0,905
střecha betonová	2,1568	14,59946651	0,906617086	1,000
střecha asfaltová	2,0288	14,2747084	1,380395741	0,978
střecha kovová	0,658	8,793801585	1,732625904	0,602

Zdroj: vlastní tvorba

3.1.4.3 Výpočet hodnoty normalizované spektrální záře $L_{\lambda N}$

Dalším krokem byl výpočet hodnoty tzv. normalizované spektrální záře $L_{\lambda N}$. Jedná se takovou hodnotu spektrální záře, kterou mohou být vynásobeny koeficienty spektrální záře jednotlivých tříd a jejich podíly na ploše původního pixelu, aby byla zachována průměrná hodnota spektrální záře tohoto pixelu.

Pro účely výpočtu bylo nutné vytvořit novou vektorovou vrstvu, jejíž polygony byly totožné s pixely o velikosti 30 m rastru zájmového území. Jelikož prostorové funkce ArcGIS nedisponují nástrojem, který by jednotlivé pixely rastru dokázal převést na čtvercové polygony o stejné velikosti, byl proveden následující postup. Rastr o velikosti pixelu 30 m obsahující hodnoty spektrální záře opouštějící zemský povrch z dat Landsat byl nejprve převeden na bodovou vrstvu (*Raster to Point*). Body byly vytvořeny v místech středů pixelů. U nově vzniklé vektorové vrstvy byl zachován atribut s hodnotami spektrální záře původního pixelu. Bodová vrstva byla následně převedena na vrstvu polygonovou (*Create Fishnet*). Vzniklé polygony vytvořily čtverce o stejné velikosti a poloze jako pixely původního rastru o velikosti pixelu 30 m obsahující hodnoty spektrální záře. Při převodu však nebyla zachována informace o spektrální záři. Dodatečným krokem proto bylo prostorové spojení atributů bodové a polygonové vrstvy (*Spatial Join*). Aby byla atributová tabulka polygonové vrstvy přehledná, byl kromě povinných atributů zachován pouze atribut s hodnotami spektrální záře.

Posledním krokem před samotným výpočtem normalizované spektrální záře $L_{\lambda N}$ bylo zjištění procentuálního zastoupení jednotlivých tříd v původních pixelech o velikosti 30 m, respektive v jednotlivých polygonech nově vzniklé vektorové vrstvy. Tohoto kroku bylo dosaženo vytvořením tabulky, která ve formě atributů s názvy obsahovala hodnoty velikostí ploch jednotlivých tříd (*Tabulate Area*), a jejím následným připojením k polygonové vrstvě (*Join Table*). Hodnoty podílu plochy dané třídy na celkové ploše pixelu byly převedeny na procenta. Při postupu bylo samozřejmostí zachování totožných hodnot záznamů u atributů s primárními klíči (atribut FID), které zaručovaly správné spojení jednotlivých záznamů mezi vrstvami.

Pro normalizovanou spektrální zář $L_{\lambda N}$ byl vytvořen nový atribut. Jeho hodnota byla vypočtena na základě Rovnice 3.10 vycházející ze znalosti, že hodnota spektrální záře pixelu L_{λ} odpovídá průměrné spektrální záři všech typů povrchu z celé plochy, která pixelu odpovídá.

$$L_{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot K_{L_{\lambda i}} \cdot L_{\lambda N}}{100} \quad (3.10)$$

kde P_i vyjadřuje procentuální podíl dané třídy na celkové ploše původního pixelu a $K_{L_{\lambda i}}$ vyjadřuje tzv. koeficient spektrální záře dané třídy. Předchozí rovnici je možné upravit do podoby pro výpočet normalizované spektrální záře $L_{\lambda N}$, viz Rovnice 3.11.

$$L_{\lambda N} = \frac{L_{\lambda} \cdot 100}{\sum_{i=1}^n P_i \cdot K_i} \quad (3.11)$$

Polygonová vektorová vrstva byla pro optimalizaci následných výpočtů převedena zpět na rastr o velikosti 2 m (*Polygon to Raster*), přičemž jako hodnota jednotlivých pixelů byla nastavena hodnota vypočtené normalizované spektrální záře $L_{\lambda N}$.

3.1.4.4 Výpočet hodnoty subpixelové spektrální záře $L_{\lambda S}$

Pro výpočet hodnoty subpixelové spektrální záře byl rastr s hodnotami normalizované spektrální záře vynásoben rastrem s hodnotami koeficientů spektrální záře. Výsledný tvar výpočtu, viz Rovnice 3.12.

$$L_{\lambda S} = K_i \cdot L_{\lambda N} \quad (3.12)$$

3.1.4.5 Výpočet povrchové teploty

Výpočet povrchové teploty probíhal na základě dvou následujících rovnic. První rovnicí byly převedeny hodnoty subpixelové spektrální záře opouštějící zemský povrch $L_{\lambda S}$ na subpixelovou jasovou teplotu povrchu T_{RS} , viz Rovnice 3.13.

$$T_{RS} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda S}} + 1\right)} \quad (3.13)$$

kde k_1 a k_2 vyjadřují kalibrační teplotní konstanty specifické pro senzor TIRS a jeho vlnovou délku.

Druhou rovnicí vycházející z inverze Planckova vyzařovacího zákona byly poté převedeny hodnoty subpixelové jasové teploty povrchu T_{RS} na hodnoty subpixelové termodynamické teploty povrchu T_{TS} , viz Rovnice 3.14. Pro výpočet byla nutná znalost emisivity povrchu. Byl proto vytvořen rastr s hodnotami emisivity, stanovenými v jednom z předchozích kroků, viz Tabulka 3.3. Stejně tak, jako tomu bylo u rastru s koeficienty spektrální záře, byl i tento rastr o velikosti pixelu 2 m vytvořen překlasifikováním (*Reclassify*) rastru s třídami krajinného pokryvu.

$$T_{TS} = \frac{T_R}{1 + \frac{\lambda T_R}{(hc/k)} \ln \varepsilon} \quad (3.14)$$

Postup byl pro zrychlení jednotlivých kroků a zamezení provedení chyb zautomatizován ve formě skriptu v jazyce Python, viz Příloha 2. Skript byl spouštěn ve složce, ve které se spolu s ním nachází zpracovaný rastr 10. pásma o velikost pixelu 30 m z družice Landsat 8 ve formě hodnot spektrální záře opouštějící zemský povrch oříznutý dle zájmového území, rastr o velikost pixelu 2 m s určenými třídami krajinného pokryvu dle klasifikačního systému oříznutý dle zájmového území a metadatový soubor (*.MTL) z příslušného datového produktu Landsat 8.

3.2 Verifikace

Verifikace metody byla provedena na leteckých datech povrchové teploty stanovené algoritmem TES. Subpixelová metoda byla rovněž porovnána s metodami, které se pro stanovování teploty povrchu z infračervených termálních dat Landsat používají nejčastěji. Metody se liší ve způsobu určování emisivity, kterou přiřazují vždy celému pixelu Landsat o velikosti 30 m bez podrobnější analýzy, jaké je v něm zastoupení jednotlivých typů krajinného pokryvu. Subpixelová metoda neuvažuje pouze rozdílnost

emisivity u jednotlivých povrchů, ale i různé zastoupení těchto povrchů v rámci jednoho pixelu a také odlišné chování v oblasti vyzařování.

Výsledky subpixelové metody byly porovnány se čtyřmi vybranými metodami. Konkrétně se jednalo o metodu využívající regresní analýzu závislosti emisivity na NDVI, metodu využívající prahování emisivity z NDVI, metodu využívající konstantní hodnotu emisivity a metodu využívající pro stanovení emisivity klasifikaci krajinného pokryvu (byla využita metoda z práce LI A KOL. (2012)). Metodické postupy jednotlivých metod jsou uvedeny ve druhé kapitole. Postup použitý pro převod hodnot spektrální záře na hodnoty povrchové teploty byl totožný s postupem výpočtu povrchové teploty u subpixelové metody.

KAPITOLA 4

Výsledky práce

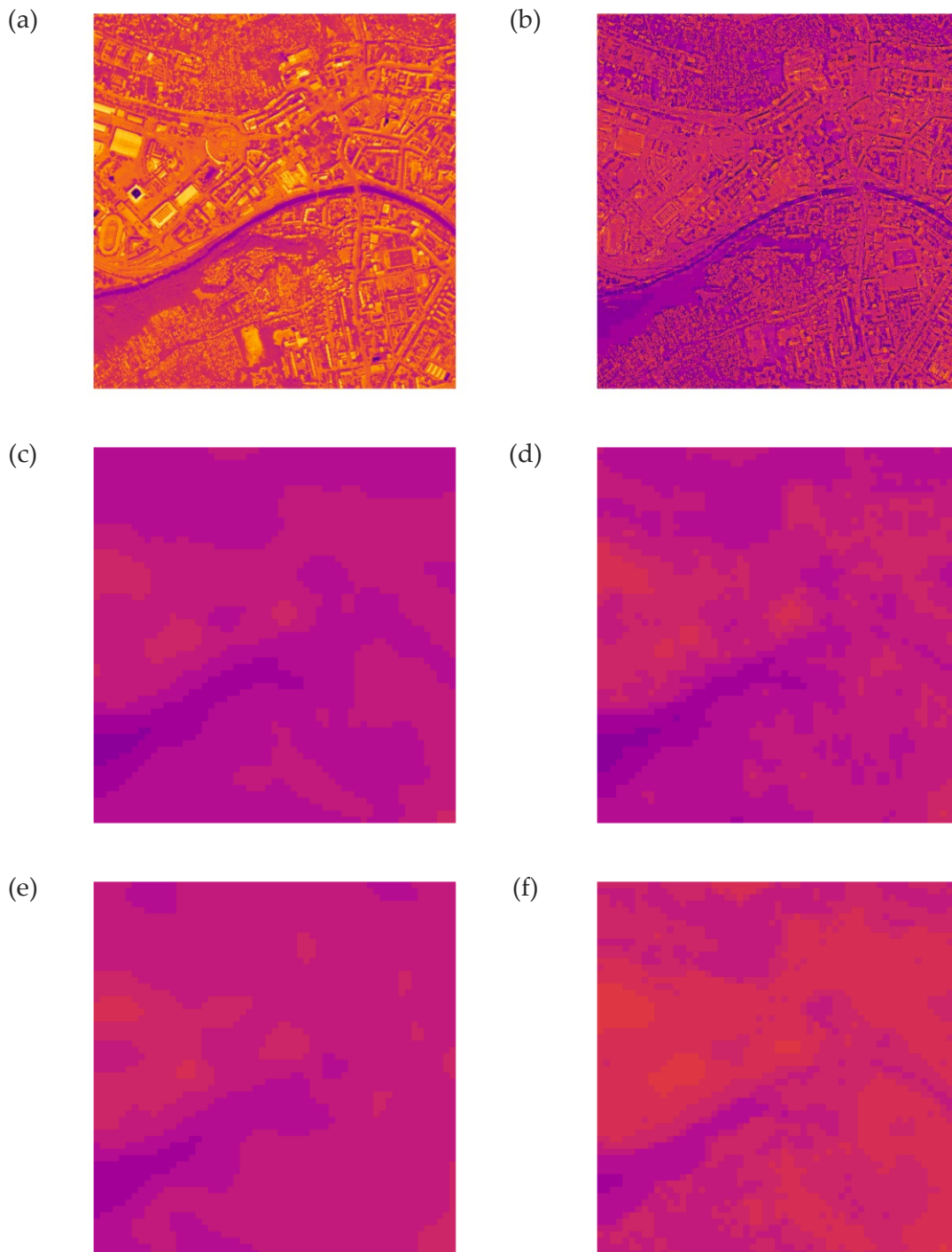
Výstupem subpixelové metody byla rastrová vrstva obsahující informace o předpokládané povrchové teplotě zemského povrchu v zájmovém území v Brně. Výsledný rastr byl porovnán s verifikačními leteckými daty s hodnotami povrchové teploty stanovené na základě algoritmu TES, které byly pořízeny na stejném území za stejných meteorologických podmínek a v přibližně stejné denní době (pořízení leteckých i družicových dat proběhlo v rámci 1 hodiny a 15 minut). Výsledky subpixelové metody byly rovněž porovnány se současnými metodami, které se nejčastěji používají pro stanovení povrchové teploty z dat Landsat. Výsledky jsou popsány v následujících podkapitolách a jsou doplněny o mapové výstupy, tabulky a grafy.

