

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Optimalizace zpracování družicových dat pro monitoring kvality vody

Vít Mergl

Diplomová práce

2020

University of Pardubice

Faculty of Chemical Technology

Optimization of satellite data processing for water quality monitoring

Vit Mergl

Diploma thesis

2020

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vít Mergl**
Osobní číslo: **C18508**
Studijní program: **N2807 Chemické a procesní inženýrství**
Studijní obor: **Ochrana životního prostředí**
Téma práce: **Optimalizace zpracování družicových dat pro monitoring kvality vod**
Zadávací katedra: **Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte literární rešerši na oblast monitoringu kvality vod na základě dat dálkového průzkumu Země. Pozornost zaměřte především na zpracování obrazových dat ze satelitních snímků pro modelování kvality vody a aplikaci modelů.
2. Na základě dostupných snímků z družice Sentinel-2 a výsledků in-situ měření chlorofylu-a vytvořte modely pro odhad koncentrace chlorofylu-a v povrchové vrstvě vody v několika variantách zpracování družicových snímků a výsledné modely porovnejte.
3. Výsledky experimentů vhodným způsobem zpracujte, proveďte jejich diskusi a na základě porovnání výsledků zhodnoťte, který z postupů se jeví jako nejlepší.
4. Diplomovou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 9/2012 „Pravidla pro zveřejňování závěrečných prací a jejich základní jednotnou formální úpravu“ v platném znění.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Brunclík, Ph.D.**
Ústav environmentálního a chemického inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **5. února 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **7. května 2020**



prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.
děkan

L.S.



prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 5. února 2020

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 26.6.2020

Vít Mergl

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Tomášovi Brunclíkovi za poskytnutí materiálů, za pomoc, připomínky a rady, které mi věnoval během zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu.

ANOTACE

Tato práce se zabývá atmosférickou korekcí, která má vliv na modely pro stanovení obsahu chlorofylu-a z družicových snímků. V práci jsou popsány čtyři varianty atmosférické korekce Sen2cor, Sen2cor+igrid.atcor, MAJA, MAJA+i.grid.atcor. V praktické části jsou všechny atmosférické korekce vyzkoušeny na snímcích s vodními plochami nacházející se mezi Hradcem Králové a Pardubicemi. V závěru práce je vybrán nejlepší model pro stanovení obsahu chlorofylu-a.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dálkový průzkum Země, data, atmosférická korekce, digitální číslo, Sentinel-2

TITLE

Optimization of satellite data processing for water quality monitoring

ANNOTATION

This thesis is focused on atmospheric correction, which has influence on determining chlorophyll-a content from satellite imagery. The thesis describes four atmospheric correction variants with Sen2cor, Sen2cor+i.grid.atcor, MAJA and MAJA+i.grid.atcor. In next part, all corrections are tested on an image with water surfaces located between Hradec Králové and Pardubice. At the end of thesis, the best model is selected for determination of chlorophyll-a content.

KEYWORDS

remote sensing, data, atmospheric correction, digital number, Sentinel-2

Obsah

Úvod	13
1 Teoretická část	14
1.1 Monitoring povrchových vod	14
1.1.1 Monitoring životního prostředí obecně	14
1.1.2 Monitoring povrchových vod	15
1.1.3 Parametry kvality povrchových vod	16
1.2 Chlorofyl-a	20
1.2.1 Spektrální vlastnosti chlorofylu-a	21
1.2.2 Význam jako indikátor kvality vody	22
1.2.3 Norma pro spektrofotometrické stanovení chlorofylu-a	23
1.3 Dálkový průzkum Země v monitoringu kvality vod	24
1.3.1 Principy dálkového průzkumu Země	24
1.3.2 Družice Sentinel-2A a 2B	26
1.3.3 Principy atmosférické korekce snímků	27
1.3.4 Atmosférická korekce Sen2Cor	30
1.3.5 Atmosférická korekce MACSS/MAJA	33
1.3.6 Relativní prostorově variabilní radiometrická normalizace	34
1.3.7 Příklady algoritmů pro výpočet parametrů kvality vody	35
2 Experimentální část	41
2.1 Zájmová oblast	41
2.2 Odběr a analýza vzorků	42
2.3 Zpracování obrazových dat z družice Sentinel-2	44
2.4 Vyhodnocení korelace a vytvoření modelů	45
3 Výsledky a diskuse	48
3.1 Sen2cor	48
3.2 Sen2cor+i.grid.atcor	49

3.3	MAJA	51
3.4	MAJA+i.grid.atcor	52
3.5	Porovnání výsledků	54
4	Závěr	59
	Literatura	60

SEZNAM ZKRATEK

CHOPAV – Chráněné oblasti přirozené akumulace vod

OP – ochranná pásma

KHS – krajská hygienická stanice

MZ – Ministerstvo zdravotnictví

DPZ – dálkový průzkum Země

DN – digital number, digitální číslo

PIF – pseudo-invariant features, pseudo-invariantní funkce

RCS – radiometric control sets, radiometrické řídicí sady

TOA – at the top of atmosphere, nad atmosférou

VIS – visible, viditelná oblast

RE – red edge, červená oblast

NIR – near infrared, blízká infračervená oblast

SWIR – shortwave infrared, krátkovlnná infračervená oblast

MACSS – Multi-sensor Atmospher Correction and Cloud Screening, multisenzorová korekce atmosféry a cloudové promítání

DOS – dark object subtraction, odčítání tmavých objektů

RRN – relative radiometric normalization, relativní radiometrická normalizace

PI – pseudo-invariant, pseudo-invariantní

OC – ocean color, barva oceánu

MERIS – Medium Resolution Imaging Spectrometer, zobrazovací spektrometr se středním rozlišením

DDV – dense dark vegetation, tmavá hustá vegetace

AOT – aerosol optical thickness, optická tloušťka aerosolu

RMSE – root mean square error, střední kvadratická chyba

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Některé sledované parametry jakosti vod (převzato z [5]).	16
Obr. 2: Struktura chlorofylu (převzato z [15]).	20
Obr. 3: Absorbce vlnových délek pro různé formy chlorofylu (převzato z [18]).	21
Obr. 4: Absorbce vlnových délek jednotlivých pigmentů (převzato z [18]).	21
Obr. 5: Obrazová spektra (převzato z [19]).	22
Obr. 6: Pohyb družice Landsat se synchronní dráhou letu (převzato z [26]).	25
Obr. 7: Spektrální pásma družice Sentinel-2A (převzato z [31]).	27
Obr. 8: Klasifikace scény (převzato z [30]).	30
Obr. 9: Korekce AOT (převzato z [30]).	31
Obr. 10: Vytvořená mapa vodní páry pomocí kanálu 8a a B9 (převzato z [30]).	32
Obr. 11: Korekce vysoké oblačnosti (převzato z [30]).	33
Obr. 12: Příklad časových řad odrazů vrcholů atmosféry (převzato z [34]).	34
Obr. 13: Poměr simulované reflektance v kanálech Landsat TM se skutečnou koncentrací chlorofylu-a (převzato z [19]).	36
Obr. 14: Mapa chlorofylu-a v zátocě Delaware Bay vytvořená pomocí neurální sítě (převzato z [43]).	39
Obr. 15: Mapa všech vzorkovaných vodních ploch.	41
Obr. 16: Oblast pokrytí družicového snímku.	42
Obr. 17: Družicová snímek s body odběru vzorků z data 20.06.2019.	45
Obr. 18: Tabulka vytvořená v aplikaci LibreOffice Calc.	46
Obr. 19: Lineární a polynomické proložení modelu.	47
Obr. 20: Kalibrační graf s polynomickým proložením pro korekci Sen2cor	48
Obr. 21: Validační graf pro nejlepší model po korekci Sen2cor	49
Obr. 22: Kalibrační graf s lineárním proložením pro korekci sen2cor+i.grid.atcor	50
Obr. 23: Validační graf pro nejlepší model po korekci Sen2cor+i.grid.atcor	50
Obr. 24: Kalibrační graf s lineárním proložením pro korekci MAJA	51
Obr. 25: Validační graf pro nejlepší model po korekci MAJA	52
Obr. 26: Kalibrační graf s lineárním proložením pro korekci MAJA+i.grid.atcor	53
Obr. 27: Validační graf pro nejlepší model po korekci MAJA+i.grid.atcor	53
Obr. 28: Mapa chl-a po korekci Sen2cor	56
Obr. 29: Mapa chl-a po korekci Sen2cor+i.grid.atcor	56

Obr. 30: Mapa chl-a po korekci MAJA	57
Obr. 31: Mapa chl-a po korekci MAJA+i.grid.atcor	57

ÚVOD

Voda je jednou ze základních podmínek pro život. Otázka kvality vody se v současné době stává stále více aktuálním tématem. Dlouhá období sucha, nedostatek zdrojů povrchových vod nebo zemědělská činnost nutí člověka pečovat o kvalitu těchto zdrojů. Povrchové vody jsou také nedílnou součástí mnoha ekosystémů. Mezi povrchové vody řadíme rybníky a řeky slouží například pro rybolov nebo vodní dopravu, koupaliště, kde je kontrola kvality velmi důležitá, písníky nebo vodní nádrže (přehrady) sloužící jako zdroj pitné vody. Z environmentálního a politického zájmu je proto důležité správné řízení využívání vod pro jejich udržitelný rozvoj.

Kvalitou vody se zabývá legislativa ČR především zákon o vodách č. 254/2001 Sb. Kontrolu kvality vody je možné provádět odběry vzorků a následně je zpracovat v laboratoři. Tento způsob zjišťování a kontroly kvality vody je poměrně zdlouhavý a ekonomicky náročný, avšak přesný a umožňuje sledovat široké spektrum parametrů kvality vody. Dalším způsobem je využití dálkového průzkumu Země. Tato metoda je časově i ekonomicky méně náročná, avšak umožňuje stanovit pouze některé parametry kvality vody s určitou odchylkou. Aby bylo možné zvládnout rostoucí požadavky na rozsah kontrol kvality vod, bude do budoucna nutné oba přístupy kombinovat.

Hlavním cílem diplomové práce bude zpracování družicových dat pro monitoring vod, respektive bude zaměřena na jeden ze základních kroků zpracování družicových dat pomocí atmosférické korekce. V práci budou provedeny celkem 4 varianty atmosférické korekce. V první části diplomové práce bude stručně popsán dálkový průzkum Země, který se stal s postupem let nedílnou součástí v mnoha environmentálních odvětvích včetně monitoringu vod. Principem je využití družicových snímků, jejich úprava a stanovení koncentrace chlorofylu-a ale i jiných parametrů kvality vod. V další části budou kapitoly zaměřeny na různé atmosférické korekce, které jsou jedním z kroků úpravy družicových snímků před jejich použitím. Úpravou je myšleno potlačení atmosférických vlivů, které by znehodnocovaly vytvořené modely. V praktické části budou uvedeny nejlepší modely pro různé varianty atmosférické korekce jejich srovnání a diskuse především z hlediska vlivu atmosférické korekce na výsledky. V závěru budou shrnuty poznatky vyplývající z dosažených výsledků a vyhodnocena nejlepší varianta atmosférické korekce spolu s nejlepším dosaženým modelem chlorofylu-a ve vodách.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Monitoring povrchových vod

1.1.1 Monitoring životního prostředí obecně

Monitoring životního prostředí slouží k objektivnímu zjištění změn jednotlivých ukazatelů složek životního prostředí v jednotlivých územních celcích. Jedná se o dlouhodobou systematickou práci, na základě které je možné realizovat nápravná opatření a zároveň slouží ke kontrolní činnosti. Časová náročnost monitoringu závisí na třech koncepcích. Jedná se o koncepci studijní, monitorovací a kontrolní. První fáze trvá zpravidla 3 roky a je zpracována úvodní teoretická studie, včetně metodického postupu monitoringu [1]. Po optimalizaci celého systému probíhá dlouhodobý monitoring.

Princip monitoringu spočívá v měření a sledování ukazatelů, které se podílejí na zhoršené kvalitě životního prostředí a zároveň slouží k zjištění aktuálního stavu a modelování budoucího vývoje. Naměřené výsledky se porovnávají s hodnotami látek v tzv. nezatížených oblastech. Je tedy nutné provádět srovnávací monitoring pozadový. Monitoring životního prostředí respektive jakýkoliv monitoring vznikl na základě zhoršujícího se stavu ovzduší, vod nebo půdy. V současné době, kdy jsou většinou známy škodlivé vlastnosti látek, slouží spíše jako prevence [1].

Existuje několik metod, kterými lze získávat potřebné informace o složkách životního prostředí. Nejběžnějšími metodami, které se využívají v rámci monitoringu, jsou metody analytické. Princip spočívá buď v měření škodlivých látek přímo na dotčeném území (především analýza ovzduší pomocí detektorů), anebo jsou nejprve odebírány jednotlivé vzorky do vzorkovnic a samotná analýza probíhá v laboratoři. Dalším způsobem je dálkový průzkum Země pomocí družic, radarů, letadel, které vytvářejí snímky (družicové, satelitní, letecké), ze kterých je možné vytvořením různých modelů získat mimo jiné představu o koncentraci chlorofylu-a ve vodách. Uplatnění nachází v dalších oborech jako je doprava, zemědělství, energetika, meteorologie [2].

Tato práce je zaměřena na monitoring povrchových vod pomocí dálkového průzkumu, proto budou v této kapitole nejprve zmíněny některé instituce, které se monitoringem vod zabývají, a dále pak bude vysvětlen význam dálkového průzkumu Země. Na závěr kapitoly bude popsáno barvivo chlorofyl-a, které ovlivňuje nebo indikuje možnou zhoršenou kvalitu vody.

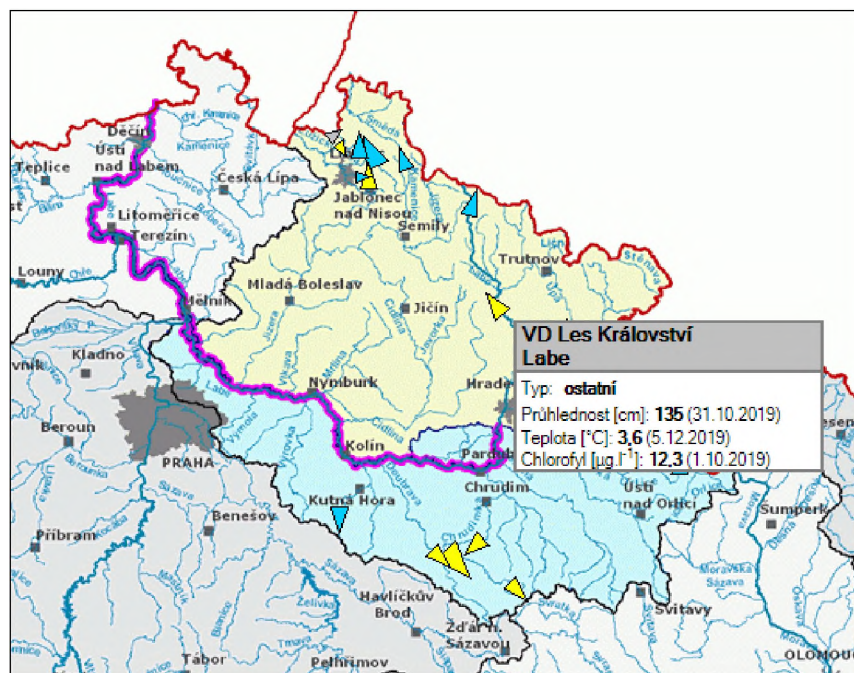
1.1.2 Monitoring povrchových vod

Monitoring povrchových vod spočívá v kontrole stavu povrchových vod a zjišťování jakosti vod. Na základě stavu a jakosti vod se stanoví stupeň ochrany. Z hlediska ochrany se jedná o komplexní činnost, která je prováděna v souladu s právem ČR i právem EU. Ochrana vod, práva a povinnosti k nim upravuje zákon č. 254/2001 Sb., který mimo jiné řeší další úpravu v oblasti vodního hospodářství, ať už se jedná o vodní díla či postup při povodních. Ochrana vod je možné rozdělit do tří forem z pohledu ekonomického, praktického, technického a právního na ochranu základní, zvláštní a speciální. Ochrana základní vychází ze všech platných ustanovení a předpisů. Za tuto ochranu nenáleží žádná finanční kompenzace. Základním principem je povinnost každého dodržovat zásady ochrany vod za jakýkoliv podmínek. Zvláštní ochrana vod slouží k ochraně konkrétní dané oblasti a je posuzována státem. Jedná se především o Citlivé oblasti, Chráněné oblasti přirozené akumulace vod (CHOPAV) a Zranitelné oblasti. Speciální ochrana je nástavbou na předchozí dvě zmiňované ochrany. Jejím cílem je kontrola vydatnosti, jakosti a zdravotní nezávadnosti povrchových a podzemních vod, které jsou nebo by mohly být využívány jako zdroje pitné vody [3]. U těchto zdrojů se stanovují tzv. ochranná pásma (OP) ve třech stupních. Ministerstvo životního prostředí společně s ministerstvem zemědělství předkládá každoročně výroční zprávu vládě o stavu vodního hospodářství v ČR [4].