4.1 Stanovené hodnoty povrchové teploty

Výsledné rastry jednotlivých metod byly vizualizovány formou mapových výstupů. Všechny mapové výstupy mají jednotnou legendu, která je uvedena vždy v dolní části obrázku. Jednotná legenda byla zvolena z důvodu jasné zřetelných rozdílů mezi rastry a zamezení zkreslení v rámci roztažení histogramů jednotlivých rastrů. Povrchové teploty byly rozděleny na 30 tříd v intervalu 10–85 °C s krokem 2,5 °C.

Na Obrázku 4.1 jsou zobrazeny výsledky povrchových teplot z leteckých dat, subpixelové metody a dalších čtyř vybraných metod – 1. metoda využívala pro stanovení emisivity regresní analýzu závislosti emisivity na NDVI, 2. metoda využívala prahování emisivity z NDVI, 3. metoda využívala konstantní hodnotu emisivity, 4. metoda využívala pro stanovení emisivity klasifikaci krajinného pokryvu. Z obrázku níže jasně vyplývá že subpixelová metoda dokázala vylepšit strukturu rozložení povrchových teplot v rámci zájmového území, avšak nedokázala stanovit korektní hodnoty povrchové teploty. Tento fakt mohl být způsoben jak mírným rozdílem v denní době, kdy byla analyzovaná a verifikační data pořízena, tak předzpracováním družicových dat.

Obrázek 4. 1: Mapy povrchových teplot – (a) letecká data, (b) subpixelová metoda, (c) 1. metoda, (d) 2. metoda, (e) 3. metoda, (f) 4. metoda



Zdroj: vlastní tvorba

V Tabulce 4.1 je tento výrazný rozdíl v povrchové teplotě u analyzovaných a verifikačních dat více zřetelný. Ve sloupcích jsou uvedeny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky povrchových teplot v rámci jednotlivých tříd klasifikačního systému, který byl vytvořen pro účely subpixelové metody. Je zde vidět, že v případě subpixelové metody bylo lepší průměrné teploty v rámci jednotlivých tříd oproti ostatním metodám dosaženo pouze u suché trávy, holé půdy, červených střech, bílých střech, šedých střech a černých střech. I přesto jsou však průměrné teploty v těchto třídách výrazně vzdáleny od hodnot povrchových teplot získaných z leteckých dat. U třídy vody byl výsledek subpixelové metody dokonce horší než u všech ostatních metod, kde rozdíl v průměrných teplotách této třídy činil více než 12,5 °C. Tento fakt byl pravděpodobně způsoben nedokonalou klasifikací tříd krajinného pokryvu, kdy byly do třídy vody v několika částech zájmového území chybně klasifikovány i stíny. Podobně výrazný rozdíl (11,8 °C) ve třídě stromů pak mohl být způsoben chybně stanoveným koeficientem spektrální záře, jelikož dle hodnocení přesnosti klasifikace bylo téměř 99,8 % třídy stromů zařazeno správně. Porovnání průměrných teplot ve třídě kovových střech nebylo možné z důvodu jejich špatné klasifikace. I přes snahy o výběr lepších trénovacích množin byly do této třídy zařazeny povrchy, které do ní nepatří (zjištěno vizuálním hodnocením klasifikace), jednalo se zejména o betonové střechy.

Tabulka 4. 1: Průměrné teploty a směrodatné odchylky povrchových teplot jednotlivých tříd – (a) letecká data, (b) subpixelová metoda, (c) 1. metoda, (d) 2. metoda, (e) 3. metoda, (f) 4. metoda

číslo a název třídy	a)		b)		c)		d)		e)		f)	
	ø	σ	ø	σ	ø	σ	ø	σ	ø	σ	ø	σ
1 voda	32,9	5,3	20,2	4,5	31,8	1,4	33,0	2,0	33,2	1,4	36,3	2,1
2 tráva zelená	37,8	2,4	30,1	2,4	32,6	0,8	32,7	0,8	34,1	0,8	36,3	1,2
3 tráva suchá	46,6	5,0	38,9	2,5	32,1	1,2	32,7	1,6	33,5	1,1	36,3	1,9
4 stromy	38,6	3,9	26,8	2,4	31,3	1,6	31,7	1,9	32,8	1,6	35,2	2,3
5 holá půda	46,7	5,7	39,0	2,5	32,4	1,1	33,4	1,6	33,8	1,1	37,1	1,6
6 beton	48,0	4,2	37,0	2,1	33,5	1,2	35,1	1,6	34,8	1,2	38,4	1,3
7 asfalt	45,1	7,1	34,5	2,5	32,8	1,2	34,2	1,6	34,2	1,2	37,6	1,5
8 střecha červená	48,7	6,5	38,3	2,6	32,9	1,2	34,3	1,7	34,2	1,2	37,7	1,4
9 střecha bílá	45,9	8,1	42,6	2,6	32,7	1,1	33,9	1,6	34,0	1,0	37,4	1,3
10 střecha šedá	51,8	7,8	47,3	3,8	33,7	1,6	35,3	2,0	35,0	1,5	38,5	1,7
11 střecha černá	50,9	9,1	46,0	3,3	33,2	1,4	34,5	2,0	34,5	1,3	37,9	1,7
12 střecha kovová	45,5	8,3	27,5	3,7	32,8	1,2	34,1	1,8	34,1	1,2	37,5	1,5

Zdroj: vlastní tvorba

Dalším důvodem byla jejich špatně stanovená povrchová teplota (nesprávně stanovená emisivita povrchu) v leteckých datech, viz Obrázek 4.1 – plochy s nejnižší povrchovou teplotou. Naopak u subpixelové metody byla emisivita těchto povrchů korigována a je vidět tendence vyrovnávání jejich povrchových teplot s jejich okolím.

4.2 Rozdíly v povrchové teplotě

Pro stanovení kladných a záporných rozdílů v povrchových teplotách od jejich skutečné hodnoty byly výsledné rastry jednotlivých metod odečteny od verifikačních dat, viz Obrázek 4.2. V mapových výstupech jsou rozdíly vyjádřeny barevnou škálou – odstíny modré zobrazují oblasti, kde byly povrchové teploty podhodnocené, odstíny červené naopak oblasti, kde byly povrchové teploty nadhodnocené. Je vidět, že byla povrchová teplota v zájmovém území spíše podhodnocena. Jak již bylo zmíněno výše, může se jednat o rozdíl způsobený mírně odlišným časem pořízení dat.

Obrázek 4. 2: Mapy rozdílů povrchových teplot od povrchových teplot stanovených z leteckých dat – (a) subpixelová metoda, (b) 1. metoda, (c) 2. metoda, (d) 3. metoda, (e) 4. metoda

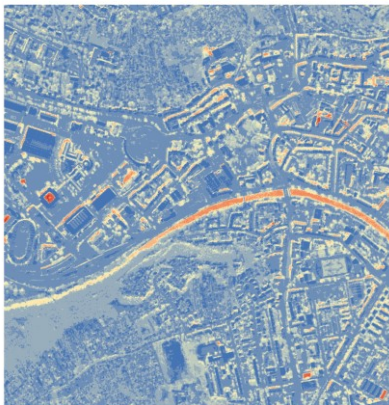
(a)



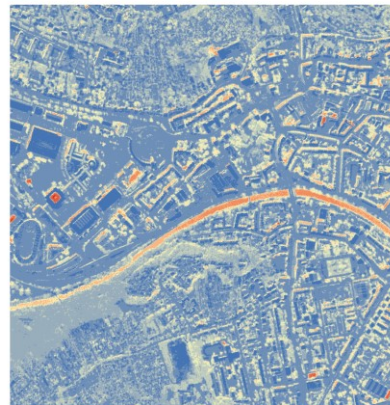
(b)