Vlastní provádění monitoringu povrchových vod ze strany státu přísluší zejména správcům povodí a hygienickým stanicím.

Správa povodí

V ČR je státem zřízených celkem 5 organizací, které se věnují správě povodí. Jedná se o Povodí Labe, Vltavy, Ohře, Moravy a Odry. Hlavním cílem při výkonu správy povodí je pečování a udržování významných vodních toků na území ČR, činnosti spojené s hodnocením a zjišťováním stavu povrchových a podzemních vod a mnoho dalších povinností vyplývajících ze zákona č.254/2001 Sb. Mezi činnosti monitoringu vod a sledování jakosti především povrchových vod patří hodnocení sensorických vlastností vod. Mezi sensorické vlastnosti patří průhlednost, zákal, teplota a další. Na Obr. 1 jsou zobrazeny některé sledované parametry (teplota, průhlednost, obsah chlorofylu-a) [5].



Obr. 1: Některé sledované parametry jakosti vod (převzato z [5]).

Hygienické stanice

Další organizací, která zajišťuje kontrolu nad stavem vod je hygienická stanice. Na území ČR se nachází celkem 14 KHS (krajská hygienická stanice). Vznik a působnost hygienických stanic upravuje zákon č. 320/2002 Sb. o změně a zrušení některých zákonů v souvislosti s ukončením činnosti okresních úřadů, kterým byl novelizován zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví a změně některých souvisejících zákonů. Zřízeny byly k 1. 1. 2003 a zřizovatelem je MZ (Ministerstvo zdravotnictví). Hygienická stanice provádí státní zdravotní dozor v následujících oblastech: předcházení vzniku a šíření infekčních onemocnění, sleduje výskyt škodlivých látek v pracovním prostředí, kontrola v předškolních a školních zařízeních a v neposlední řadě kontrolu pitných a rekreačních vod [6].

1.1.3 Parametry kvality povrchových vod

Hodnocení vod lze provádět analýzou několika faktorů, které ovlivňují jakost vody. Mezi tyto faktory patří jednak senzorycké neboli organoleptické vlastnosti vod (teplota, zákal, pach, barva, průhlednost), ale i obsah rozpuštěných látek, které se stanovují analytickými metodami [7]. Odběry a vlastní analýza se provádí podle příslušných norem. V případě chlorofylu-a je možné stanovit jeho obsah ve vodě z leteckých či družicových snímků. Této problematice bude věnována samostatná kapitola.

Míru znečištění povrchových vod je možné posoudit na základě ukazatelů popsanych v Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových a podzemních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech, které definuje přípustné limity látek obsažených ve vodách a zároveň které látky jsou předmětem kontroly/stanovení. Pro povrchové vody je relevantní zejména příloha 3 Ukazatele vyjadřující stav povrchové vody, environmentální kvality a požadavky na užívání vod [8]. Dále je možné stanovit jakost povrchových podle normy ČSN 757221, která prošla novelizací, a byly přidány některé parametry, které se původně nestanovovaly. Součástí normy je i klasifikace tříd, podle kterých jsou vody rozděleny. Existuje celkem 5 tříd označených římskými číslicemi a nazvaných neznečištěná voda, mírně znečištěná voda, znečištěná voda, silně znečištěná voda, velmi silně znečištěná voda. Tab. 1 shrnuje hodnoty ukazatelů pro zahrnutí do jednotlivých tříd [9].

Tab. 1: Třídy jakosti vody a její mezní hodnoty – výpis z ČSN 75 7221, klasifikace jakosti povrchových vod (převzato z [9]).

Ukazatel	Jednotka	Třída				
		I	II	III	IV	V
Obecné, fyzikální a chemické ukazatele						
elektrolytická konduktivita	mS.m ⁻¹	< 40	< 70	< 110	< 160	< 160
rozpuštěné látky sušené	mg.l ⁻¹	< 300	< 500	< 800	< 1 200	< 1 200
nerozpuštěné látky sušené	mg.l ⁻¹	< 20	< 40	< 60	< 100	< 100
rozpuštěný kyslík	mg.l ⁻¹	> 7,5	> 6,5	> 5	> 3	> 3
biochemická spotřeba kyslíku pětidenní	mg.l ⁻¹	< 2	< 4	< 8	< 15	< 15
chemická spotřeba kyslíku manganistanem	mg.l ⁻¹	< 6	< 9	< 14	< 20	< 20
chemická spotřeba kyslíku dichromanem	mg.l ⁻¹	< 15	< 25	< 45	< 60	< 60
celkový organický uhlík	mg.l ⁻¹	< 7	< 10	< 16	< 20	< 20
adsorbovatelné organické halogeny (AOX)	µg.l ⁻¹	< 10	< 20	< 30	< 40	< 40
amoniakální dusík	mg.l ⁻¹	< 0,3	< 0,7	< 2	< 4	< 4
dušičnanový dusík	mg.l ⁻¹	< 3	< 6	< 10	< 13	< 13
celkový fosfor	mg.l ⁻¹	< 0,05	< 0,15	< 0,4	< 1	< 1
chloridy	mg.l ⁻¹	< 100	< 200	< 300	< 450	< 450
sírany	mg.l ⁻¹	< 80	< 150	< 250	< 400	< 400
vápník	mg.l ⁻¹	< 150	< 200	< 300	< 400	< 400
hořčík	mg.l ⁻¹	< 50	< 100	< 200	< 300	< 300
Specifické organické látky						
1,1,2,2-tetrachlorethen (perchlorethylen)	µg.l ⁻¹	< 0,2	< 1	< 3	< 10	< 10

1,1,2-trichlorethen (trichlorethylen)	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 0,2	< 1	< 2	< 3	< 3
1,2-dichlorethan	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 0,2	< 1	< 3	< 10	< 10
dichlorbenzeny ¹⁾	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 0,2	< 1	< 2	< 3	< 3
chlorbenzen	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 0,2	< 1	< 3	< 10	< 10
trichlormethan (chloroform)	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 0,2	< 1	< 2	< 3	< 3
tetrachlormethan	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 0,2	< 1	< 2	< 3	< 3
γ -hexachlorcyklohexan (lindan)	ng.l^{-1}	< 3	< 20	< 50	< 100	< 100
polychlorované bifenyly (PCB) ²⁾	ng.l^{-1}	< 5	< 10	< 20	< 30	< 30
polycyklické aromatické uhlovodíky ³⁾ (PAU)	ng.l^{-1}	< 10	< 100	< 500	< 3 000	< 3 000
Kovy a metaloidy						
chrom	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 5	< 20	< 50	< 100	< 100
mangan	mg.l^{-1}	< 0,1	< 0,3	< 0,5	< 0,8	< 0,8
železo	mg.l^{-1}	< 0,5	< 1	< 2	< 3	< 3
nikl	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 5	< 20	< 50	< 100	< 100
měď	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 5	< 20	< 50	< 100	< 100
zinek	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 15	< 50	< 100	< 200	< 200
kadmium	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 0,1	< 0,5	< 1	< 2	< 2
rtuť	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 0,05	< 0,1	< 0,5	< 1	< 1
olovo	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 3	< 8	< 15	< 30	< 30
arzen	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 1	< 10	< 20	< 50	< 50
Mikrobiologické a biologické ukazatele						
termotolerantní koliformní bakterie	KTJ.ml^{-1}	< 40	< 100	< 500	< 1 000	< 1 000
enterokoky	KTJ.ml^{-1}	< 6	< 13	< 25	< 46	< 46
saprobni index makrozoobentosu	číslo	< 1,5	< 2,2	< 3,0	< 3,5	< 3,5
chlorofyl-a	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 10	< 25	< 50	< 100	< 100
Radiologické ukazatele						
celková objemová aktivita alfa ⁴⁾	mBq.l^{-1}	< 200	< 300	< 500	< 1 000	< 1 000
celková objemová aktivita beta ⁵⁾	mBq.l^{-1}	< 500	< 1 000	< 1 500	< 2 000	< 2 000
celková objemová aktivita beta po korekci na 40 K ⁵⁾	mBq.l^{-1}	< 200	< 300	< 500	< 1 000	< 1 000
uran ⁶⁾	$\mu\text{g.l}^{-1}$	< 10	< 50	< 100	< 200	< 200
radium 226 ⁷⁾	mBq.l^{-1}	< 20	< 100	< 300	< 400	< 400
tritium ⁸⁾	Bq.l^{-1}	< 10	< 300	< 700	< 5 000	< 5 000

Ze senzorických vlastností vod je nutné zdůraznit především průhlednost, teplotu spolu s chlorofylem-a, které slouží pro rychlý náhled kvality vody ve vodních tocích a nádržích

viz Obr. 1 [5]. Zároveň je možné tyto parametry sledovat pomocí družicových dat [10], [11], [12].

Teplota

Teplota vody silně závisí jednak na jejím typu, jelikož teplota podzemních vod bývá konstantní a pohybuje se okolo 10 °C, zatímco teplota povrchových vod poměrně kolísá v závislosti na počasí. U pitných vod je optimální teplota v rozmezí 8-12 °C [7]. Teplota vody je důležitým ukazatelem, neboť ovlivňuje rozpustnost kyslíku a biochemickou reaktivitu.

Norma ČSN 75 7342 popisuje způsoby, kterými je možné měřit teplotu vody, respektive jednotlivých druhů vod. Měření se provádí pomocí teploměru a zároveň je odebírán vzorek do vzorkovnice [7]. Je důležité, aby měla vzorkovnice teplotu odpovídající odebírané vodě. Před samotným odběrem se ponoří do vzorkované vody. Měření teploty probíhá ve vzorkovnici nebo ponořením teploměru přímo do vody, pokud to umožňují okolní podmínky [7].

Zákal

Zákal neboli snížená průhlednost je dalším negativním důsledkem lidské činnosti, jelikož značné množství znečišťujících látek se do řek a nádrží s přítokem dostává například průsaky nebo splachy z půd vlivem zemědělské činnosti, anebo dalšími fyzikálními jevy, kterými se látky dostávají do vodních zdrojů [3]. Mezi další látky způsobující zákal patří nerozpustné oxidy kovů vypouštěných z továren a chemiček, prach z ovzduší, také kal ze dna nádrží, řek či rybníků [7].

Podobně jako u teploty i v případě zákalu stanovuje konkrétní norma ČSN EN ISO 7027 způsoby odebírání vzorků a metody stanovení zákalu [7]. Odběr vzorku se provádí do skleněných vzorkovnic a stanovení by mělo probíhat co nejrychleji po odběru. Pokud není možné okamžité stanovení, lze uchovat vzorek v tmavém a chladném prostředí po dobu max 24 h. Ke stanovení zákalu se využívá principů turbidimetrie a nefelometrie [7].

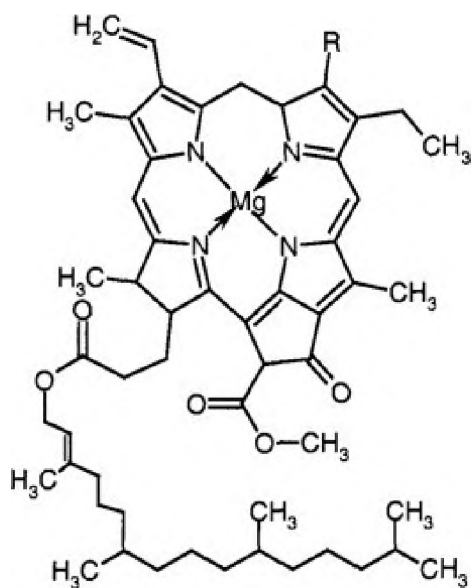
Průhlednost

Průhlednost je ovlivněna barvou a zákaelem. Průhlednost se stanovuje průhledovými zkouškami [7]. Zkouška může probíhat dvojím způsobem, který se však liší nepatrně a to na základě použitých desek. Jedná se o desky s bílou barvou nebo bílou barvou s černými kvadranty. Postup stanovení průhlednosti je popsán v normách ČSN EN ISO 7027 a TNV 757340 [13].

Mezi průhledností a zákalem existuje vztah, který umožňuje přepočítání mezi těmito vlastnostmi na základě regresních analýz měření oběma způsoby. Protože je měření průhlednosti jednodušší, rychlejší a méně nákladné, přepočítání z průhlednosti na zákal může být výhodný. Je však nutné mít na zřeteli, že tento přepočítání je přibližný, je možné ho využít jen pro určitý typ vod, pro který byl vztah kalibrován a také, že měření průhlednosti je zatíženo subjektivním vlivem pozorovatele [14].

1.2 Chlorofyl-a

Chlorofyl-a patří do skupiny chlorofylů a je hlavním pigmentem obsaženým v chloroplastech, který slouží k absorpci světelné energie. Dalšími typy jsou chlorofyl b, c, d. Chlorofyl-a se vyskytuje především v řasách, sinicích a všech vyšších rostlinách a například chlorofyl-b se vyskytuje v červených řasách. Struktura chlorofylu se skládá ze čtyř pyrolových kruhů obsahujících dusík a jsou uspořádány v kruhu kolem iontu hořčíku. Na tuto strukturu jsou navázány dlouhé uhlovodíkové zbytky, které jsou rozpustné v tucích. Struktura chlorofylu je znázorněna na Obr. 2 [15]. Struktura chlorofylu-a a chlorofylu-b se liší pouze tím, že je jeden methylový substituent v chlorofylu-a nahrazený formyl skupinou v chlorofylu-b [16].