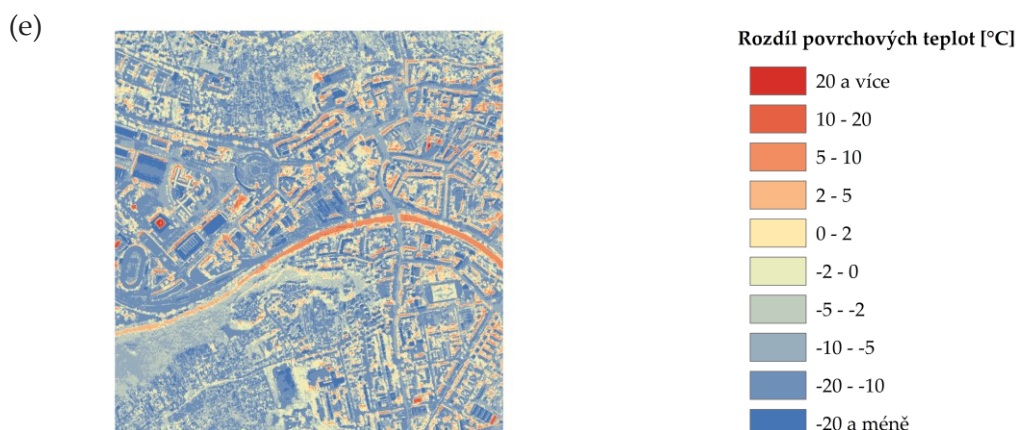


(c)



(d)





Zdroj: vlastní tvorba

V Tabulce 4.2 jsou vyjádřeny absolutní rozdíly povrchových teplot v rámci celého zájmového území. Jak je vidět, průměrná chyba ve stanovených povrchových teplotách se u subpixelové metody pohybovala na hodnotě cca 10,8 °C. Z pěti testovaných metod se však nejedná o nejlepší výsledek. O 2,5 °C lepšího průměrného výsledku dosáhla 4. metoda.

Tabulka 4. 2: Absolutní rozdíly povrchových teplot v zájmovém území Brna

Subpixelová metoda	1. metoda	2. metoda	3. metoda	4. metoda
10,80	11,89	11,08	10,63	8,24

Zdroj: vlastní tvorba

4.3 Teplotní profil

Pro bližší pohled na teploty povrchu a jejich změnu v prostoru byl vytvořen teplotní profil procházející zájmovým územím, viz Obrázek 4.3. Profil je veden z východu na západ a je rozdělen na tři segmenty, každý 500 m dlouhý. Tyto segmenty byly vytvořeny z toho důvodu, aby bylo v průběhu profilu zaznamenáno území s více druhy krajinného pokryvu. Dle vizuální interpretace ortofota se v rámci profilu vyskytují následující: 0–125 m – travnaté hřiště, 125–260 m – zástavba, 260–290 m – silnice, 190–550 m – domy, 550–650 m – zahrady, 650–700 m – zástavba, 700–1000 m – les, 1000–1025 m – řeka, 1025–1050 – les, 1025–1100 m – silnice, 1100–1200 m – zástavba + parkoviště, 1200–1250 m – silnice, 1250–1325 m – Pavilon B s asfaltovou a skleněnou střechou, 1325–1425 m – asfalt, 1425–1475 m – Pavilon C s asfaltovou a kovovou střechou 1475–1500 – asfalt.

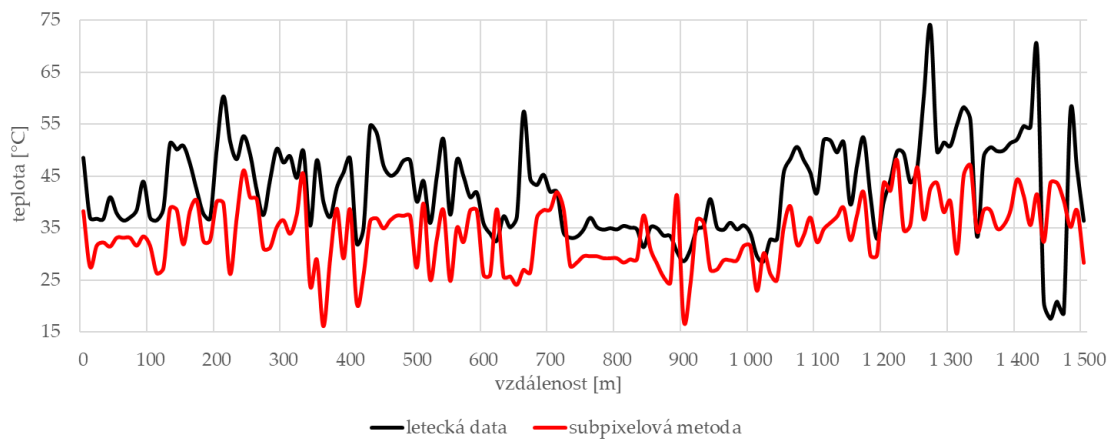
Obrázek 4. 3: Teplotní profil

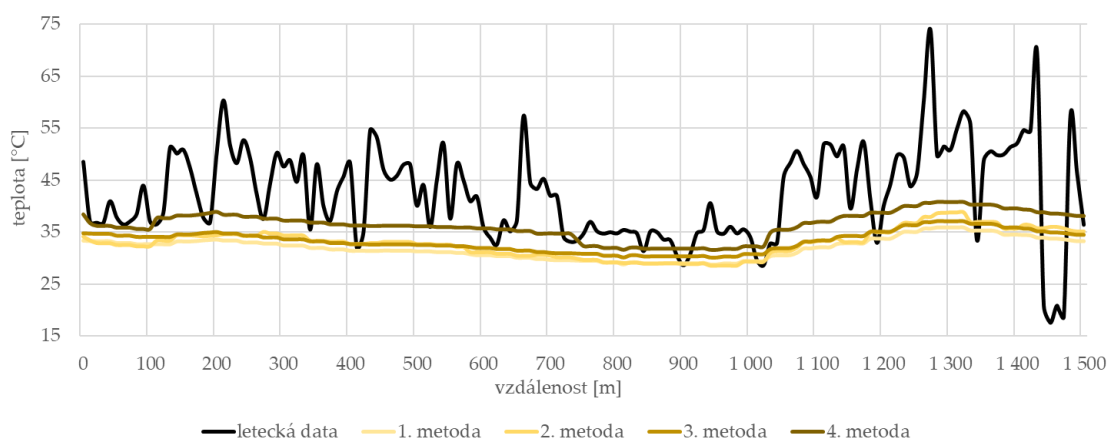


Zdroj: ČÚZK (2019)

Na Obrázku 4.4 nahoře jsou zobrazeny hodnoty povrchových teplot stanovených subpixelovou metodou vzhledem k verifikačním datům; dole pak výsledky ostatních metod. V prvním úseku je vidět podobný trend subpixelové metody a verifikačních dat, avšak absolutní hodnoty povrchové teploty jsou zde značně podhodnoceny, cca o 10 °C. V oblastech zástavby dopadla subpixelová metoda špatně; ačkoli jsou zde náznaky podobných trendů, rozdíly mezi některými částmi zde dosahují i více než 25 °C. Kromě menších výchylek v intervalu 875–950 m v profilu jsou teplotní trendy na území lesa podobné těm z verifikačních dat; stejně tak je tomu i u řeky. Opět je zde jasně zřetelný rozdíl v povrchových teplotách v intervalu 1425–1475 m – špatně stanovená povrchová teplota u verifikačních dat v místě střechy Pavilonu C způsobená chybně zvolenou emisivitou povrchu.

Obrázek 4. 4: Profil povrchových teplot





Zdroj: vlastní tvorba

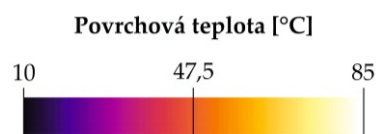
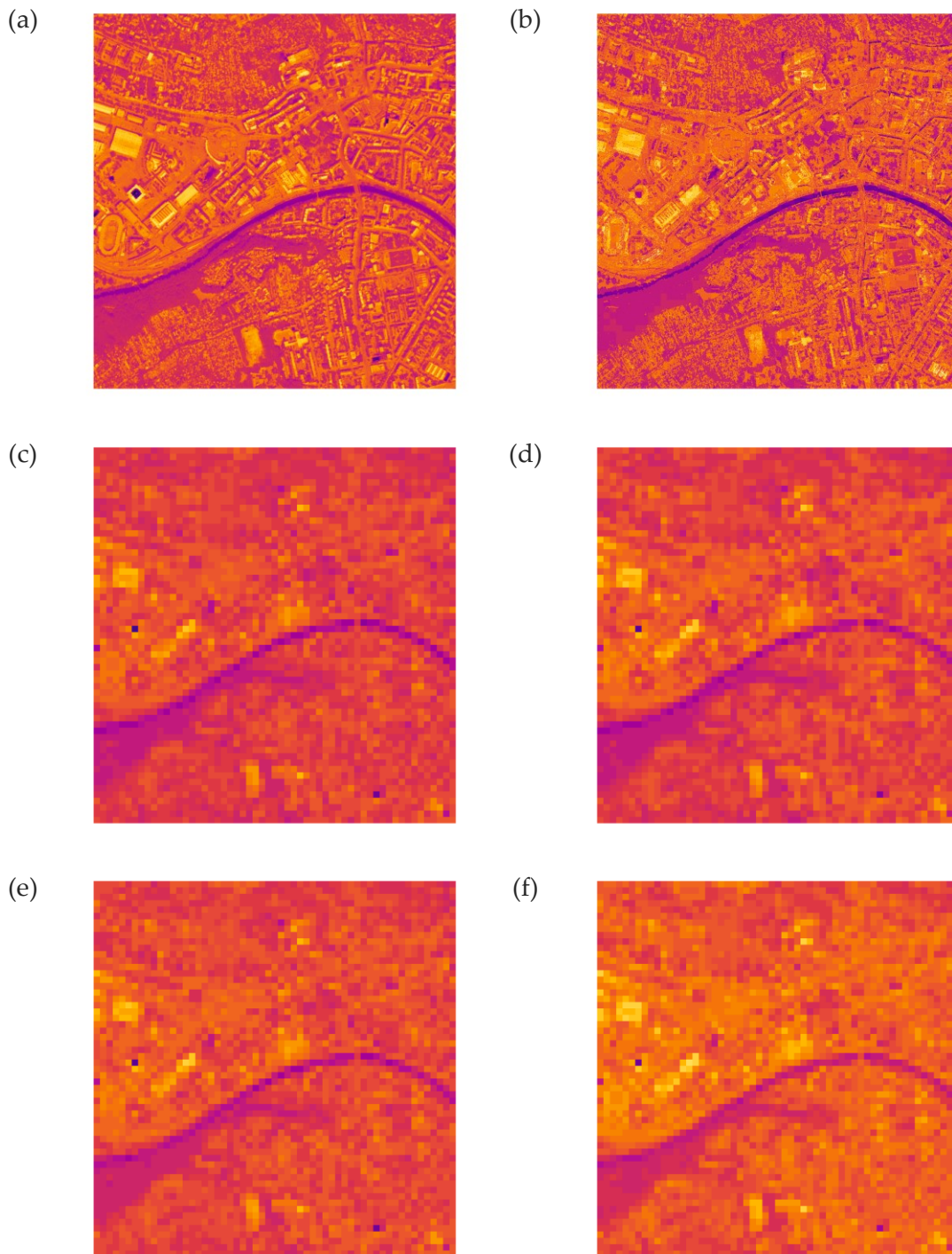
Profily ostatních metod téměř přesně protínají oblasti s lokálními minimy povrchových teplot u verifikačních dat. Výrazně se nevychylují a nabývají hodnot mezi 30 a 40 °C – důvod menších absolutních rozdílů u těchto metod; křivka 4. metody se nachází v grafu nejvýše a je i nejbližší hodnotám povrchových teplot verifikačních dat, což vysvětluje i nejmenší absolutní rozdíl povrchových teplot právě u této metody.