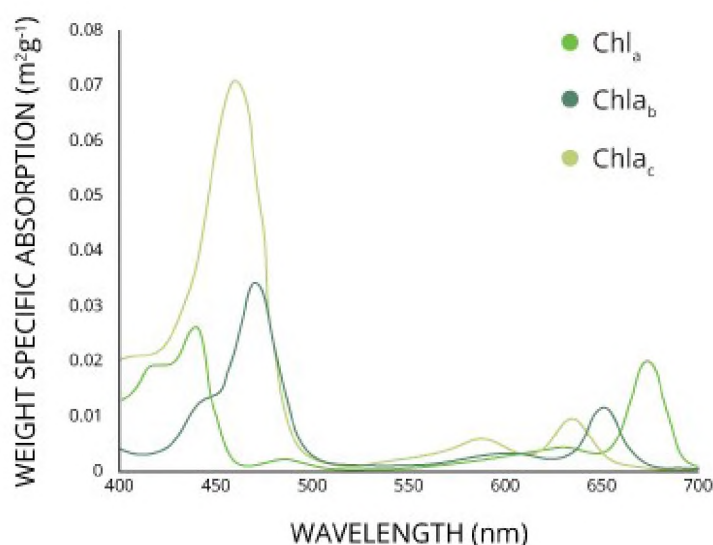


Obr. 2: Struktura chlorofylu (převzato z [15]).

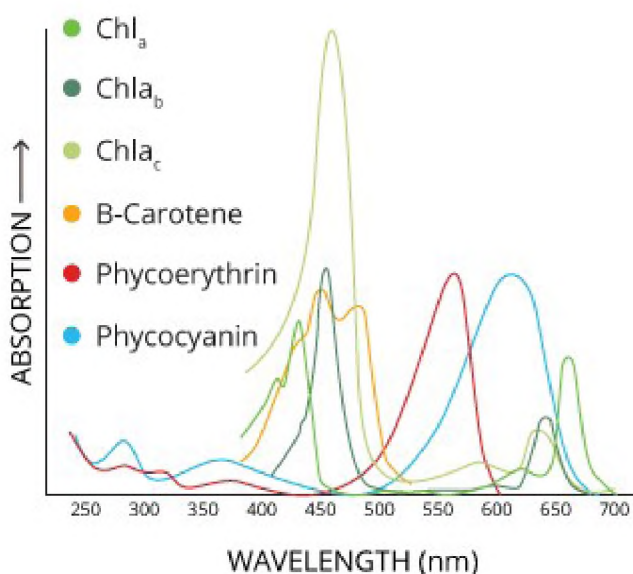
Směs chlorofylu-a a b plní funkci katalyzátoru při fotosyntéze. Díky rozpustnosti v tucích se využívá k barvení minerálních olejů, mýdel, mastí a vosků. Naopak ve vodě rozpustné přípravky chlorofylu nachází uplatnění v potravinářském či kosmetickém průmyslu [17].

1.2.1 Spektrální vlastnosti chlorofylu-a

Na Obr. 3 jsou zobrazeny absorpce vlnových délek pro různé formy chlorofylu-a na Obr. 4 pak absorpce vlnových délek jednotlivých pigmentů [18].



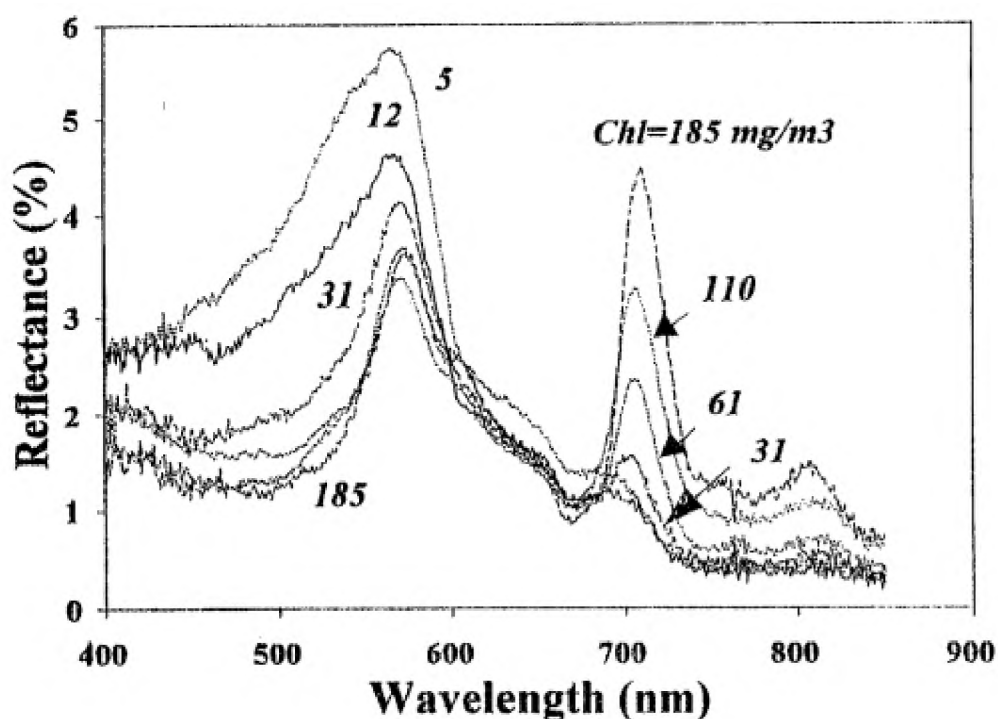
Obr. 3: Absorpce vlnových délek pro různé formy chlorofylu (převzato z [18]).



Obr. 4: Absorpce vlnových délek jednotlivých pigmentů (převzato z [18]).

Předchozí text se zabýval spektrálními vlastnostmi chlorofylu a jiných barviv ve spektrofotometru. Zcela jiná situace ale nastává při pozorování prostředky DPZ, kdy sledujeme záření odražené od vodní plochy s obsahem chlorofylu ve vodním sloupci. Při tom se výrazně projevují také spektrální vlastnosti vody, zejména silné pohlcování v infračervené oblasti. Následující text se tedy zabývá spektrálními vlastnostmi vody s různým obsahem chlorofylu v odraženém záření.

Obrazová spektra jsou zobrazena na Obr. 5 [19]. Pro koncentraci chlorofylu vyšší než 20 mg/m^3 lze pozorovat lokální minimum v modré oblasti spektra. Odrazivost se zvyšuje v závislosti na snižování koncentrace chlorofylu. Odrazivost dosáhla svého maxima mezi 550 a 580 nm. V rozmezí od 590 do 650 nm byla při koncentraci chlorofylu vyšších než 10 mg/m^3 odrazivost prakticky jednotná. Minimální odrazivost byla nalezena při 670 nm. Zářeni o vlnové délce nad 750 nm vodou prakticky neprochází. Rozdílů v odrazivosti od vodní hladiny s různým obsahem chlorofylu-a v některých oblastech spektra se využívá v DPZ k odhadu jednotlivých koncentrací ve vodách [19].



Obr. 5: Obrazová spektra (převzato z [19]).

1.2.2 Význam jako indikátor kvality vody

Součástí monitoringu vod je stanovování jednotlivých složek ve vodách a obecná kontrola kvality vody. Množství chlorofylu-a slouží jednak jako indikátor rozvoje fytoplanktonu ve vodě a zároveň může sloužit k indikaci výskytu sinic ve vodě [20]. Zároveň obsah chlorofylu-a indikuje možnou eutrofizaci vod [21]. Sinice produkují sekundární metabolity, mezi které patří cyanotoxiny, pro lidské zdraví škodlivé. Nebezpečné koncentrace těchto cyanotoxinů se vyskytují především v místě tvorby vodního květu. Je proto nutné

provádět kontrolu kvality vod nejen koupacích nádrží, ale i ostatních zdrojů povrchových vod [22].

1.2.3 Norma pro spektrofotometrické stanovení chlorofylu-a

Existuje několik možností, jak stanovit koncentraci chlorofylu-a ve vodách, mezi které patří spektrofotometrická metoda založená na absorpci záření, fluorescenční metoda nebo se využívají některé chromatografické metody [23].

Norma ISO 10260 určuje metodiku stanovení koncentrace chlorofylu-a spektrofotometricky. Chlorofyl-a patří do skupiny fotosyntetických pigmentů a je obsažen ve všech zelených rostlinách. Stanovení koncentrace umožňuje určit množství a potenciální fotosyntetickou aktivitu řas. Nejvýznamnějšími produkty během rozkladu chlorofylu-a jsou feofytiny a feoforbidy [24].

Odběr vzorku vody se řídí podle normy ISO 5667-1 [25]. Vlastní stanovení se provádí ihned po odběru, nicméně je možné vzorky uchovávat v chladu a tmě, nejdéle však 8 hodin. Je možné použít dvě extrakční metody. Před začátkem se nejprve vzorky důkladně promíchají a odměřený objem (obvykle od 0,1 l do 2 l) se zfiltruje přes filtr ze skleněné vlákniny. Filtr nesmí přijít do kontaktu s prsty. Po filtraci se filtr vysuší a následně vloží do extrakční nádoby [24].

V případě první extrakční metody se přilije obvykle 30 nebo 40 ml horkého ethanolu. Po několika minutách (kdy filtr zchladne) se filtr rozmělní míchadlem homogenizátoru pro snadnější extrakci. Částice, které zůstaly na míchadle se spláchnou ethanolem. Suspenze se extrahuje alespoň 3 minuty, obvykle však několik hodin. Extrahovaná kaše se zfiltruje na hustém filtru do nádoby 50 až 100 ml s uzávěrem. Opět se zbytky extraktu z extrakční nádoby vypláchnou ethanolem. Objem nádoby se doplní po rysku, uzavře a protřepe. Získáme tak extrakční objem V_e [24].

Při druhé extrakční variantě se nadávkuje přesný objem (obvykle 20 nebo 25 ml) ethanolu do nádoby tak, aby kousky filtru byly ponořené. Nádobka se uzavře, aby nedocházelo k odpařování extrakčního činidla. Následně se nádobka protřepe. Nádobka se do vodní lázně ponoří tak, aby hladina extrakčního činidla byla v úrovni hladiny vody ve vodní lázni. Zahřívá se 5 min za občasného protřepání a následně se nechá 15 min chladit na teplotu laboratoře. Extrakt se zfiltruje na filtru do čisté extrakční nádoby, avšak bez dalšího promytí čerstvým rozpouštědlem [24].

Dalším krokem je spektrofotometrie. Část extraktu se proměří při 665 nm a 750 nm proti srovnávací kyvetě naplněné ethanolem. 5 až 10 ml extraktu se okyselí přidávkem 0,01 ml

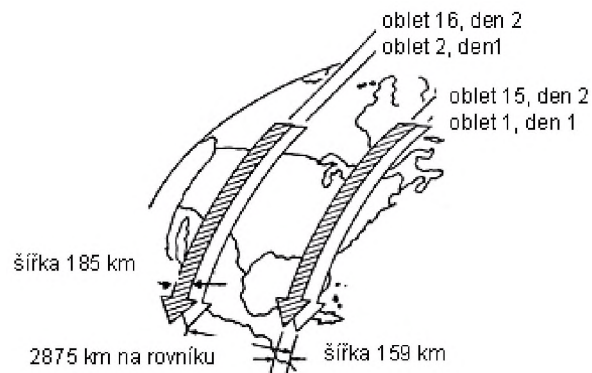
1M kys. chlorovodíkové a protřepe se. Po 5 až 30 min se při stejné vlnové délce opět proměří absorbance. Následně se pomocí rovnice uvedené v normě spočítá koncentrace chlorofylu-a feopigmentů v mikrogramech na litr ve vzorcích. Ze stanovení je vyhotoven protokol s konkrétními údaji, které musí obsahovat [24].

1.3 Dálkový průzkum Země v monitoringu kvality vod

1.3.1 Principy dálkového průzkumu Země

Termín dálkový průzkum Země (DPZ) zavedla v 50. letech 19. století geografka Evelyn Pruittová z U.S. Office of Naval Research [26]. Jedná se o poměrně mladou vědní disciplínu. Existuje mnoho definic, avšak v odborných člancích uváděnou definicí dálkového průzkumu je ta, že „DPZ je vzdálené pořizování snímků z družic a letadel pomocí senzorů a shromažďování informací o objektech či místech na Zemi bez přímého kontaktu s nimi“ [27, 28]. Jak již bylo řečeno v úvodu, jedná se o poměrně mladou vědní disciplínu, která v současné době nachází mnoho uplatnění například v meteorologii nebo v našem případě k hodnocení stavu vodních ploch v životním prostředí na základě vytváření modelů k určování koncentrace chlorofylu-a ve vodách.

Principem DPZ je pořizování obrazových či neobrazových záznamů pomocí zařízení, které zpracovává elektromagnetické záření. Zařízení na zpracování signálu je připevněno na nosiči, v případě družicového DPZ tedy na družici na oběžné dráze kolem Země. Obr. 6 zobrazuje pohyb družice Landsat. Jednotlivé objekty odrážejí nebo samy vyzařují elektromagnetické záření a na základě zpracovaného signálu získáme různé informace o vlastnostech objektů, vodních ploch nebo lesů. DPZ prochází neustálým vývojem, který spočívá ve zdokonalení snímacích zařízení a nosičů. Po určité době, obvykle v řádu několika let, dochází k vynesení nových zařízení na oběžnou dráhu. DPZ je možné rozdělit do dvou základních skupin, na základě zdroje snímaného elektromagnetického záření, na pasivní a aktivní. Rozdíl spočívá v tom, že pasivní metody pouze zpracovávají odražené sluneční záření či vlastní vyzařování zkoumaného objektu, zatímco aktivní metody zpracovávají elektromagnetické pole odražené od zkoumaného objektu, vyvolaného z umělého zdroje umístěného na nosiči [27]. Existuje celá řada dalších rozdělení například podle druhu nosičů nebo osy záběru[2].



Obr. 6: Pohyb družice Landsat se synchronní dráhou letu (převzato z [26]).

Obecně platí, že nejdůležitějším předmětem DPZ je získávání informací o objektech. V následující Tab. 2 jsou zobrazeny některé nosiče a aplikace DPZ. Mezi výhody patří opakovatelnost a s tím související aktuálnost snímků, podrobnost, plošný rozsah nebo získávání informací z různých částí spekter elektromagnetického záření [2].

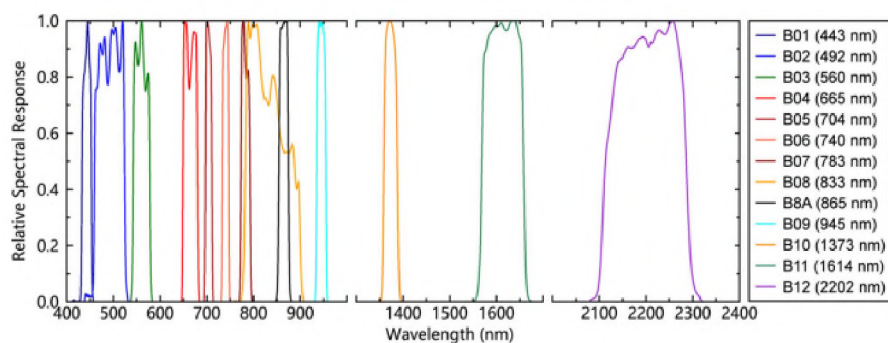
Tab. 2: Typy nosičů a některé aplikace dálkového průzkumu (převzato z [26]).

skupina	typ	popis	rozlišení	aplikace
satelitní snímání	Landsat TM	7 pásem	30 m	lesní a vodní zdroje, klasifikace
	Landsat MSS	4 pásma	80 m	regionální mapování
	SPOT Pan	1 pásmo	10 m	základní mapy, městské plánování
	SPOT XS	3 pásma	20 m	mapování vegetace
	AVHRR	5 pásem	1.1 km	oceánské procesy
	hyperspektrální	200 + pásem		geologická analýza užití území
radar	ERS-1	1 pásmo	30 m	geologické a ledovcové mapování
	JERS-1	1 pásmo	30 m	geologické a ledovcové mapování

skupina	typ	popis	rozlišení	aplikace
	RADARSAT	1 pásmo	10-30 m	ledovcové mapování
	SIR-C	polarimetricky		výzkum
letecké snímání	letecké foto		skenovaná data	městské plánování
	AIS	128 pásem		územní plánování
	AVIRIS	224 pásem		územní plánování
geofyzikální data	radiometrická	4 pásma	100-200 m	ložiskový průzkum
	seismická	1 a 2 pásma	20-30 m	ložiskový průzkum
	gravimetrická	1 pásmo	1000 m	ložiskový průzkum
	elektromagnetická	1 pásmo	80 m	ložiskový průzkum

1.3.2 Družice Sentinel-2A a 2B

Družice Sentinel-2A byla vypuštěna na oběžnou dráhu v roce 2015 a o dva roky později další družice Sentinel-2B. Jedním z úkolů zmiňovaných družic je sledování globálních změn ve využití půdy, změn krajiny a sledování složek povrchových vod včetně koncentrací celkových suspendovaných pevných látek a chlorofylu-a [29]. Obě družice snímají široký pás Země (290 km), mají vysoké rozlišení (10 m, 20 a 60 m), přičemž každé rozlišení obsahuje vždy určitý počet spektrálních pásem a umožňují multispektrální zobrazení [30]. Mají celkem 13 spektrálních pásem se spektrálním rozsahem v rozmezí od 420 do 2320 nm. To znamená, že pokrývají oblasti od viditelné (VIS) přes tzv. red edge (RE) a blízkou infračervenou oblast (NIR) až po krátkovlnnou infračervenou oblast (SWIR). Oběžná dráha je synchronní se Sluncem ve výšce 786 km [31]. Na Obr. 7 jsou znázorněna spektrální pásma družice Sentinel-2A.



Obr. 7: Spektrální pásma družice Sentinel-2A (převzato z [31]).

1.3.3 Principy atmosférické korekce snímků

Atmosférická korekce je postup, kterým je možné získat informace o reflektanci na povrchu ze snímku. Její použití je nutné zejména v případech, kdy potřebujeme kvantitativní informaci o objektu, tedy také při modelování koncentrací chlorofylu-a ve vodách. Cílem korekce je převod digitálního čísla (DN) v obrazech na reflektance na povrchu, s vyloučením vlivů rozptylu a pohlcování záření v atmosféře, které obecně zkreslují hodnoty reflektance objektů na povrchu. Tato zkreslení, pokud nejsou odstraněna, pak ovlivňují zjišťování informací o objektech ze snímků [32]. Poměrně značnou komplikaci tvoří velké množství snímků z družic jako jsou Landsat a Sentinel, které je znehodnoceno například mraky nebo jejich stíny, aerosoly způsobujícími odraz elektromagnetického záření, které je snímáno senzorem, prachovými částicemi a vodní parou, a proto je nutné tyto snímky upravit neboli provést korekci [33].

Empirické metody

Empirické neboli relativní metody jsou založené na srovnávání referenčního snímku a snímku, u kterého bude provedena korekce DN. Mezi tyto metody patří PIF (pseudo-invariant features), RCS (radiometric control sets) [32].

Metody radiometric control sets (RCS) a pseudo-invariant features (PIF) využívají rozdělení objektů v obraze, respektive v obraze jsou vybrána světlá a tmavá místa (pixely), která zároveň odpovídají místům, kde na povrchu nedošlo v průběhu času ke změnám odrazivosti. Tato místa jsou vybrána k regresi mezi referenčním a korigovaným snímkem. Rozdíl v těchto metodách spočívá v tom, že v případě metody PIF je výběr tmavých a světlých míst na základě původu objektu v obraze, tedy je-li přírodního nebo umělého rázu. Jednotlivé sady v metodě RCS použité pro členění obrazu jsou volena podle následujících kritérií:

Dark sets = (greenness $\leq t_1$) AND (brightness $\leq t_2$)

Bright sets = (greenness $\leq t_1$) AND (brightness $\geq t_2$)

kde t_1 a t_2 jsou prahové hodnoty a pásma se vztahují pro data Landsat TM [32].

I v případě metody PIF jsou jednotlivé sady voleny podle následujících kritérií:

PIF: (Band4/Band3) $\leq t_1$ AND (Band7 $\geq t_2$),

kde t_1 a t_2 jsou prahové hodnoty a pásma se vztahují pro data Landsat TM [32].

Dále sem patří metoda histogram matching založená na skutečnosti, že histogramy povrchové reflektance stejných oblastí zamlžených a nezamlžených oblastí jsou stejné. Nejprve se identifikují čiré sektory a histogramy zakalených sektorů se posunou tak, aby odpovídaly histogramům referenčních. V případě, že je kompozice různých objektů podobná, avšak spektrální reflektance odlišná, nelze tuto metodu použít. Podobně je tomu v případě, že se prostorová distribuce koncentrací aerosolů dramaticky liší [33].

Poslední zmiňovanou metodou je dark object. V případě, že se v obrazu vyskytuje hustá vegetace, slouží k její identifikaci korelace mezi její odrazivostí a pásmem 1 (modrá) a 3 (zelená). Ve viditelné oblasti má hustá vegetace velmi nízkou reflektanci a v této oblasti se zobrazuje jako temný objekt [33].

Deterministické metody

Mezi deterministické metody patří 6S a COST, přičemž druhá ze zmiňovaných metod je spíše smíšenou deterministicko-empirickou metodou, jelikož obsahuje deterministickou složku modelující absorpci plynů a Rayleighův rozptyl ale i empirickou složku L_{haze} , což je empiricky zjištěná radiance tmavého objektu.

Metoda COST vede k absolutní korekci. Využívá kosinus zenitového úhlu ($\cos(TZ)$) jako jediný parametr. Tento parametr slouží pro posouzení vlivů/účinků absorpce atmosférickými plyny a Rayleighovým rozptylem. V prvním kroku jsou hodnoty DN převedeny na radianci pomocí následující rovnice [32]:

$$L_{sat} = (L_{min} + (L_{max} - L_{min})/DN_{max}) DN \quad (1)$$

kde L_{sat} je spektrální radiance u senzoru, L_{min} je minimální spektrální zář pro dané pásmo, L_{max} je maximální radiance pro dané pásmo a DN_{max} je maximální digitální číslo rozsahu obrazu. Následně se radiance převede na reflektanci pomocí rovnice [32]:

$$\text{Ref} = \pi(L_{\text{sat}} - L_{\text{haze}}) / (E_0 \cos \text{TZ}) \quad (2)$$

kde Ref je reflektance na zemském povrchu, L_{sat} je radiance u senzoru, L_{haze} je radiance sestupné dráhy záření, E_0 je střední sluneční exo-atmosférické ozáření a lze ho nalézt v tabulkách a TZ je střední sluneční úhel. Existuje určité zjednodušení na základě předpokladu, že tmavé objekty, například vodní útvary s velkou hloubkou, mají v infračervené oblasti průměrně reflektanci pouze 1 %. Na základě toho lze povrchovou radianci pro tato místa odhadnout podle následující rovnice:

$$L_{1\%} = (0,01 \cdot E_0 \cdot \cos \text{TZ}) / (\pi \cdot d^2) \quad (3)$$

kde d^2 je druhou mocninou vzdálenosti Země-Slunce v astronomických jednotkách. Pro finální korekci je potom možné odečíst $L_{1\%}$ od průměrné TOA radiance tmavých míst a tuto hodnotu použít jako L_{haze} při korekci [32].

Dále sem patří metoda 6S, která je založena na rovnici pro odhad reflektance objektů v TOA (at the top of atmosphere – v horní části atmosféry) pomocí informací z atmosférických podmínek a povrchové reflektance. TOA reflektance může být odhadnuta podle následující rovnice [32]:

$$\rho = (\pi \cdot L_{\text{sat}} \cdot d^2) / (E_0 \cdot \cos \text{TZ}) \quad (4)$$

kde L_{sat} je spektrální radiance u senzoru, E_0 je střední sluneční exo – atmosférické ozáření a lze ho nalézt v tabulkách a TZ je střední sluneční úhel a d^2 je druhou mocninou vzdálenosti Země-Slunce v astronomických jednotkách [32].

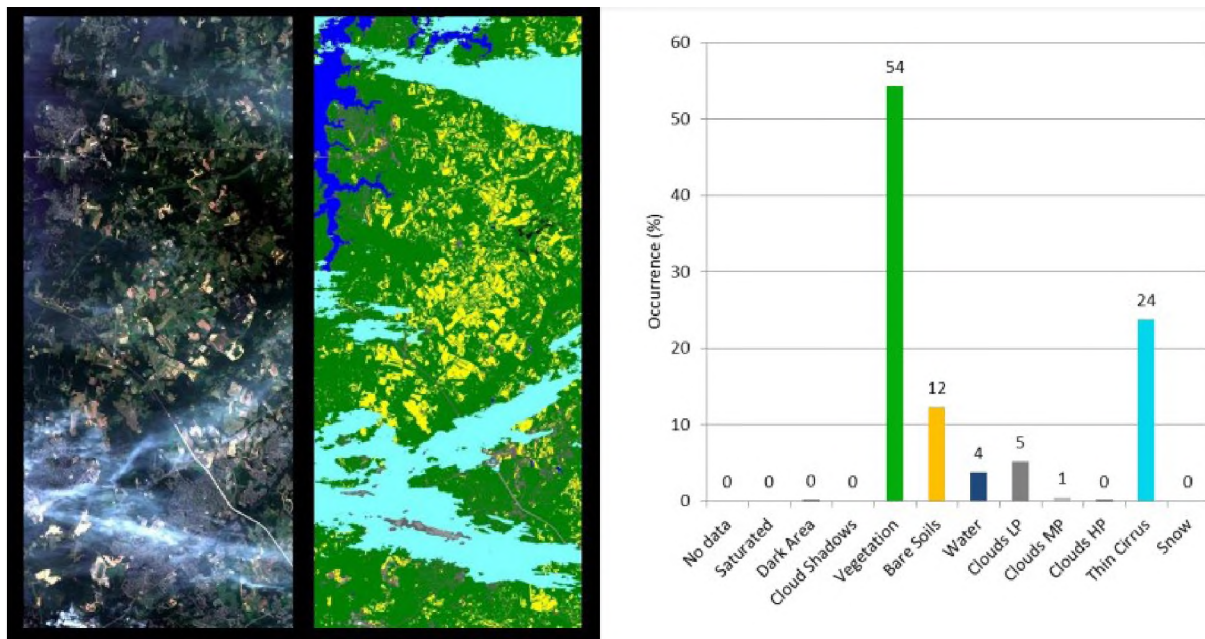
Poté se odhadne povrchová odrazivost podle následující rovnice:

$$\text{Ref} = ((A_p + B) / (1 + (\gamma (A_p + B)))) \quad (5)$$

kde $A = 1/\alpha\beta$, $B = -\rho/\beta$, α je globální propustnost plynů, β je celková propustnost vlivem rozptylu a γ je sférické albedo (míra odrazivosti tělesa nebo jeho povrchu). Mezi data potřebná k provedení metody 6S patří sluneční zenit a azimut, typ senzoru, meteorologická viditelnost, čas a datum pořízení snímku a zeměpisná šířka a délka středu scény. Metoda pak pomocí vstupních dat a vložené funkce vytvoří proměnné k určení povrchové odrazivosti [32].

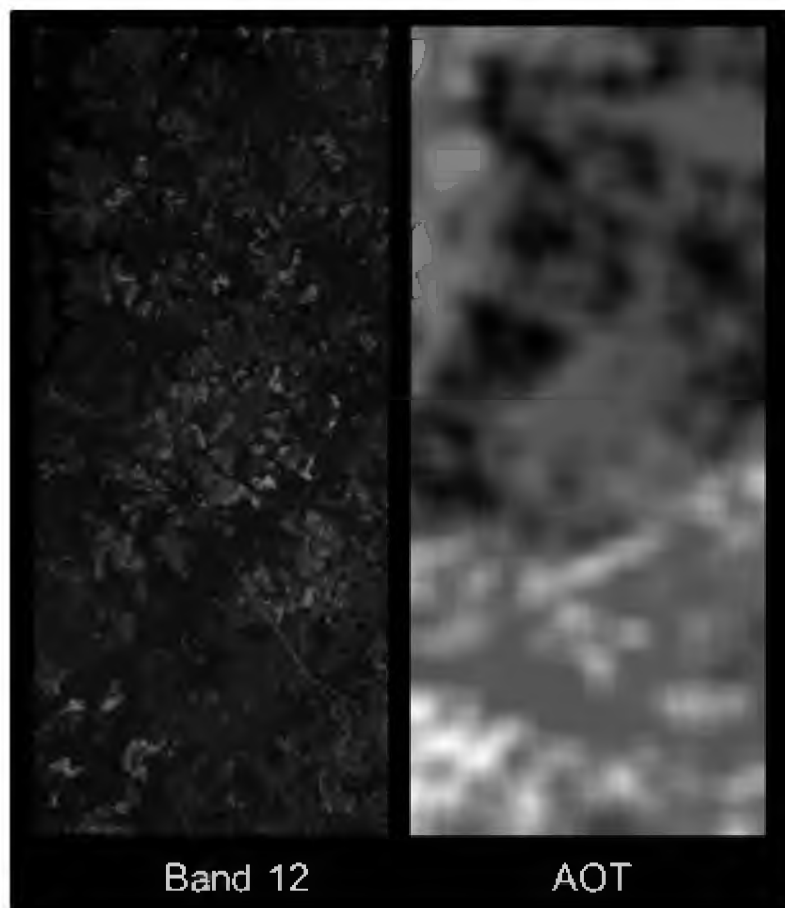
1.3.4 Atmosférická korekce Sen2Cor

Sen2cor je procesor vyvinutý pro zpracování snímků z družice Sentinel-2A a jeho úkolem je klasifikace scény a atmosférická korekce pomocí atmosférického korekčního modulu založeného na programu ATCOR. V prvním kroku algoritmus pro klasifikaci scény umožňuje detekovat až 12 různých klasifikací povrchu od půdy, vodní plochy až přes klasifikaci mraků podle Obr. 8 [30].