Pro zajímavost byly spočítány korelační koeficienty mezi povrchovými teplotami stanovenými testovanými metodami a povrchovými teplotami z verifikačních dat. Je nutné konstatovat, že subpixelová hodnota dosáhla nejnižší hodnoty, cca 0,466, ostatní metody dosáhly těchto hodnot 0,480 (1. metoda), 0,509 (2. metoda), 0,476 (3. metoda) a 0,528 (4. metoda).

4.4 Optimalizované hodnoty spektrální záře

Z důvodu špatných dosavadních výsledků subpixelové metody byla přistoupeno k jejímu testování na optimalizovaných datech spektrální záře. Je možné, že předzpracování datových produktů Landsat 8, konkrétně převzorkování kubickou konvolucí, zapříčiňuje nenapravitelné změny a bylo by nutné využít nepředzpracovaná data o velikosti pixelu 100 m. Jelikož nejsou tato data dostupná, byla družicová data spektrálního záře nahrazena verifikačními leteckými daty spektrální záře zprůměrovaných do pixelů o velikosti 30 m. Data byla zpracována subpixelovou metodou a byla vyhodnocena jako v předchozím případě. Na Obrázku 4.5 jsou vidět mapové výstupy vzniklé na základě optimalizovaných dat.

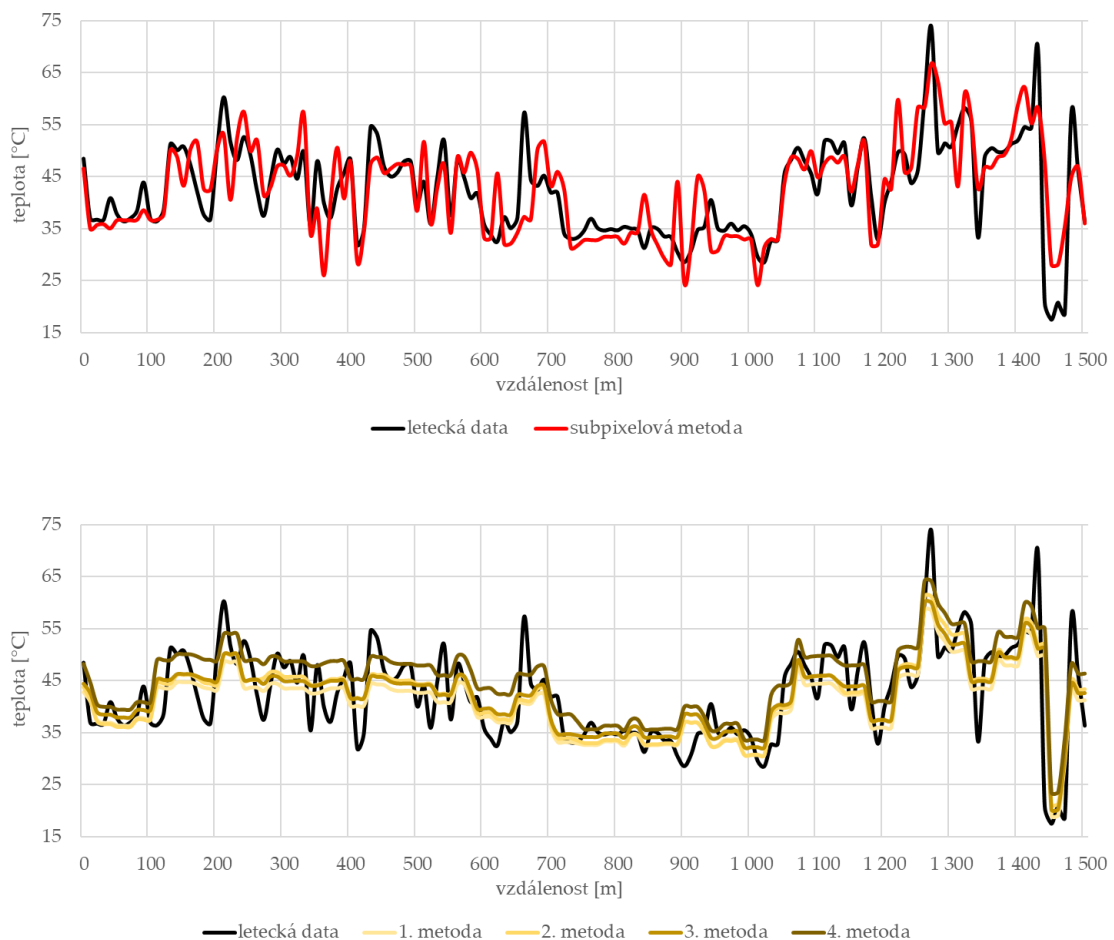
Obrázek 4. 5: Mapy povrchových teplot získaných z optimalizovaných hodnot spektrální záře –
(a) letecká data, (b) subpixelová metoda, (c) 1. metoda, (d) 2. metoda, (e) 3. metoda, (f) 4.
metoda



Zdroj: vlastní tvorba

Je patrné, že povrchové teploty jsou si mnohem bližší. V případě mapového výstupu subpixelové metody vynikají chladné i teplé oblasti v zájmovém území. U ostatních metod je znatelný rozdíl v přesnosti a horším vnímání struktury a rozmístění povrchových teplot v prostoru. Lepší výsledky potvrzují i grafy na Obrázku 4.6. Povrchové teploty v profilu kopírují křivku verifikačních dat věrněji, je však důležité dodat, že podobně se chovají i křivky ostatních testovaných metod. Subpixelová metoda však lépe reaguje na lokální výkyvy povrchových teplot a v některých místech (větší část lesa, silnice a parkoviště) je s verifikačními daty téměř totožná. Naopak se zde opět vyskytl problém s eliminací chybně stanovené teploty v oblasti Pavilonu C, kde je z důvodu špatné emisivity abnormálně snížena povrchová teplota jeho střechy. Co se týče korelace, subpixelová metoda v tomto případě dosáhla nejlepších hodnot korelačního koeficientu 0,779; ostatní metody dosáhly hodnot 0,759, 0,754, 0,756 a 0,756.

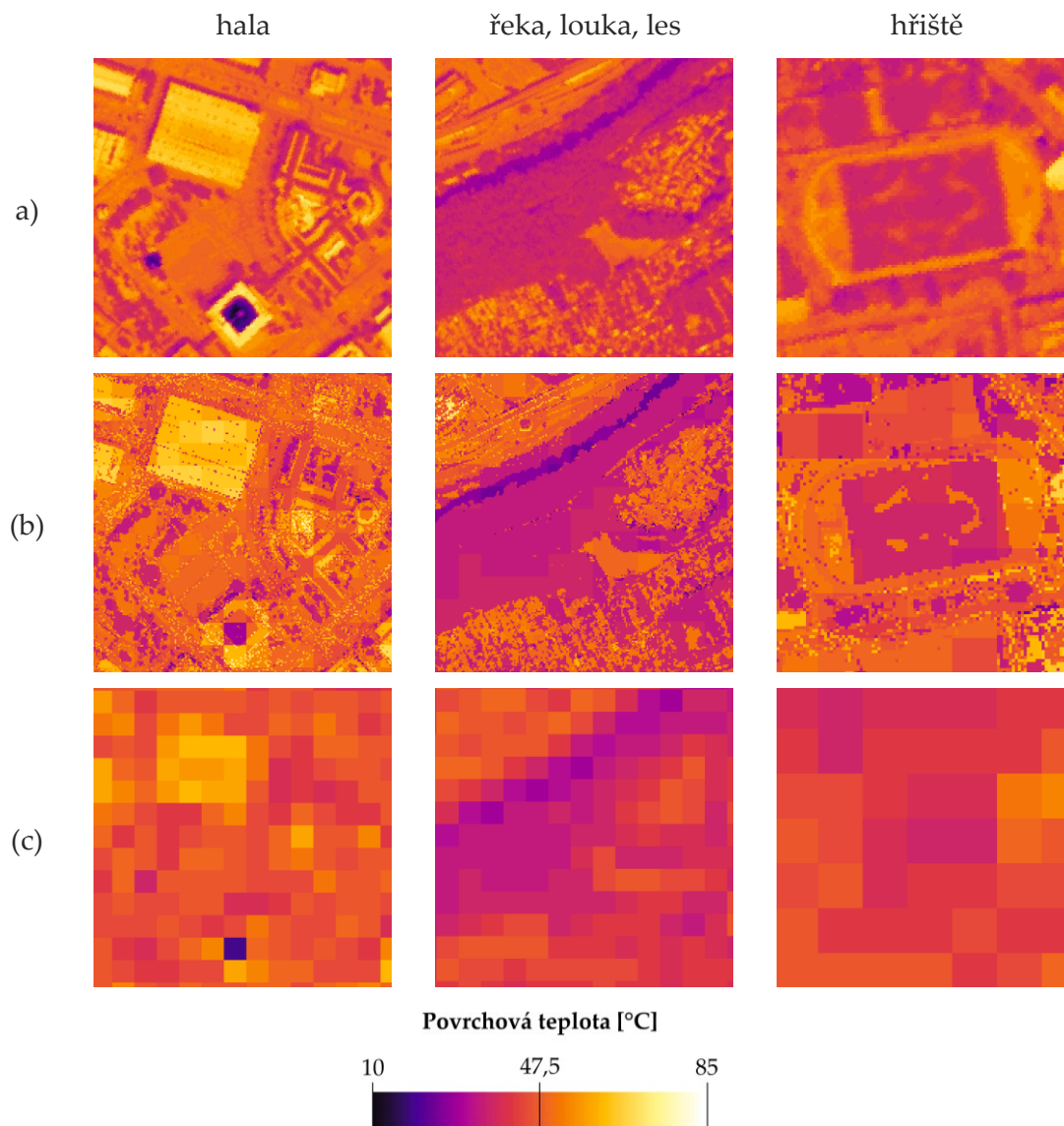
Obrázek 4. 6: Profil povrchových teplot získaných z optimalizovaných hodnot spektrální záře