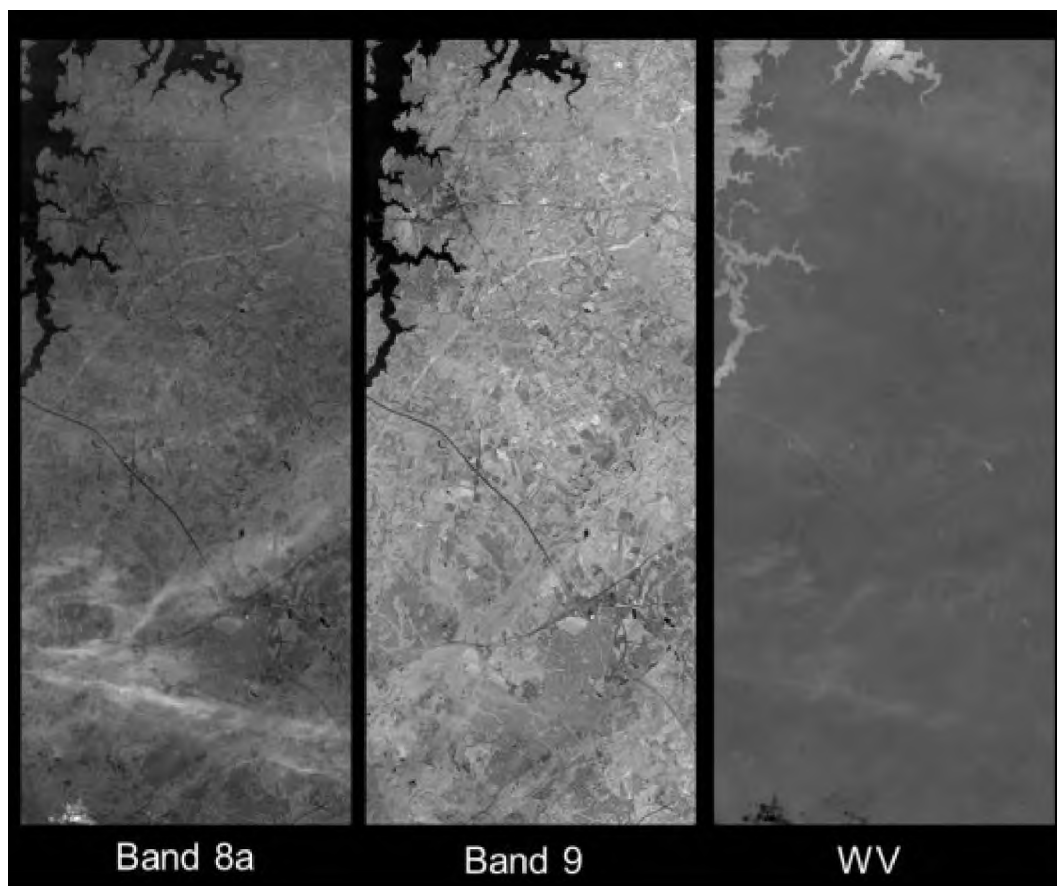
Obr. 8: Klasifikace scény (převzato z [30]).

Algoritmus atmosférické korekce provádí opravu pomocí sady vyhledávacích tabulek (Look-up tables). Korekce má několik kroků. První krokem je vytvoření mapy aerosol optical thickness (AOT= optické tloušťky aerosolu), která je odvozena pomocí dense dark vegetation (DDV= tmavé husté vegetace). Algoritmus využívá kanál 12 (SWIR) a koreluje jeho reflektanci s kanály 4 a 2. Korekce AOT je znázorněn na Obr. 9 [30].



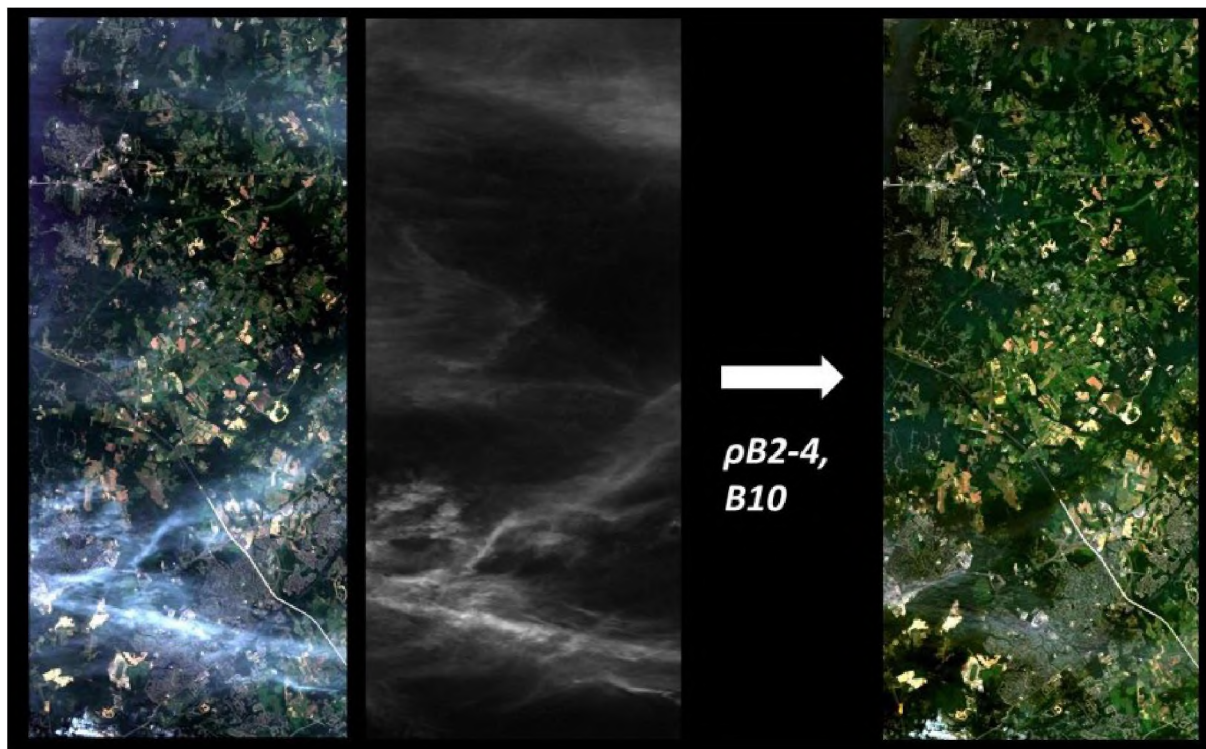
Obr. 9: Korekce AOT (převzato z [30]).

Dalším krokem je vytvoření mapy vodní páry, která se provádí pomocí předem korigované diferenciální absorpce. Využívá se referenční kanál 8a v oblasti atmosférického okna a měřicí kanál B9 v absorpční oblasti. Hloubka absorpce je vyhodnocena výpočtem radiance pro atmosféru bez vodní páry za předpokladu, že je povrchová reflektance měřicího kanálu stejná jako kanálu referenčního. Hloubka absorpce je měřítkem sloupce vodní páry. Mapa vodní páry pomocí kanálu 8a a B9 je znázorněna na Obr. 10 [30].



Obr. 10: Vytvořená mapa vodní páry pomocí kanálu 8a a B9 (převzato z [30]).

Posledním krokem je vyhledávání vysoké oblačnosti neboli tzv. cirrus. Pro tento účel se využívá kanálu 10. Záření v této úzké spektrální oblasti projde atmosférou, ale neprochází až na zemský povrch a odraží se od oblačnosti a odražené záření slouží k detekci vysoké oblačnosti. Korekce vysoké oblačnosti je znázorněna na Obr. 11 [30].



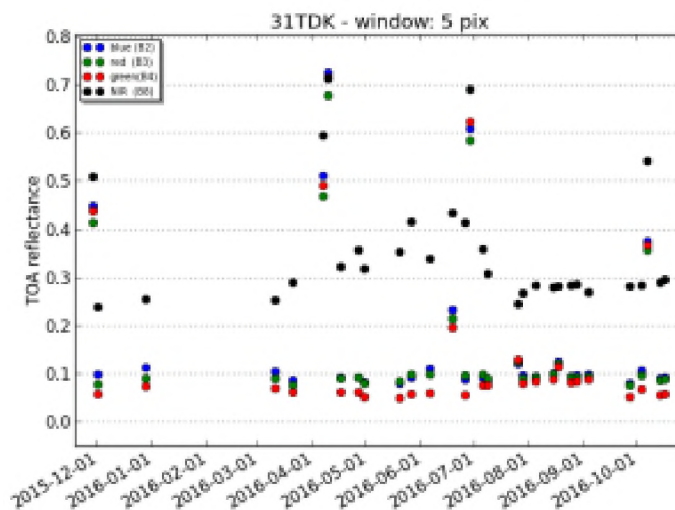
Obr. 11: Korekce vysoké oblačnosti (převzato z [30]).

1.3.5 Atmosférická korekce MACSS/MAJA

MACSS (Multi-sensor Atmospheric Correction and Cloud Screening) je procesor, jehož úkolem je detekce mraků a jejich stínů, vodní páry, odhad tloušťky aerosolu a koriguje atmosférické účinky. Tento procesor byl vyvinut společnostmi CESBIO a CNES. Jejich snaha vedla k novému procesoru označenému MAJA, který byl inovací stávajícího procesoru MACSS. Byl doplněn o několik metod s algoritmem MACSS-ATCOR. Charakteristickým rysem MAJA je využití časových řad snímků. Z tohoto důvodu se hodí pouze k optickým misím, které pozorují Zemi pod stálým pozorovacím úhlem. Na Obr. 12 je znázorněn příklad časových řad vrcholů odrazů atmosféry z družice Sentinel [34].

Většina metod tzv. cloudového screeningu byla vyvinuta pro senzory se středním rozlišením. Jak již bylo řečeno MAJA využívá k detekci mraků časových řad a zároveň předpokladu, že povrchová reflektance bez přítomnosti mraků nebo stínů mraků je relativně

stabilní v čase, zatímco v přítomnosti mraků dochází k rychlé změně reflektance. Dále jsou algoritmy závislé na dostupnosti spektrálních pásem. Infračervené pásy se využívají k detekci mraků chladnějších než je zemský povrch, zatímco prahové hodnoty reflektance v modrém pásmu jsou vhodné pro detekci nízkých mraků. Krátkovlnná infračervená pásma (SWIR) slouží k rozlišení sněhu od mraků [34].



Obr. 12: Příklad časových řad odrazů vrcholů atmosféry (převzato z [34]).

Detekční modul od ATCOR využívá spektrální pásma ve viditelné/ blízké infračervené (VNIR) a krátkovlnné infračervené (SWIR) oblasti společně s prahovými hodnotami reflektance v TOA, aby bylo možné každému pixelu přiřadit určité označení. Tento první krok je důležitý, jelikož následující kroky jako je zjišťování přítomnosti aerosolu a vodní páry využívají informace o pixelech [34].

1.3.6 Relativní prostorově variabilní radiometrická normalizace

Podobně jako atmosférické korekce, které slouží k potlačení vlivů atmosféry, existuje další nástroj/metoda použitelná ke stejnému účelu. Jedná se o metodu relativní radiometrické normalizace (RRN), jejíž principem je úprava DN snímku na základě jiného referenčního snímku. Principem metody je využití pseudo-invariantních (PI) povrchů k získání závislosti mezi referenčním a korigovaným snímkem. Získaná závislost je pak použita na celý snímek. Pro tyto povrchy existuje závislost hodnot pixelů dvou snímků podle rovnice [20]:

$$Y = a \cdot X + b \quad (6)$$

kde Y jsou hodnoty referenčního snímku, a je multiplikační koeficient, X jsou hodnoty snímku ke korekci a b je aditivní koeficient. Koeficienty a , b se získají lineární regresí

mezi hodnotami pixelů PI povrchů snímků Y a X. Následně se provede korekce lineární transformací hodnot snímku X podle rovnice [20]:

$$X' = a \cdot X + b \quad (7)$$

kde X' jsou hodnoty snímku po korekci RRN [20].

Jelikož vliv atmosféry nemusí být a zpravidla nebývá homogenní v ploše, je možné použít tzv. prostorovou variabilní RRN. Ta je specifickou implementací [20] nazvané *i.grid.atcor* a spočívá ve výpočtu koeficientů a a b pro jednotlivé dlaždice, na které byl snímek předem rozdělen. Rozměr dlaždic je předem definován. Následně se vypočtené parametry a a b interpolují jako rastry koeficientů a a b v ploše snímku [20].

1.3.7 Příklady algoritmů pro výpočet parametrů kvality vody

Algoritmy založené na jednom či dvou spektrálních kanálech

Metody, které využívají jednoho či dvou spektrálních kanálů snímku, jsou založeny nejčastěji na korelaci mezi sledovanou veličinou a poměrem dvou spektrálních kanálů, anebo hodnotě jednoho kanálu samotného [19, 35], [36], [37]. Následuje jeden podrobnější příklad zabývající se touto problematikou.

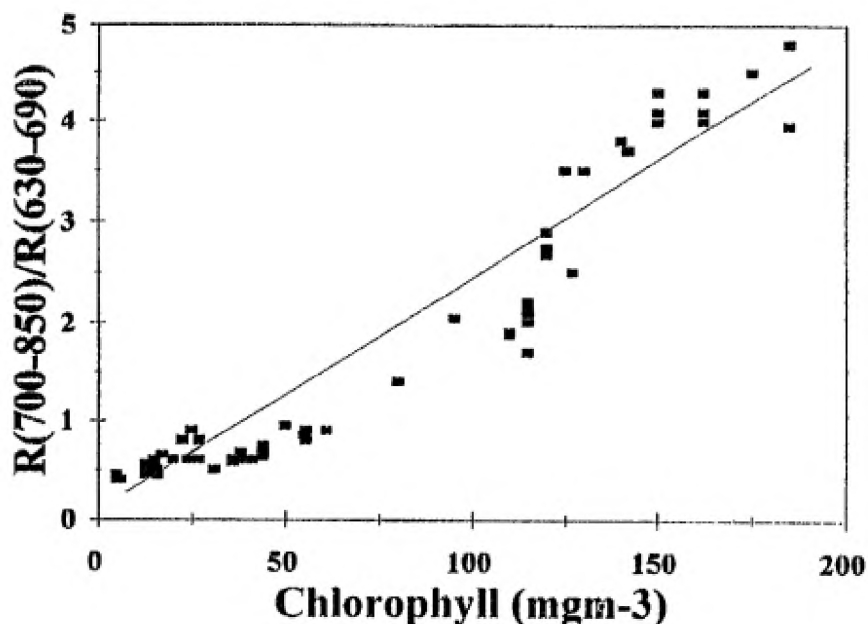
V roce 1993 byla provedena dvě měření na jezeře Kinneret v období od 23. do 25. března a od 28. do 29. dubna. Celkem bylo odebráno 40 a 37 vzorků, aby bylo možné pokrýt vysoký rozsah koncentrací chlorofylu-a. Zpracování vzorku v laboratoři proběhlo podle normy popsané výše. Byly použity dva přístupy na měření obsahu chlorofylu-a v jezeře Kinneret. První z přístupů spočíval v měření radiance vody pomocí přenosného radiometru LICOR LI-1800 v rozsahu od 400 do 850 nm se spektrálním rozlišením 2 nm na každé vzorkovací stanici. Radiance vody byla měřena třikrát a pro samotnou analýzu byla použita průměrná hodnota. Druhý přístup spočíval ve využití obrazových dat z družice Landsat 5 se senzorem TM. Obrazová data prošla geometrickou korekcí. Vstupní data pro geometrickou korekci obsahovala radianci, optickou tloušťku aerosolu a směr osvětlení. Následně byla provedena i atmosférická korekce dat. Výstupní data tvořila povrchovou reflektanci jednotlivých bodů obrazu. Byl použit filtr pro rozlišení vodní plochy od souše, který slouží k omezení výpočtu obsahu chlorofylu-a pouze na vodní plochy [19]. Spektrální vlastnosti chlorofylu-a jsou popsány v kapitole 1.2.1.

Výsledný model pro výpočet chlorofylu-a pomocí přenosného radiometru využívá maximum a minimum reflektance v rozpětí vlnových délek 670 až 850 nm. Minimum reflektance, kde hodnota reflektance téměř nezávisí na obsahu chlorofylu, je asi 670 nm.

Maximum se vyskytuje poblíž 700 nm a se zvyšující se koncentrací chlorofylu se mírně posouvá k vyšším vlnovým délkám (viz Obr. 5 v kapitole 1.2). Zvolený poměr je R_{max}/R_{670} a rovnice pro výpočet chlorofylu-a [19]:

$$Chl-a = -32,35 + (43,08 \pm 1,60) \times R_{max}/R_{670} \quad (8)$$

Druhý přístup využívá ke zjištění koncentrace chlorofylu-a poměr kanálů TM4(800-1100 nm)/TM3(600-690 nm). Minimální změna simulované radiance byla pro kanál TM3, zatímco největší změna byla pro kanál TM4. Tento poměr by měl být maximálně citlivý na koncentraci chlorofylu-a a do jisté míry necitlivý k dalším vlivům. Následující Obr. 13 ukazuje porovnání zjištěného poměru simulované reflektance v kanálech se skutečnou změřenou koncentrací chlorofylu-a [19].