Zdroj: vlastní tvorba

Pro ukázkou fungování subpixelové metody byly vytvořeny tři výřezy – v oblasti brněnského výstaviště, v oblasti řeky Svratky (s okolním lesem a řekou) a v oblasti hřiště AC Moravská Slavia Brno. Na Obrázku 4.7 jsou zobrazeny tyto výřezy s určenými povrchovými metodami z leteckých verifikačních dat, subpixelové metody a 1. metody. U subpixelové metody je zřetelný přínos ve zvýšení struktury prostorového rozložení povrchových teplot – vyniknutí hal na brněnském výstavišti, řeky Svratky, nedaleké louky či travnatého hřiště e jeho okolí.

Obrázek 4. 7: Mapy povrchových teplot získaných z optimalizovaných hodnot spektrální záře ve vybraných lokalitách – (a) letecká data, (b) subpixelová metoda, (c) 1. metoda



Zdroj: vlastní tvorba

Číselné vyjádření správnosti fungování metody je uvedeno v Tabulce 4.3. Pro tuto analýzu bylo využito zonální statistiky (*Zonal Statistics as Table*) povrchových teplot

v místě celé haly – Pavilonu V (v levé horní části obrázku), výřezu řeky Svratky a okolního lesa a louky a v místě celé zelené části fotbalového hřiště. Kromě lesa byly subpixelovou metodou povrchové teploty určeny přesněji než u 1. metody. Výrazné podobnosti jsou mezi průměrnými povrchovými teplotami porovnanými s verifikačními daty u haly (61,5 °C a 61,9 °C), louky (49,2 °C a 49,0 °C) či hřiště (36,8 °C a 37,2 °C). V určitých místech tedy subpixelová metoda funguje správně.

Tabulka 4. 3: Průměrné teploty a směrodatné odchylky povrchových teplot získaných z optimalizovaných hodnot spektrální záře ve vybraných lokalitách

	Letecká data		Subpixelová metoda		1. metoda	
	$\bar{\theta}$	σ	$\bar{\theta}$	σ	$\bar{\theta}$	σ
hala	61,5	2,5	61,9	5,2	57,4	3,3
řeka	28,1	0,9	25,9	2,5	30,7	1,3
louka	49,2	1,3	49,0	0,7	44,7	1,5
les	36,2	1,2	35,0	2,3	35,4	1,7
hřiště	36,8	1,2	37,2	1,3	39,6	2,5

Zdroj: vlastní tvorba

Na závěr je však nutné konstatovat, že dle dat z Tabulky 4.4 si v globálním měřítku, tedy v celém zájmovém území, vedla subpixelová metoda nejhůře ze všech testovaných metod. Průměrná chyba ve stanovené povrchové teplotě dosahovala 5,4 °C, což je o 0,9 °C horší výsledek, než u 3. metody.

Tabulka 4. 4: Absolutní rozdíly povrchových teplot z optimalizovaných hodnot spektrální záře

Subpixelová metoda	1. metoda	2. metoda	3. metoda	4. metoda
5,40	4,68	4,52	4,50	5,22

Zdroj: vlastní tvorba

KAPITOLA 5

Diskuze

Následující text je rozdělen na čtyři části, ve kterých budou postupně diskutována tato témata – zvolený pracovní postup, dosažené výsledky, naplnění cílů a ověření hypotéz a možnosti dalšího výzkumu.

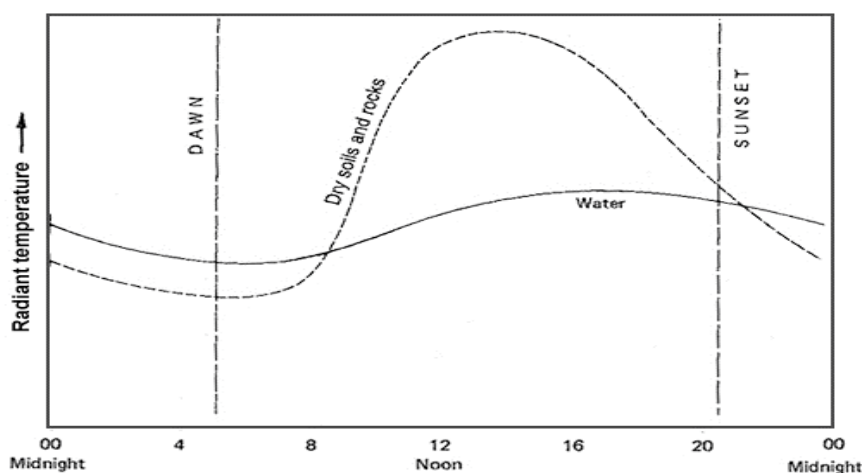
5.1 Zvolený pracovní postup

Zvolený pracovní postup vycházel z předpokladu, že pixel u infračervených termálních dat Landsat 8 vyjadřuje průměrnou hodnotu spektrální záře z celé plochy, kterou pokrývá. Na základě tohoto předpokladu byla vytvořena metoda, jejímž cílem bylo se subpixelovou přesností tuto hodnotu spektrální záře rozdělit mezi třídy krajinného pokryvu s určenou emisivitou, které se v původním pixelu nacházely, a stanovit povrchovou teplotu s větší přesností než současné metody. Klíčovými prvky metody byla kvalita použitých dat, vhodnost vytvořeného klasifikačního systému a následná přesnost klasifikace, ze které vycházel i výpočet koeficientů spektrální záře.

5.1.1 Data

Jedním ze základních požadavků pro výpočet koeficientů spektrální záře a následnou verifikaci použité metody byl podobný termín pořízení družicových i leteckých dat zvoleného zájmového území v Brně. Tento požadavek se v zásadě podařilo naplnit – družicová data byla pořízena dne 19. 8. 2018 v 11:45 místního času, letecká data pak dne 20. 8. 2018 mezi 12. a 13. hodinou místního času. Ačkoli byl v termínu pořízení dat rozdíl jednoho dne, na základě analýzy meteorologických ukazatelů z místní meteorologické stanice bylo zjištěno, že podmínky byly v oba dva dny téměř stejné. Časový interval denní doby, ve kterém byla data pořízena, pak činil cca 1 hodinu a 15 minut. Ačkoli se povrchové teploty v tomto intervalu mohly měnit a s velkou pravděpodobností k tomu i došlo, viz Obrázek 5.1 s ukázkou změny jasové teploty holých půd a vody, byla data pro účely stanovení koeficientů spektrální záře a následné verifikace zvolena jako vhodná. Ideálním případem by byla naprosto totožná doba pořízení družicových i leteckých dat, tedy stejný den i hodina pořízení, ale v rámci vyhledávání dat nebyla tato podmínka splněna a zvolená data byla nejlepší možnou volbou.

Obrázek 5.1: Změna jasové teploty odlišných typů zemského povrchu během dne



Zdroj: HUMBOLDT SU (2019)

Důležitý vliv na výsledky subpixelové metody mělo předzpracování družicových dat Landsat 8. Infračervená termální data, která jsou distribuována formou datových produktů o kontrované kvalitě, jsou z důvodů lepší prostorové kompatibility s ostatními pásmy převzorkována kubickou konvolucí³⁰ z velikosti pixelu 100 m na 30 m USGS (2018A). Tento proces výrazně ovlivňuje hodnotu převzorkovaných pixelů, avšak protože nebyla nepředzpracovaná data dohledatelná, byla analýza metody provedena na převzorkovaných datech. Při porovnávání spektrálního záře v rastroch z družicových a leteckých dat byl však nalezen výrazný nepoměr mezi průměrnými hodnotami této radiometrické veličiny v zájmovém území – cca $10,27 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ u družicových dat a cca $11,82 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ u leteckých dat. Je otázkou, zda nebyl tento rozdíl způsoben spíše nižší citlivostí družicového senzoru na dopadající záření než převzorkováním dat. Tento fakt měl však výrazný vliv na průměrné absolutní rozdíly ve stanovených povrchových teplotách, které činily více než $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.1.2 Klasifikační systém

Jednou z nejdůležitějších částí celého postupu bylo vytvoření vhodného klasifikačního systému, který by dokázal rozdělit krajinný pokryv městského typu na potřebný počet

³⁰ Kubická konvoluční metoda převzorkování rastrových dat vypočítává novou hodnotu pixelu ze sousedních 16 nejbližších pixelů. Použití této metody má za následek spojitý a méně ostrý výstup, což v tomto případě znamenalo ztrátu informace o rozložení spektrálního záření a celkové snížení její průměrné hodnoty v rámci zájmového území.

tříd, kterým bylo možné přiřadit jednotnou hodnotu povrchové emisivity a koeficientu spektrální záře.