Obr. 13: Poměr simulované reflektance v kanálech Landsat TM se skutečnou koncentrací chlorofylu-a (převzato z [19]).

Dalším algoritmem je OC2_490 (ocean colour) využívající kanály 2 a 4 ve viditelné oblasti, který je určený pro nižší koncentrace chlorofylu-a a proto je vhodný pro pobřežní oceánské vody. Je založen na poměru dvou kanálů o vlnových délkách 490 a 560 nm podle následující rovnice [38]:

$$X = \log_{10}[Rrs_{490}/Rrs_{560}] \quad (9)$$

Log(Chl-a) byl vypočítán z rovnice:

$$\log[\text{Chl-a}] = a + b \cdot X + c \cdot X^2 + d \cdot X^3 \quad (10)$$

Algoritmy založené na více spektrálních kanálech

Jak již z názvu kapitoly vyplývá, algoritmy využívají minimálně tři spektrální kanály. Vícekanálové algoritmy patří mezi semi-empirické metody, jelikož mohou mít více kombinací kanálů a tím reagovat na zbarvení (způsobené například přítomností organických či huminových látek) vody a potlačovat jeho vliv. Vypuštění družic Sentinel-2 a Sentinel-3 a dalších se senzory schopnými lépe kvantifikovat optické vlastnosti vody, vedlo k hledání zdokonalených algoritmů pro odhad chlorofylu-a a dalších složek ve vnitrozemských a pobřežních vodách [39].

Nyní budou v této kapitole uvedeny některé používané semi-empirické algoritmy, tzn., že využívají kombinaci empirického přístupu a znalosti optických vlastností vody s obsahem chlorofylu a dalších konstituentů. Tyto algoritmy jsou často založeny na píicích specifické absorpce fytoplanktonu v odraženém spektru [39].

Publikace [40] obsahuje celkem 65 algoritmů pro výpočet obsahu chlorofylu-a v mořské vodě s využitím 25 družicových senzorů.

Prvním zmiňovaným je algoritmus OC4 (označení OC – „ocean color“, 4 – rovnice bere v úvahu až 4 kanály reflektance o konkrétní vlnové délce). Rovnice pro výpočet hodnoty chlorofylu-a má pak tvar [40]:

$$\log_{10}(\text{Chl}) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + a_3X^3 + a_4X^4 \quad (11)$$

kde X je tzv. maximální pásmový poměr, obecně ve tvaru:

$$X = \log_{10} \left(\frac{R_{rs}(\lambda_b)}{R_{rs}(\lambda_g)} \right) \quad (12)$$

kde R_{rs} je dálkovým průzkumem zjištěná reflektance a λ_b a λ_g znamená fialovo-modrou a zelenou oblast spektra. Například pro družici SeaWiFS je pak konkrétní tvar pásmového poměru:

$$X = \log_{10} \left(\frac{\max[Rrs_{443}, Rrs_{490}, Rrs_{510}]}{Rrs_{555}} \right) \quad (13)$$

Algoritmus tedy využívá maximum ze tří kanálů ve fialovo modré oblasti a jeden kanál ze zelené oblasti viditelného spektra [40].

Dalším příkladem je algoritmus určený pro Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) a více zakalené (Case II) vnitrozemské pobřežní a vody využívající tři kanály z červené až blízké infračervené oblasti spektra. Algoritmus je ve tvaru [41]:

$$Chl_{3band} = 232,329 \cdot [(R_{665}^{-1} - R_{708}^{-1}) \cdot R_{753}] + 23,174 \quad (14)$$

Využití tří kanálů slouží především pro modelování zakalených vod, kde chlorofyl-a není jedinou či dominantní látkou optických vlastností vody. Existuje i dvoupásmový model a oba modely poskytují dobré odhady koncentrací chlorofylu-a v zakalených vodách. V publikaci je vysloven předpoklad, že dobré výsledky pro tento typ vod byly možné díky kanálu 708 nm (na pomezí mezi červenou a infračervenou oblastí), který dříve používané senzory neměly [41].

Další algoritmus TBDO je úpravou vícekanálového algoritmu podle rovnice **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Díky této úpravě bylo možné použít algoritmus TBDO pro družici Sentinel-2. Algoritmus je ve tvaru [38]:

$$\mathbf{TBDO:} \quad X = [Rrs_{740} \cdot ((Rrs_{665})^{-1} - (Rrs_{705})^{-1})] \quad (15)$$

Chlorofyl-a byl vypočítán z rovnice:

$$Chl-a = a \cdot X^2 + b \cdot X + c \quad (16)$$

Posledním zmíněným vícekanálovým algoritmem je Height_705 (metoda výšky píku). Využívá celkem tři kanály podle následující rovnice [42]:

$$\mathbf{Height_705:} \quad X = B5 - ((B4 + B6)/2) \quad (17)$$

Chlorofyl-a byl vypočítán z rovnice:

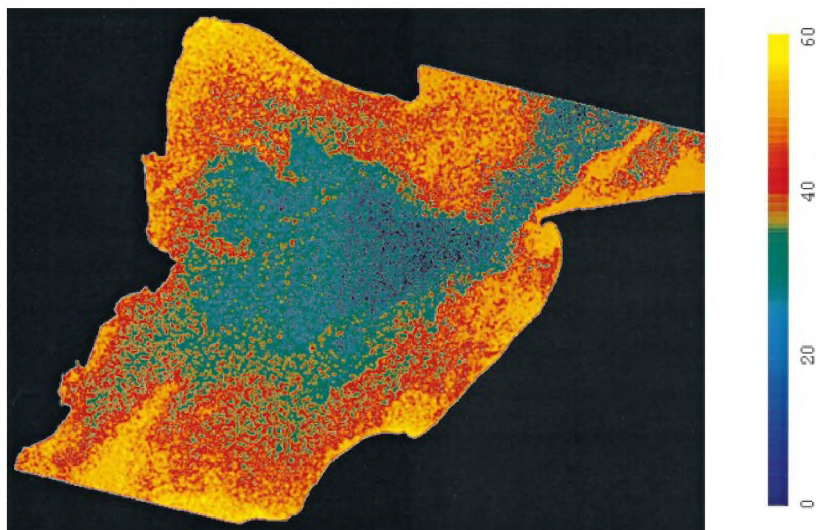
$$Chl-a = a \cdot X + b \quad (18)$$

Algoritmy s využitím neurálních sítí

Podobně jako algoritmy popsané výše, využívá neurální síť vstupní data ze spektrálních kanálů družicového snímku. Jedná se v podstatě o program modelující skutečnou síť neuronů, který dokáže na základě vstupních hodnot vypočítat očekávané výstupy, v tomto případě koncentraci chlorofylu-a. V posledních letech je metoda neurální sítě stále používanější alternativou k lineární regresi. Neurální síť je schopna se učit na sadě trénovacích dat a to změnou zesílení signálu na vstupech jednotlivých neuronů a porovnáním výstupu s naměřenými hodnotami. Na vstupu do neuronové sítě jsou tímto signálem hodnoty spektrálních kanálů, výstupem celé sítě je hodnota chlorofylu-a. Dalším charakteristickým rysem pro algoritmy s využitím neurální sítě je fakt, že obvykle nedostaneme explicitní funkční závislost pro výpočet chlorofylu-a z hodnot kanálů snímku, výsledkem je neuronová síť naučená z těchto vstupních hodnot hodnotu chlorofylu-a odhadnout [43].

Oproti metodám využívajícím lineární regrese patří metody využívající neurální sítě mezi modely neparametrické. Neurální síť také zpravidla využívá jako vstupy všechny kanály, tj. využívá kompletní spektrální informaci [44].

Metoda neurální sítě byla použita například v zátocě Delaware Bay nedaleko New Jersey k mapování koncentrací chlorofylu-a. Na Obr. 14 je znázorněna mapa chlorofylu-a v zátocě Delaware Bay vytvořená touto metodou [43].



Obr. 14: Mapa chlorofylu-a v zátocě Delaware Bay vytvořená pomocí neurální sítě (převzato z [43]).

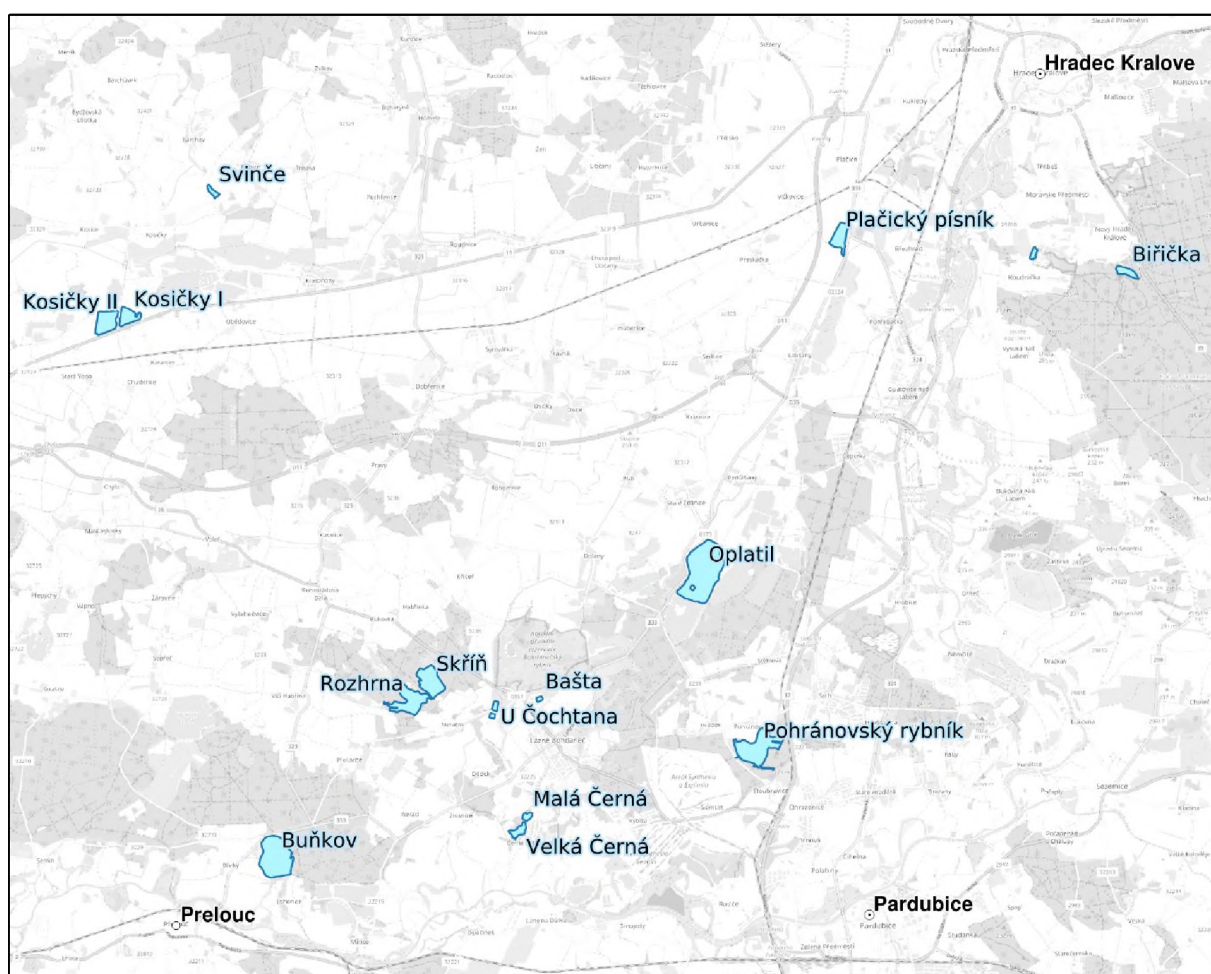
Ze studie o modelování obsahu chlorofylu-a ve vnitrozemských a pobřežních oblastech vyplývá, že algoritmus založený na neurálních sítích vykazoval poměrně přesné výsledky monitoringu chlorofylu-a. Největším úskalím pro monitoring chlorofylu-a ve vodách je volba vhodné atmosférické korekce, proto by měl být další výzkum zaměřen na analýzu vytvořených mapování chlorofylu-a s použitím různých atmosférických korekcí [39]. Neurální sítě mohou být dalším posunem dálkového průzkumu Země pro získávání přesných informací o stavu vodních ploch. Nacházejí uplatnění nejen pro vodní plochy ale i v dalších částech zemského systému [45].

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Na základě zadání diplomové práce o vytvoření modelů pro odhad chlorofylu-a ve vodách v několika variantách zpracování družicových snímků, byly vybrány jako varianty dvě základní atmosférické korekce Sen2Cor a MAJA popsané v kapitolách 1.3.4 a 1.3.5. Obě varianty byly ještě doplněny o dodatečnou prostorově variabilní normalizaci popsanou v kapitole 1.3.6. Celkově jde o čtyři varianty zpracování.

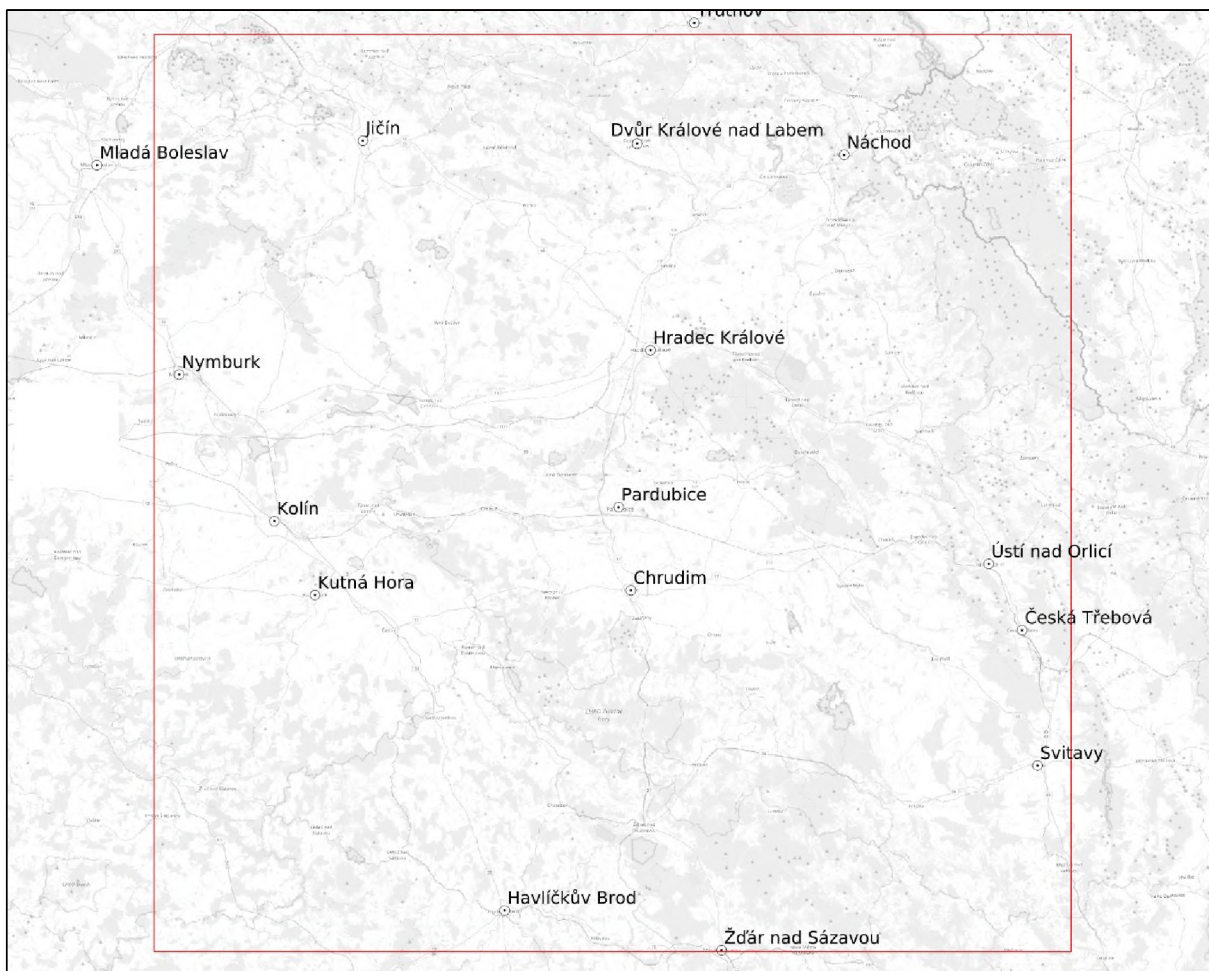
2.1 Zájmová oblast

Oblast odběrů vzorků se nachází v blízkosti Pardubic, respektive mezi Pardubicemi a Hradcem Králové. Na Obr. 15 je mapa všech vzorkovaných vodních ploch.