Záměrem metody byla optimalizace klasifikačního systému na povrchy v českých městech. Na základě poznatků z práce SOBRINA A KOL. (2012) a vizuální interpretace ortofota zájmového území bylo přistoupeno ke stanovení následujících tříd – voda, zelená tráva, suchá tráva, stromy, holá půda, beton, asfalt, světlá střecha, tmavá střecha, betonová střecha, asfaltová střecha a kovová střecha. Vhodné zvolení těchto tříd bylo testováno již v průběhu klasifikace povrchu zájmového území na jednotlivé třídy. Ačkoli hodnocení přesnosti klasifikace bylo v zásadě pozitivní, hodnota Kappa Indexu byla rovna 0,8897, dle vizuálního hodnocení byl výsledek horší. Problémy s klasifikací byly např. voda, která byla často mylně vyhodnocována v oblastech stínů velkých budov, a v budoucím výzkumu v této oblasti by bylo nutné rozšířit klasifikační systém o tuto třídu. Dalším problémem bylo seskupení osluněných i stinných střech do jedné třídy, kdy tento fakt způsobil extrémně vysoké směrodatné odchylky v průměrné spektrální záři těchto tříd – střecha světlá $0,974 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, střecha tmavá $1,128 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, střecha betonová $0,907 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ střecha asfaltová $1,380 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$, střecha kovová $1,733 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ nižších hodnot dosahovaly třídy voda a vegetace. V budoucím výzkumu by tak bylo vhodné testovat zvolení tříd na menším území, aby mohly být odhaleny chybně stanovené či nepoužité třídy.

5.1.3 Určení koeficientů spektrální záře

Přesnost stanovení koeficientů spektrální záře úzce souvisela s vytvořeným klasifikačním systémem a s přesností klasifikace zájmového území (již bylo zmíněno v předchozí podkapitole). Dle analýzy výsledků metody na optimalizovaných datech, konkrétně na vybraných lokalitách (hala, řeka, louka, les, hřiště) bylo zjištěno, že se jejich hodnoty podařilo stanovit relativně přesně. Kromě řeky, kde byla rozdíl mezi verifikačními daty $2,2 \text{ }^\circ\text{C}$, se jinak rozdíl pochyboval od $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ do $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Limitem koeficientů spektrální záře je však jejich použitelnost pouze pro určitou denní dobu a roční období. Jelikož je hodina, kdy bývají družicové snímky Landsat pořizovány, konstantní, jednalo by se především o určení těchto koeficientů pro různá roční období. Tepelné chování povrchů má v důsledku jejich odlišné tepelné kapacity, konduktivity a inercie výraznou dynamiku – např. třída voda, která má v letních

měsících hodnotu koeficientu, nejnižší by měla tuto hodnotu v zimních měsících jednu z nejvyšších (záleží samozřejmě na aktuálních meteorologických podmínkách). Ideálním řešením by proto bylo vytvoření Look Up Table (LUT), tedy tabulka s hodnotami průměrné spektrální záře dané třídy v průběhu roku, či za různých meteorologických podmínek. Řešení tohoto problému by však bylo poměrně časově i finančně náročné.

5.2 Dosažené výsledky

Na základě výsledků plynoucích z družicových dat je nutné konstatovat, že se metoda v globálním měřítku příliš neosvědčila. Dle rozdílů v absolutních chybách od verifikačních dat si vedla pouze průměrně, viz Tabulka 4.2 a subpixelová metoda neumožnila zpřesnění stanovení povrchových teplot.

V případě aplikace metody na optimalizovaná data bylo v lokálním měřítku dosaženo významného upřesnění prostorového rozložení i hodnot povrchových teplot. Lepší výsledky byly pozorovatelné i v rámci teplotního profilu, kdy se křivka povrchové teploty subpixelové metody v některých oblastech téměř kryla s verifikační křivkou a dosahoval zde i nejvyšších hodnot korelačního koeficientu (0,779). Jako kladné rovněž hodnotím zmírnění vlivu nízké emisivity na výsledné hodnoty povrchové teploty. V globálním měřítku ovšem metoda opět selhala a dosahovala v průměru největší absolutní chyby ve stanovené průměrné povrchové teplotě v zájmovém území (5,4 °C).

Jak již bylo napsáno výše, výsledky metody byly do jisté míry ovlivněny především uměle sníženou hodnotou spektrální záře v družicových datech způsobenou převzorkováním rastru kubickou konvoluční metodou USGS (2018A). V případě dostupnosti původních nepřevzorkovaných hodnot by bylo zajímavé metodu otestovat taktéž na těchto datech. Další nepřesnosti plynuly z nedostatečného počtu tříd v klasifikačním systému. Ten byl vytvořen na základě již použitého klasifikačního systému rozdělující povrch z hlediska emisivity, v případě této metody však mělo být uvažováno větší zastoupení tříd kvůli odlišnému chování těchto povrchů v oblasti vyzařování.

5.3 Naplnění cílů a ověření hypotéz

Cíl vytyčený v úvodu práce, tedy přesnější stanovení povrchové teploty z infračervených termálních dat Landsat 8 za využití dat krajinného pokryvu s lepším prostorovým rozlišením, nebyl v globálním měřítku naplněn. Lepších hodnot povrchových teplot bylo dosaženo pouze v některých oblastech, ve většině zájmového území však k upřesnění povrchové teploty nedošlo a výsledky byly velmi podobné nebo horší než u současně používaných metod, které jsou však mnohem jednodušší z hlediska náročnosti na čas a doplňková data.

Hypotézu, že při podrobnější znalosti krajinného pokryvu je možné na základě znalosti pravděpodobné hodnoty emisivity a spektrální záře jeho jednotlivých částí zpřesnit hodnotu povrchové teploty na subpixelové úrovni, se nepovedlo v současné chvíli ověřit.

5.4 Možnosti dalšího výzkumu

Přestože nebyly výsledky subpixelové metody na zpřesňování povrchové teploty v krajině městského typu shledány přínosnými, další podrobnější analýza družicových dat touto formou by mohla v budoucnu dosáhnout lepších výsledků. Prostor ve zlepšení této metody se do jisté míry nachází v lepším sestavení klasifikačního systému a jeho dalšímu testování na menších zájmových územích.

Stejně tak je výzvou korektní stanovení koeficientů spektrální záře a případné vytvoření spektrální knihovny těchto koeficientů. Ačkoli se vlastnosti vyzařování jednotlivých povrchů výrazně proměňují v čase, bylo by zajímavé nalézt, jak dynamicky se tato vlastnost během dne a roku mění a najít v ní zřetelné souvislosti.

KAPITOLA 6

Závěr

Předkládaná práce se zabývala studiem faktorů, které ovlivňují povrchovou teplotu a její měření prostřednictvím dálkového průzkumu Země. Znalosti získané z literární rešerše byly využity pro vytvoření nové metody, jejímž hlavním cílem bylo přesnější stanovení hodnot povrchové teploty z infračervených termálních dat Landsat 8 v oblastech s různorodým krajinným pokryvem, konkrétně s městskými povrchy. Pro testování metody byla kromě družicových dat využita taktéž letecká hyperspektrální data ze senzoru TASI a CASI poskytnutá společností CzechGlobe. Dále byla využita laboratorní data ze spektrální knihovny ECOSTRESS.

Metoda, která byla navržena ke zpřesnění povrchové teploty z družicových dat Landsat 8, však v důsledku tří hlavních ovlivňujících faktorů – podhodnocování spektrální záře družicových dat, nedostatečně správně klasifikovaných tříd krajinného pokryvu a následně i jednotlivých koeficientů spektrální záře nedosáhla očekávaných výsledků. Bylo zjištěno, že metoda v globálním měřítku v některých případech nabývá i větších absolutních chyb ve stanovené povrchové teplotě než ostatní metody. Další výzkum v této oblasti je však i tak nadále možný. V případě rozšíření tříd klasifikačního systému a využití digitálního modelu povrchu pro detekci stinných oblastí by bylo možné metodu optimalizovat. Testování metody by však mělo být prováděno na menší ploše s větší mírou podrobnosti a na nepředzpracovaných datech Landsat 8 s původní velikostí pixelu 100 m. Využitelnost metody je však podmíněna nutností doplňkových dat o krajinném pokryvu a vyzařování v čas pořízení snímku, a tedy a vyšší časovou náročností.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- ARTIS, D., A., CARNAHAN, W., H. (1982): Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. *Remote Sensing of Environment*, č. 12, s. 313–329.
- BARSI, J., A., BARKER, J., L., SCHOTT, J., R. (2003): An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band earth-sensing instrument. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- BARSI, J., A., BRIAN, L., M. (2010): Twenty-five years of Landsat thermal band calibration. *NASA*, 4 s.
- BARSI, J., A., SCHOTT, J., R., PALLUCONI, F., D., HOOK, S., J. (2005): Validation of a web-based atmospheric correction tool for single thermal band instruments. *Earth Observing Systems X*, č. 5882, 7 s.
- BERNALES, A., M., ANTOLIHAI, J., A., SAMONTE, C., CAMPOMANES, F., ROJAS, R., J., DE LA SERNA, A., M., SILAPAN, J. (2016): Modelling the relationship between land surface temperature and landscape patterns of land use land cover classification using multi linear regression models. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, č. 41, s. 851–856.
- BHATTACHARYA, S. A KOL. (2018): *Water Remediation*. Springer, Singapore, Maryland, 246 s.
- DASH, P., GÖTTSCHE, F.-M., OLESEN, F.-S., FISCHER, H. (2002): Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data - theory and practice, current trends. *International Journal of Remote Sensing*, č. 23, s. 1–55.
- DOBROVOLNÝ, P. (1998): *Dálkový průzkum Země, digitální zpracování obrazu*. Masarykova Univerzita, Brno, 210 s.
- GIANNINI, M., B., BELFIORE, O., R., PARENTE, C., SANTAMARIA, R. (2015): Land Surface Temperature from Landsat 5 TM images – comparison of different methods using airborne thermal data. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, č. 3, s. 83–90.
- VAN DE GRIEND, A., A., OWE, M. (1993): On the relationship between thermal emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, č. 11, s. 1119–1131.
- IGUN, E., WILLIAMS, M. (2018): Impact of urban land cover change on land surface temperature. *Global Journal of Environmental Science and Management*, č. 4, s. 47–58.
- JACKSON, M., W. (2009): *Earth observing platforms & sensors*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland, 520 s.
- JIMÉNEZ-MUÑOZ, J., C., SOBRINO, J., A. (2006): Error sources on the land surface temperature retrieved from thermal infrared single channel remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, č. 5, s. 999–1014.
- KOLÁŘ, J. (1990): *Dálkový průzkum Země*. Redakce technické literatury, Praha, 176 s.