Obr. 15: Mapa všech vzorkovaných vodních ploch.

Pro vytvoření modelů je zájmová oblast daná rozsahem družicového snímku, který je podstatně větší (viz červený rámeček na Obr. 16).



Obr. 16: Oblast pokrytí družicového snímku.

2.2 Odběr a analýza vzorků

Odběry vzorků byly prováděny vedoucím diplomové práce od roku 2016 až do současnosti v období od dubna do listopadu při vhodných meteorologických podmínkách, tj. při minimální oblačnosti a větru. Odběr vzorku probíhal vždy v den přeletu družice nebo maximálně ± 1 den. Přehled všech vzorkování je v následující

Tab. 3. Celkový počet odebraných vzorků byl mnohem vyšší, ale použito bylo možné pouze odběry, pro které je dostupný kvalitní družicový snímek s atmosférickou korekcí Sen2Cor i MAJA a kde se v blízkém okolí odběrového bodu neobjevuje oblačnost, viditelný odraz oblačnosti či slunce na hladině a jiné jevy snižující kvalitu snímku v daném místě.

Odebírání vzorků probíhalo dále od břehu z důvodu, aby pixel družicového snímku v místě odběru obsahoval pouze vodní hladinu, bez ovlivnění reflektance objekty ze břehu. Z tohoto důvodu byla pro odběr použita loď a později také dálkově řízené odběrové zařízení.

Tab. 3: Seznam vzorkování.

datum vzorkování	bod	vodní plocha
20160824	AV3	Plačický r.
20160913	AV1	Oplatil
20160913	AV2	Oplatil
20170511	AV1	Pohránovský r.
20170511	AV2	Pohránovský r.
20170511	AV3	Oplatil
20170511	AV4	Buňkov
20170511	AV5	Buňkov
20170602	s4	Skříň
20180531	s1	Pohránovský r.
20180531	s2	Plačický
20180807	s1	Velká Černá
20180807	s2	Malá Černá
20180918	s1	Pohránovský r.
20180918	s2	Rozhrna
20181012	s1	Pohránovský r.
20190401	s1	Pohránovský r.
20190401	s2	Pohránovský r.
20190416	s1	Sádky Bohdaneč
20190416	s2	Nádrž U Čochtana
20190416	s3	Kosičky I. (V)
20190416	s4	Kosičky II. (Z)
20190416	s5	Svinče
20190620	AV1	U Čochtana
20190620	AV2	Rozhrna
20190725	s2	Biřička
20190725	s1	Roudnička
20200423	s3	Rozhrna
20200423	s4	Bašta
20200423	s2	Skříň
20200423	s1	U Čochtana

Analýza probíhala do 24 hodin od samotného odběru vzorku. Vzorek byl po celou dobu skladován v ledniče. Průběh analýzy probíhal podle normy ISO 10260, která byla popsána v kapitole 1.2.3.

2.3 Zpracování obrazových dat z družice Sentinel-2

Snímky z družice Sentinel-2 jsou volně dostupné pro veřejnost z datového portálu Copernicus Open Access Hub pro data evropské kosmické agentury. Z tohoto portálu je možné získat družicové snímky s korekcí Sen2Cor. Stejným způsobem byly získány snímky pro korekci MAJA z portálu PEPS (platforma pro využití produktů Sentinel) francouzské kosmické agentury. Nicméně tyto snímky nemají korekci provedenou předem a tak je nutné nejprve o korekci požádat. Snímky korigované metodou MAJA nebylo možné získat pro vzorkování starší, než ze srpna 2016, protože měly jinou strukturu metadat, nekompatibilní s procesorem MAJA. Během prohlížení snímků korigovaných metodou MAJA bylo zjištěno, že u řady snímků se ve vodních plochách a dalších tmavých objektech objevují záporné hodnoty reflektance (celkem 28 hodnot), což zřejmě vypovídá o nadhodnocení AOT touto metodou v některých místech snímku. Dodatečná relativní radiometrická normalizace snímků, označovaná `i.grid.atcor` (viz kapitola 1.3.6) byla provedena vedoucím práce pomocí jeho vlastního programu, který je v současné době stále ve vývoji. Po této dodatečné korekci byla většina původně záporných hodnot reflektance v místech odběrů opravena na kladné a zbývající 4 záporné hodnoty se vyskytovaly pouze v kanálech S06 a S07.

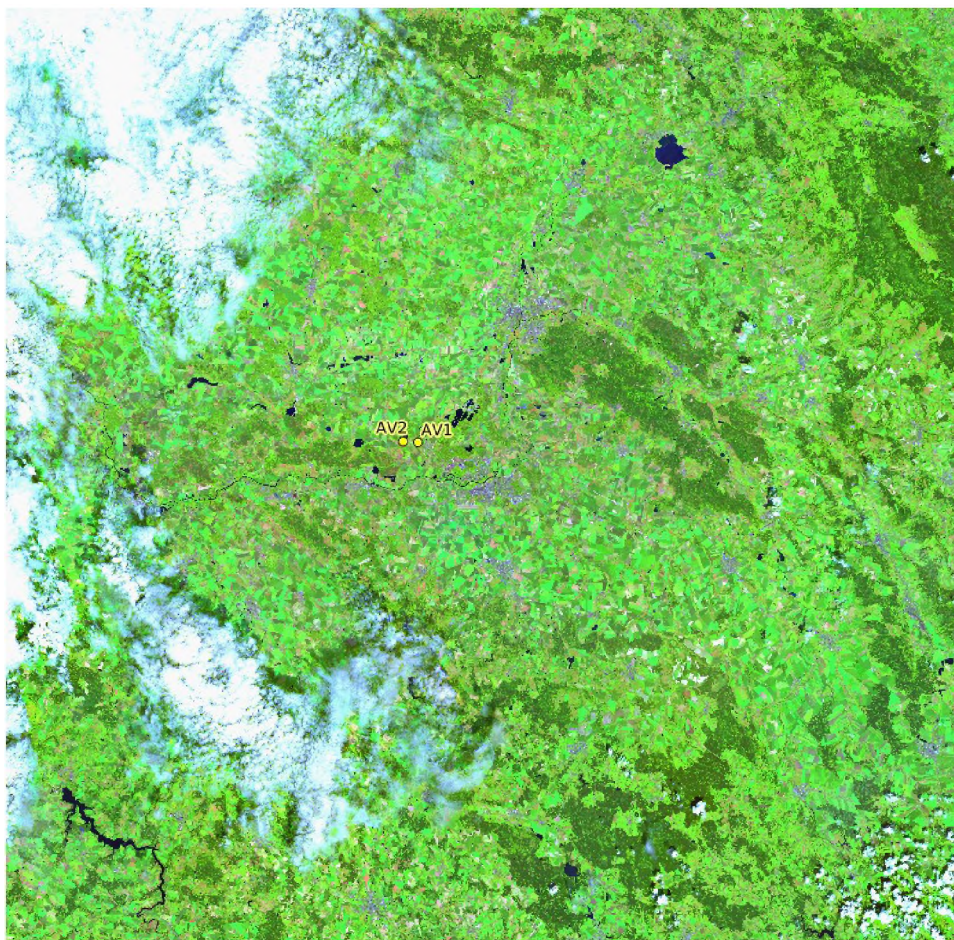
Všechny použité snímky jsou z dlaždice T33UWR, která pokrývá oblast zobrazenou na Obr. 16. Dráha snímání družice byla R122 nebo R022. V případě snímků z dráhy R022, kde se zájmová oblast nachází na okraji dráhy, je obrazovými daty pokryta jen asi polovina snímku. Systém drah a dlaždic snímků Sentinel-2 je popsán v [46].

Po získání korigovaných družicových snímků ze zájmové oblasti bylo možné přistoupit ke zpracování snímků pro získání obrazových dat pro následné vyhodnocení a vytvoření modelu chlorofylu-a.

Pro vlastní úpravu byl použit program QGIS a nástroje GDAL. Snímky byly ve formátu, který není vhodný pro přímé zpracování v QGIS, a proto byly nejprve převedeny do formátu ERDAS IMAGINE (.img). Formát byl zvolen z několika důvodů: sdružuje kanály snímku, má dobrou kompresi a také jeho načtení a zobrazení je mnohem rychlejší, než u původních stažených družicových dat. Zároveň s tím byly vytvořeny podpůrné soubory, například index MNDWI [47] a maska vodních ploch.

Nejprve byl do QGIS načten snímek pro dané datum vzorkování, respektive soubor multispektrálního snímku s příslušným typem korekce. Dále byl do mapy přidán soubor z GPS

s pozicemi odběru vzorků, který zobrazil počet a umístění bodů po vzorkování. Na Obr. 17 je znázorněn tento krok.



Obr. 17: Družicová snímek s body odběru vzorků z data 20.06.2019

Pomocí nástroje *point sampling tool* byly ve vzorkovacích bodech načteny hodnoty kanálů 1 až 6 družicového snímku a jako tabulky hodnot uloženy do samostatné složky. Následně byl celý projekt uložen.

Popsaný postup zpracování obrazových dat z družice Sentinel byl proveden celkem čtyřikrát pro každé vzorkování, dvakrát na snímku se základní atmosférickou korekcí (Sen2corr a MAJA) a dále dvakrát na snímku s použitou dodatečnou normalizací.

2.4 Vyhodnocení korelace a vytvoření modelů

Vyhodnocení korelace a vytvoření modelů vycházelo ze zpracovaných prediktorů, které sloužily pro sestavení kalibračního grafu a následně validačního grafu. Hodnoty a názvy bodů byly zkopírovány do tabulky na Obr. 18 (červený rámeček). V případě, že pořadí a názvy (zelený rámeček) nesouhlasily, bylo nutné pomocí automatického filtru vše seřadit a teprve pak zkopírovat hodnoty do tabulky.

sampling	poi	water body	notes	param	log(paramet	S02	S03	S04	S05	S06	S07
20160824	AV3	Plačický r.		5,3	0,72	203,615463	409,80219	258,42838	177,52939	126,88597	170,2671509
20160913	AV1	Oplatil		2,8	0,44	130,769821	175,51402	101,58	60,105301	35,758816	-2,28234696
20160913	AV2	Oplatil		2,1	0,32	127,309853	159,40559	64,689873	25,736893	2,2416217	-6,74560599
20170511	AV1	Pohránský r.		4,0	0,60	66,5162354	144,79968	188,48863	166,05196	173,39391	142,1407622
20170511	AV2	Pohránský r.		2,8	0,44	99,2155457	153,29861	218,4059	194,67149	143,24185	121,2170109
20170511	AV3	Oplatil		2,6	0,41	147,747482	176,82884	128,66187	71,368179	74,136717	59,7373123
20170511	AV4	Buňkov		16,4	1,21	270,62439	504,99023	519,80554	545,72888	249,86937	173,7750702
20170511	AV5	Buňkov		14,2	1,15	260,032013	496,76114	510,70227	540,9256	215,01917	146,21827
20170602	s4	Skříň		170,3	2,23	428,288452	761,76935	450,61749	901,09137	588,883	670,319580
20180531	s1	Pohránský r.		17,0	1,23	85,3651123	167,21468	142,82916	203,93224	-1,9496171	-15,1285439
20180531	s2	Plačický		7,0	0,84	202,559875	400,67206	162,06578	155,72241	65,646126	76,5955200
20180807	s1	Velká Černá		19,4	1,28	272,028748	614,54846	321,01602	496,92343	187,51758	165,2667542
20180807	s2	Malá Černá		11,4	1,05	314,502014	701,60791	299,49045	380,51508	148,31221	159,4816899
20180918	s1	Pohránský r.		38,1	1,58	193,613113	312,51938	321,46561	280,16168	77,671677	64,6356506
20180918	s2	Rozhma		174,1	2,24	251,324966	573,81763	439,92062	818,09613	485,7012	508,621704
20181012	s1	Pohránský r.		94,2	1,97	193,919815	358,53903	240,33047	435,19202	204,6145	237,0471039
20190401	s1	Pohránský r.		35,1	1,54	67,9126816	235,69682	271,0112	370,53314	251,90846	236,600555
20190401	s2	Pohránský r.		37,5	1,57	96,1246948	259,89618	276,6709	377,33725	256,38956	239,3361816
20190416	s1	Sádky Bohdaneč		12,5	1,09	110,904465	216,97371	184,22826	242,39816	150,96375	258,0976257
20190416	s2	Nádrž U Čochtana		88,6	1,94	156,700577	335,27374	250,82452	566,54504	229,18373	328,9279789
20190416	s3	Kosičky I. (V)		7,1	0,84	262,148743	558,50116	309,69766	280,02518	124,53497	187,2433167
20190416	s4	Kosičky II. (Z)		5,4	0,73	305,443451	557,96423	325,22556	271,29266	103,55252	160,649719
20190416	s5	Svinče		59,6	1,77	224,489365	454,15771	312,12314	490,30051	343,89975	422,9003906
20190620	AV1	U Čochtana		61,8	1,79	181,841309	322,89203	156,11447	431,00659	229,48123	254,2546239
20190620	AV2	Rozhma		56,7	1,75	257,263123	514,75909	317,59473	629,83124	356,8652	396,2844238

Obr. 18: Tabulka vytvořená v aplikaci LibreOffice Calc.

Po seřazení hodnot naměřeného chlorofylu-a byla tabulka rozdělena na 2 skupiny. Liché hodnoty chlorofylu-a (celkem 16) sloužily pro sestavení kalibračního grafu a sudé hodnoty chlorofylu-a (celkem 15) sloužily pro sestavení validačního grafu. Z takto připravených dat bylo možné přejít k vytvoření modelů pro obsah chlorofylu-a ve vodě. Po vložení dat z družicových snímků do tabulky byly vypočítány hodnoty korelace jednotlivých kanálů snímku, jejich vzájemných poměrů, normalizovaných diferencí a dalších prediktorů. Jako další prediktory chlorofylu-a byly zvoleny ještě hodnoty vycházející z algoritmu OC2_490 (podle rovnice (9), [38]), Height_705 (podle rovnice (17), [42]), TBDOv1 a TBDOv2 (podle rovnice (15), [38]).