- KOLÁŘ, J., HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. (1997): Dálkový průzkum Země 10. *Vydavatelství ČVUT, Praha*, 164 s.
- Landsat Science [online]. Dostupné z: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/> [cit. 1. 5. 2019]
- LI, T., MENG, Q. (2018): A mixture emissivity analysis method for urban land surface temperature. *Landscape and Urban Planning*, č. 179, s. 63–71.
- LI, Y., ZHANG, H., KAINZ, W. (2012): Monitoring patterns of urban heat islands of the fast-growing Shanghai metropolis, China: Using time-series of Landsat TM/ETM+ data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, č. 19, s. 127–138.
- LILLESAND, T., M., KIEFER, R., W. (2000): Remote Sensing and Image Interpretation (4. vydání). *Wiley & Sons, New York*, 724 s.
- MAJKOWSKA, A., KOLENDOWICZ, L., PÓŁROLNICZAK, M., HAUKE, J., CZERNECKI, B. (2017): The urban heat island in the city of Poznań as derived from Landsat 5 TM. *Theoretical and Applied Climatology*, č. 128, s. 769–783.
- MCATEE, B., K., PRATA, A., J., LYNCH, M., J. (2003): The angular behavior of emitted thermal infrared radiation (8–12 mm) at a semiarid site. *Journal of Applied Meteorology*, č. 42, s. 1060–1071.
- MONTANARO, M., GERACE, A., ROHRBACH, S. (2015): Toward an operational stray light correction for the Landsat 8 TIRS. *Applied Optics*, č. 13, s. 3963–3978.
- NICHOL, J. (2009): An emissivity modulation method for spatial enhancement of thermal satellite images in urban heat island analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, č. 5, s. 547–556.
- POKORNÝ, J. (2019): Evapotranspiration. *Encyclopedia of Ecology*, č. 2, s. 292–303.
- POKORNÝ, J., HESSLEROVÁ A KOL. (2018): Význam zeleně pro klima města a možnosti využití termálních dat v městském prostředí. *Urbanismus a územní rozvoj*, č. 1, s. 1–12.
- QIN, Z., KARNIELI, A., BERLINER, P. (2001): A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, č. 22, s. 3719–3746.
- SATTARI, F., HASHIM, M. (2014): A brief review of land surface temperature retrieval methods from thermal satellite sensors. *Middle-East Journal of Scientific Research*, č. 22, s. 757768.
- SCHROEDER, W., OLIVA, P., GIGLIO, B., QUAYLE, B., LORENZ, E., MORELLI, F. (2016): Active fire detection using Landsat-8/OLI data. *Remote Sensing of Environment*, č. 185, s. 210–220.
- SHIRANI-BIDABADIA, N., NASRABADI, T., FARYADI, S., LARIJANI, A., ROODPOSHTI, M., S. (2019): Evaluating the spatial distribution and the intensity of urban heat island using remote sensing, case study of Isfahan city in Iran. *Sustainable Cities and Society*, č. 45, s. 686–692.
- SNYDER, W., C., WAN, Z., ZHANG, Y., FENG, Y.-Z. (1998): Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing*, č. 19, s. 2753–2774.

- SOBRINO, J., A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J., C. A KOL. (2002): Surface emissivity retrieval from digital airborne imaging spectrometer data. *Journal of Geophysical Research*, č. 107, s. 1–13.
- SOBRINO, J., A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J., C., PAOLINI, L. (2004): Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. *Remote Sensing of Environment*, č. 90, s. 434–440.
- SOBRINO, J., A., OLTRA-CARRIÓ, R. A KOL. (2012): EMISSIVITY MAPPING OVER URBAN AREAS USING A CLASSIFICATION-BASED APPROACH: APPLICATION TO THE DUAL-USE EUROPEAN SECURITY IR EXPERIMENT (DESIREX). *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION*, č. 18, s. 141–147.
- USGS (2016): Landsat products and processing – 2016 objectives and plans, s. 6
- USGS (2017): Landsat Collection 1 Level 1 product definition, s. 32.
- USGS (2018a): Landsat 8 Data users handbook, s. 115.
- USGS (2018b): Landsat Collections, s. 2.
- USGS: Landsat Missions [online]. Dostupné z: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/> [cit. 1. 5. 2019]
- VALOR, E., CASELLES, V. (1996): Mapping land surface emissivity from NDVI – Application to European, African, and South American areas. *Remote Sensing of Environment*, č. 57, s. 167–184.
- WINDAHL, E., BEURS, K. (2016): An intercomparison of Landsat land surface temperature retrieval methods under variable atmospheric conditions using in situ skin temperature. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, č. 51, s. 11–27.
- ZEMEK, F. A KOL. (2014): Letecký dálkový průzkum Země. *Centrum výzkumu globální změny, AV ČR, v. v. i., Brno*, 155 s.
- ZHANG, J., WANG, Y. (2008): Study of the relationships between the spatial extent of surface urban heat islands and urban characteristic factors based on Landsat ETM+ data. *Sensors*, č. 8, s. 7453–7468.

SEZNAM ZDROJŮ

- ARCČR (2019): Digitální vektorová geografická databáze České republiky ArcČR® 500.
- BYJUS'S (2019): BYJU'S The Learning App [online]. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: <https://byjus.com/physics/electromagnetic-radiation/>
- CZECHGLOBE (2019): Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. – CzechGlobe. Produkt: Letecká hyperspektrální data ze senzorů CASI a TASI. Sběr dat: 20. 8. 2018.
- ČÚZK (2019): Ortofoto České republiky [online]. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/WMS_ORTOFOTO_PUB/WMSservice.aspx
- ECOSTRESS SPECLIB (2018): ECOSTRESS Spectral Library Version 1.0. Dostupné z: <https://speclib.jpl.nasa.gov/>
- HUMBOLDT SU (2019): Humboldt State University [online]. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: http://gsp.humboldt.edu/olm_2015/Courses/GSP_216_Online/lesson8-1/interpreting-imagery.html
- LANDSAT (2019): Image courtesy of the U.S. Geological Survey [online]. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- THE URBAN ATLAS (2012): Copernicus Land Monitoring Service [online]. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/urban-atlas-2012>
- WIKIPEDIA (2019A): Wikipedia – otevřená encyklopedie [online]. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum
- WIKIPEDIA (2019B): Wikipedia – otevřená encyklopedie [online]. [cit. 19. 5. 2019]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wien%27s_displacement_law

SEZNAM PŘÍLOH

<i>Příloha 1: Seznam vzorků knihovny ECOSTRESS SpecLib využitých pro výpočet emisivity.....</i>	<i>I</i>
<i>Příloha 2: Skript pro subpixelové stanovení teploty povrchu z termálních dat Landsat</i>	<i>II</i>

Příloha 1: Seznam vzorků knihovny ECOSTRESS SpecLib využitých pro výpočet emisivity

manmade.concrete.constructionconcrete.solid.all.0598uuucnc.jhu.becknic.spectrum
manmade.concrete.pavingconcrete.solid.all.0092uuu_cnc.jhu.becknic.spectrum
manmade.concrete.pavingconcrete.solid.all.0397uuucnc.jhu.becknic.spectrum
manmade.concrete.pavingconcrete.solid.all.0424uuucnc.jhu.becknic.spectrum
manmade.concrete.pavingconcrete.solid.all.0425uuuasp.jhu.becknic.spectrum
manmade.road.pavingasphalt.solid.all.0095uuuasp.jhu.becknic.spectrum
manmade.road.pavingasphalt.solid.all.0096uuuasp.jhu.becknic.spectrum
manmade.road.pavingasphalt.solid.all.0674uuuasp.jhu.becknic.spectrum
manmade.roofingmaterial.tile.solid.all.0484uuupot.jhu.becknic.spectrum
manmade.roofingmaterial.metal.solid.all.0384uuualm.jhu.becknic.spectrum
manmade.roofingmaterial.metal.solid.all.0525uuustla.jhu.becknic.spectrum
manmade.roofingmaterial.metal.solid.all.0525uuustlb.jhu.becknic.spectrum
manmade.roofingmaterial.metal.solid.all.0526uuustla.jhu.becknic.spectrum
manmade.roofingmaterial.metal.solid.all.0681uuucop.jhu.becknic.spectrum
manmade.roofingmaterial.metal.solid.all.0682uuucop.jhu.becknic.spectrum
manmade.roofingmaterial.metal.solid.all.0692uuucop.jhu.becknic.spectrum
water.tapwater.none.liquid.all.tapwater.jhu.becknic.spectrum

Příloha 2: Skript pro subpixelové stanovení teploty povrchu z termálních dat Landsat

```
# Import arcpy library and other modules
import arcpy
from arcpy.sa import *
import os

# FUNCTIONS
def raster_to_points():
    """This function converts raster pixels to points."""
    rasters = arcpy.ListRasters("*", "TIF")
    radiance = None
    for raster in rasters:
        if raster.endswith("B10_RC.TIF"):
            radiance = Raster(raster)
    arcpy.RasterToPoint_conversion(radiance, "subset_points.shp", "VALUE")

def points_to_vector_grid():
    """This function converts points to vector grid."""
    rasters = arcpy.ListRasters("*", "TIF")
    radiance = None
    for raster in rasters:
        if raster.endswith("B10_RC.TIF"):
            radiance = Raster(raster)

    # Gets raster parameters.
    top_result = arcpy.GetRasterProperties_management(radiance, "TOP")
    top = float(str(top_result.getOutput(0)))
    bottom_result = arcpy.GetRasterProperties_management(radiance, "BOTTOM")
    bottom = float(str(bottom_result.getOutput(0)))
    left_result = arcpy.GetRasterProperties_management(radiance, "LEFT")
    left = float(str(left_result.getOutput(0)))
    right_result = arcpy.GetRasterProperties_management(radiance, "RIGHT")
    right = float(str(right_result.getOutput(0)))

    origin_coord = str(left) + " " + str(bottom)
    y_axis_coord = str(left) + " " + str(bottom + 10.0)
    antiorigin_coord = str(right) + " " + str(top)

    cell_x_result = arcpy.GetRasterProperties_management(radiance,
"CELLSIZEX")
    cell_x = float(str(cell_x_result.getOutput(0)))
    cell_y_result = arcpy.GetRasterProperties_management(radiance,
"CELLSIZEY")
    cell_y = float(str(cell_y_result.getOutput(0)))

    rows_result = arcpy.GetRasterProperties_management(radiance, "ROWCOUNT")
    rows = float(str(rows_result.getOutput(0)))
    columns_result = arcpy.GetRasterProperties_management(radiance,
"COLUMNCOUNT")
    columns = float(str(columns_result.getOutput(0)))

    arcpy.CreateFishnet_management("subset_net.shp",
                                origin_coord,
                                y_axis_coord,
                                cell_x, cell_y,
                                rows, columns,
                                antiorigin_coord,
                                "NO_LABELS", "#", "POLYGON")

    # Define projection of the vector grid.
    arcpy.DefineProjection_management("subset_net.shp", 32633)

def spatial_join():
    """This function execute spatial join to load values of spectral radiance
```



```

from points to polygons of vector net."""
in_feature = "subset_net.shp"
target_feature = "subset_points.shp"
out_feature = "subset_LN.shp"
arcpy.SpatialJoin_analysis(in_feature, target_feature, out_feature,
"JOIN_ONE_TO_ONE", "KEEP_ALL")

# Remove unnecessary fields from attribute table.
feature = "subset_LN.shp"
keep = ["FID", "Shape", "GRID_CODE"]
try:
    discard = []
    for field in [f.name for f in arcpy.ListFields(feature) if f.type !=
"Geometry"]:
        if field not in keep:
            discard.append(field)
            arcpy.DeleteField_management(feature, discard)
except ImportError:
    arcpy.GetMessages(2)

def calculate_percentage():
    """This function calculates the percentage of a class in the area of the
original pixel of size 30x30m."""
    rasters = arcpy.ListRasters("*", "TIF")
    classes = None
    for raster in rasters:
        if raster.endswith("subset_classes.tif"):
            classes = Raster(raster)
    grid = "subset_net.shp"
    TabulateArea(grid, "FID", classes, "Value",
"subset_classes_percentage.dbf", 2)

def join_table():
    """This function joins the table with percentage to the vector net."""
    in_feature = "subset_LN.shp"
    in_field = "FID"
    join_feature = "subset_classes_percentage.dbf"
    join_field = "FID"
    field_list = ["VALUE_1", "VALUE_2", "VALUE_3", "VALUE_4", "VALUE_5",
"VALUE_6", "VALUE_7", "VALUE_8", "VALUE_9", "VALUE_10", "VALUE_11",
"VALUE_12"]
    arcpy.JoinField_management(in_feature, in_field, join_feature, join_field,
field_list)

def calculate_lp():
    """This function calculates the proportional radiance based on class co
efficient."""
    in_feature = "subset_LN.shp"
    field_name = "LP"
    field_precision = "#"
    field_scale = "#"
    expression = "( !GRID_CODE! * 100.0) / ( !VALUE_1! / 900.0 * 100.0 * 0.644
+ !VALUE_2! / 900.0 * 100.0 * 0.741 + !VALUE_3! / 900.0 * 100.0 * 0.878 +
!VALUE_4! / 900.0 * 100.0 * 0.732 + !VALUE_5! / 900.0 * 100.0 * 0.869 +
!VALUE_6! / 900.0 * 100.0 * 0.848 + !VALUE_7! / 900.0 * 100.0 * 0.824 +
!VALUE_8! / 900.0 * 100.0 * 0.849 + !VALUE_9! / 900.0 * 100.0 * 0.905 +
!VALUE_10! / 900.0 * 100.0 * 1.000 + !VALUE_11! / 900.0 * 100.0 * 0.978 +
!VALUE_12! / 900.0 * 100.0 * 0.602)"

    arcpy.AddField_management(in_feature, field_name, "DOUBLE",
field_precision, field_scale)
    arcpy.CalculateField_management(in_feature, field_name, expression,
"PYTHON_9.3")

```

```

def vector_to_raster():
    """This function converts vector grid to raster."""
    in_feature = "subset_LN.shp"
    field_value = "LP"
    out_raster = "subset_LN.tif"
    assignment_type = "CELL_CENTER"
    priority_field = "#"
    cell_size = 2

    arcpy.PolygonToRaster_conversion(in_feature, field_value, out_raster,
assignment_type, priority_field, cell_size)

def assign_coefficient():
    """This function assigns coefficient of spectral radiance value to proper
class."""
    rasters = arcpy.ListRasters("*", "TIF")
    classes = None
    for raster in rasters:
        if raster.endswith("subset_classes.tif"):
            classes = Raster(raster)
    out_c = Con((classes == 1), 0.644,
                Con((classes == 2), 0.741,
                    Con((classes == 3), 0.878,
                        Con((classes == 4), 0.732,
                            Con((classes == 5), 0.869,
                                Con((classes == 6), 0.848,
                                    Con((classes == 7), 0.824,
                                        Con((classes == 8), 0.849,
                                            Con((classes == 9), 0.905,
                                                Con((classes == 10), 1.000,
                                                    Con((classes == 11),
0.978,
                                                                 Con((classes == 12),
0.602)))))))))))))
    out_c.save("subset_C.TIF")

def assign_emissivity():
    """This function assigns emissivity value to proper class."""
    rasters = arcpy.ListRasters("*", "TIF")
    classes = None
    for raster in rasters:
        if raster.endswith("subset_classes.tif"):
            classes = Raster(raster)
    out_e = Con((classes == 1), 0.990,
                Con((classes == 2), 0.980,
                    Con((classes == 3), 0.971,
                        Con((classes == 4), 0.990,
                            Con((classes == 5), 0.952,
                                Con((classes == 6), 0.952,
                                    Con((classes == 7), 0.960,
                                        Con((classes == 8), 0.969,
                                            Con((classes == 9), 0.969,
                                                Con((classes == 10), 0.952,
                                                    Con((classes == 11),
0.960,
                                                                 Con((classes == 12),
0.830)))))))))))))
    out_e.save("subset_E.TIF")

def calculate_radiance_subpixel():
    """This function calculates new value of subpixel spectral radiance."""
    rasters = arcpy.ListRasters("*", "TIF")
    radiance = None
    coef = None
    for raster in rasters:

```

```

        if raster.endswith("subset_LN.tif"):
            radiance = Raster(raster)
        elif raster.endswith("subset_C.TIF"):
            coef = Raster(raster)
    out_ls = Times(radiance, coef)
    out_ls.save("subset_LS.TIF")

def get_parameters():
    """This function gets parameters provided in the Landsat metadata file
    (...MTL.txt)."""
    global k_1_band_10, k_2_band_10
    files = os.listdir(path)
    for names in files:
        if names.endswith("MTL.txt"):
            txt_file = names
    with open(path + "\\ " + txt_file, "r") as file:
        for line in file:
            if line.startswith("    K1_CONSTANT_BAND_10"):
                k_1_band_10 = float(line[26:]) # Band-specific (10) thermal
conversion constant k1
            elif line.startswith("    K2_CONSTANT_BAND_10"):
                k_2_band_10 = float(line[26:]) # Band-specific (10) thermal
conversion constant k2
    return k_1_band_10, k_2_band_10

def calculate_brightness_temperature(k_1_band_10, k_2_band_10):
    """This function converts top-of-atmosphere land leaving spectral radiance
    to land brightness temperature."""
    rasters = arcpy.ListRasters("*", "TIF")
    for raster in rasters:
        if raster.endswith("subset_LS.TIF"):
            radiance = Raster(raster)
    out_bt = (k_2_band_10 / Ln(k_1_band_10 / radiance + 1))
    out_bt.save("subset_BT.TIF")

def calculate_land_surface_temperature():
    """This function converts land brightness temperature to land surface
    temperature (LST)."""
    rasters = arcpy.ListRasters("*", "TIF")
    for raster in rasters:
        if raster.endswith("BT.TIF"):
            bt = Raster(raster)
        elif raster.endswith("subset_E.TIF"):
            e = Raster(raster)
    out_lst = bt / (1 + (10.8 * bt) / 14388 * Ln(e)) - 273.15
    out_lst.save("subset_LST.TIF")

# PROGRAM ITSELF
# Steps of the programme
print("STEP 1: Converting raster pixels to points.")
print("STEP 2: Converting points to vector grid.")
print("STEP 3: Loading values of spectral radiance from points to net
polygons.")
print("STEP 4: Calculating the percentage of a class in the area of the
original pixel of size 30x30m.")
print("STEP 5: Joining the table with percentage to the net.")
print("STEP 6: Calculating proportional radiance based on class coefficient.")
print("STEP 7: Converting vector grid to raster.")
print("STEP 8: Assigning coefficient of spectral radiance value to proper
class.")
print("STEP 9: Assigning emissivity value to proper class.")
print("STEP 10: This function calculates new value of subpixel radiance.")
print("STEP 11: Calculating brightness temperature")
print("STEP 12: Calculating land surface temperature")

```

```

# Get workspace
workspace = os.getcwd()

# Check out arcpy extension and enable overwriting
arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
arcpy.env.overwriteOutput = True

# Find all directories
directories = list()
for (root, dirs, files) in os.walk(workspace):
    if not dirs:
        directories += [os.path.join(root)]

# Iterate through all directories
for directory in range(len(directories)):
    # Set arcpy workspace and scratch workspace
    arcpy.env.workspace = directories[directory]
    arcpy.env.scratchWorkspace = directories[directory]

    # Get path and folder name
    path = directories[directory]
    folder = path[-40:]

    print(directories[directory] + "..."),
    print(" Step 1..."),
    raster_to_points()
    print(" Step 2..."),
    points_to_vector_grid()
    print(" Step 3..."),
    spatial_join()
    print(" Step 4..."),
    calculate_percentage()
    print(" Step 5..."),
    join_table()
    print(" Step 6..."),
    calculate_lp()
    print(" Step 7..."),
    vector_to_raster()
    print(" Step 8..."),
    assign_coefficient()
    print(" Step 9..."),
    assign_emissivity()
    print(" Step 10..."),
    calculate_radiance_subpixel()
    print(" Step 11..."),
    get_parameters()
    calculate_brightness_temperature(k_1_band_10, k_2_band_10)
    print(" Step 12...")
    calculate_land_surface_temperature()

print('')
print("COMPLETE")

```