TBDOv1: (19)

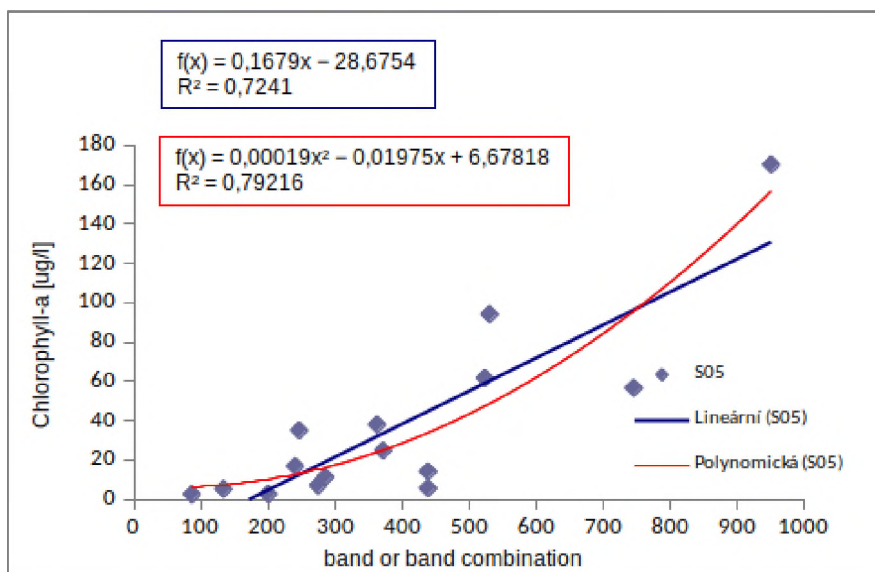
$$X = \left[\frac{1}{Rrs_{665}} - \frac{1}{Rrs_{704}} \right] \cdot Rrs_{740} = \left(\frac{1}{S04} - \frac{1}{S05} \right) \cdot S06$$

TBDOv2: (20)

$$X = \left[\frac{1}{Rrs_{665}} - \frac{1}{Rrs_{704}} \right] \cdot Rrs_{783} = \left(\frac{1}{S04} - \frac{1}{S05} \right) \cdot S07$$

Následně byly sestaveny grafy závislosti hodnot log(chlorofylu-a) nebo chlorofylu-a na hodnotách s nejlepší korelací. Výsledné grafy byly proloženy nejčastěji lineární závislostí. Byla použita ovšem i jiná proložení a to exponenciální, logaritmická, polynomická nebo

mocninná. Nelineární proložení byla zkoušena z důvodu zlepšení modelu, jak je vidět na Obr. 19. Na základě spojnice trendu byla vložena rovnice grafu (modrý a červený rámeček na Obr. 19) a koeficient R^2 . Postup byl stejný u všech čtyř korekcí.



Obr. 19: Lineární a polynomičké proložení modelu.

Po vložení hodnot vzorků do tabulky, zjištění korelací bylo možné přejít k validaci. Po vygenerování vzorku určených pro model byla ze sestrojených grafů vzata nejčastěji rovnice lineární závislosti pro další výpočty. Poté byly vygenerovány pouze vzorky pro ověření a podle použitých rovnic z modelu byl sestrojen graf závislosti vypočítaných hodnot chlorofylu z dříve vybraných rovnic na hodnotách příslušných kombinací kanálů. Opět byl postup stejný u všech čtyř korekcí.

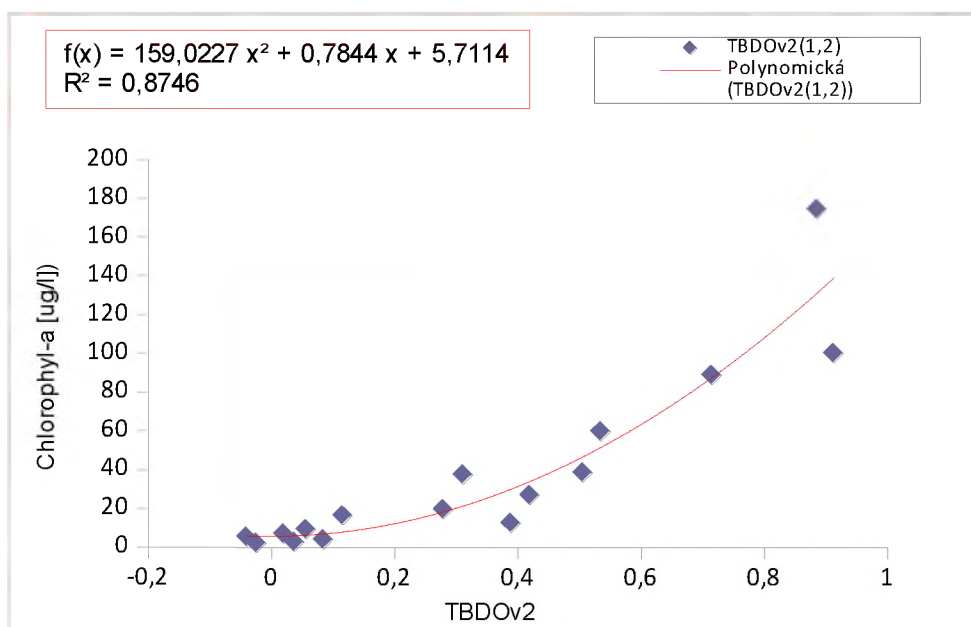
3 VÝSLEDKY A DISKUSE

V následujících čtyřech kapitolách bude popsán vždy nejlepší výsledek/model pro stanovení obsahu chlorofylu-a ve vodě pro jednotlivé varianty korekce. Jako nejlepší byl vždy vybrán model s nejlepšími parametry podle validačního grafu vypočtených hodnot chlorofylu vůči naměřeným, tj. RMSE, směrnice a korelace této závislosti. Vybraný nejlepší model měl zároveň všechny tyto parametry nejlepší. Všechny modely byly vytvořeny na základě 16-ti naměřených hodnot chlorofylu-a v rozsahu 2,1 až 174,1 $\mu\text{g/l}$.

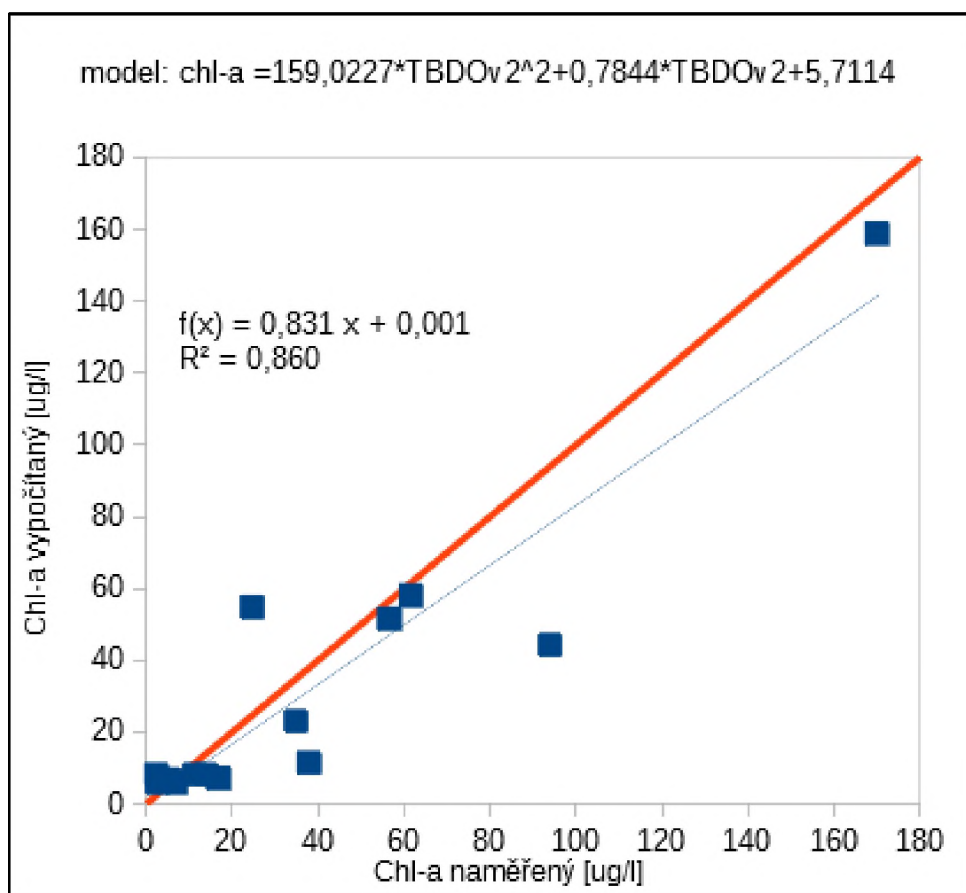
3.1 Sen2cor

Prvním typem korekce byla Sen2cor. Po porovnání všech výsledných kalibračních modelů byl pro korekci Sen2cor vybrán jako nejlepší model vycházející z kalibračního modelu na Obr. 20 s polynomičným proložením, který vyjadřuje závislost hodnot chlorofylu-a na hodnotách prediktoru TBDOv2 (viz kapitola 2.4).

Zároveň má model na Obr. 21 nejnižší RMSE (střední kvadratická chyba), která byla 17,6 a je udávána v jednotkách chlorofylu-a, tedy v $\mu\text{g/l}$. Graf validačního modelu je vyjádřen jako závislost naměřeného chlorofylu-a na hodnotách chlorofylu-a vypočítaného z rovnice pro validaci. Červená linie značí ideální průběh a modrá linie je spojnice trendu.



Obr. 20: Kalibrační graf s polynomičným proložením pro korekci Sen2cor



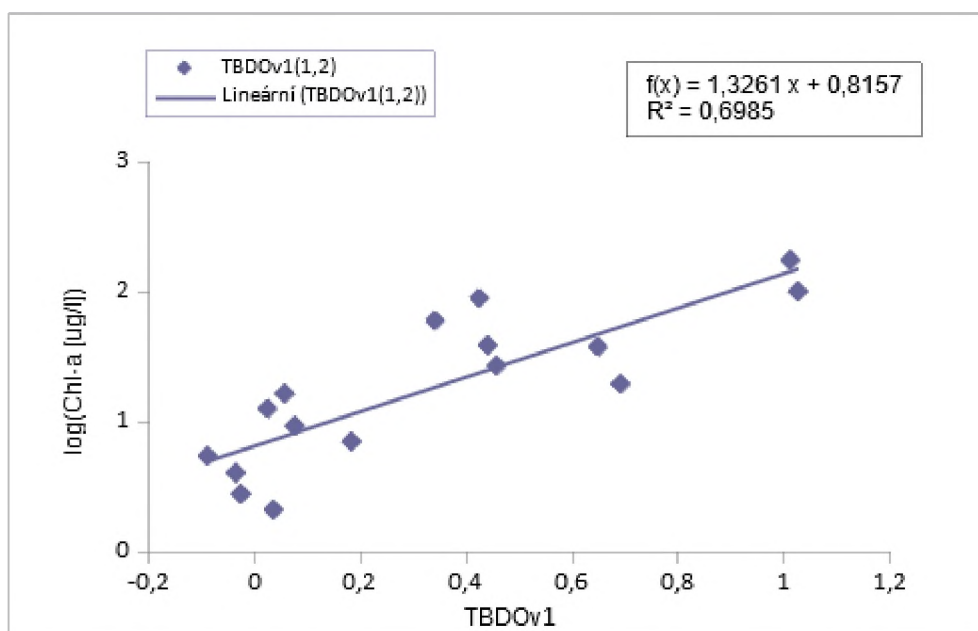
Obr. 21: Validační graf pro nejlepší model po korekci Sen2cor

RMSE [$\mu\text{g/l}$]	17,6
R^2	0,860
směrnice	0,831

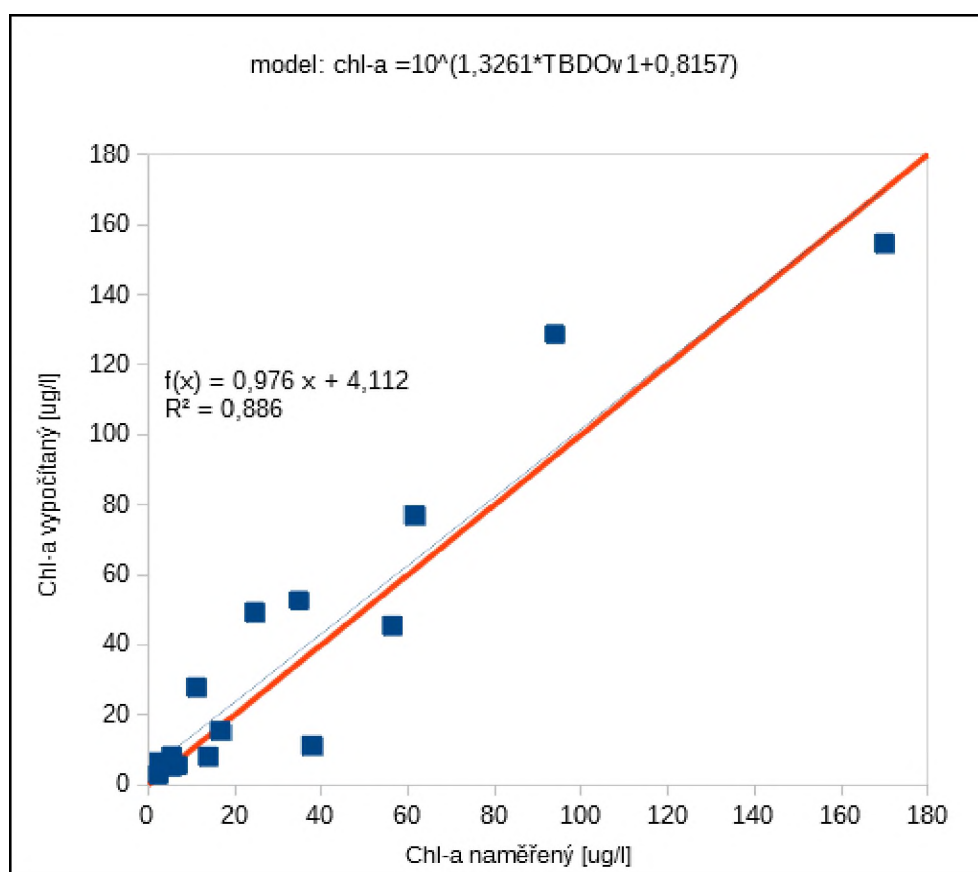
3.2 Sen2cor+i.grid.atcor

Pro druhou korekci Sen2cor doplněnou o relativní radiometrickou normalizaci byl vybrán jako nejlepší kalibrační model s lineárním proložením na Obr. 22. Kalibrační model vychází ze závislosti hodnot $\log(\text{chl-a})$ na hodnotách prediktoru TBDOv1 (viz kapitola 2.4).

Ze všech výsledných modelů byl vybrán model na Obr. 23, který měl pro tuto variantu korekce nejnižší RMSE s hodnotou 15,8 $\mu\text{g/l}$. Validační graf je opět vyjádřen závislostí chlorofylu-a naměřeného na chlorofylu-a vypočítaném z rovnice pro validaci. Červená linie značí ideální průběh.



Obr. 22: Kalibrační graf s lineárním proložením pro korekci sen2cor+i.grid.atcor



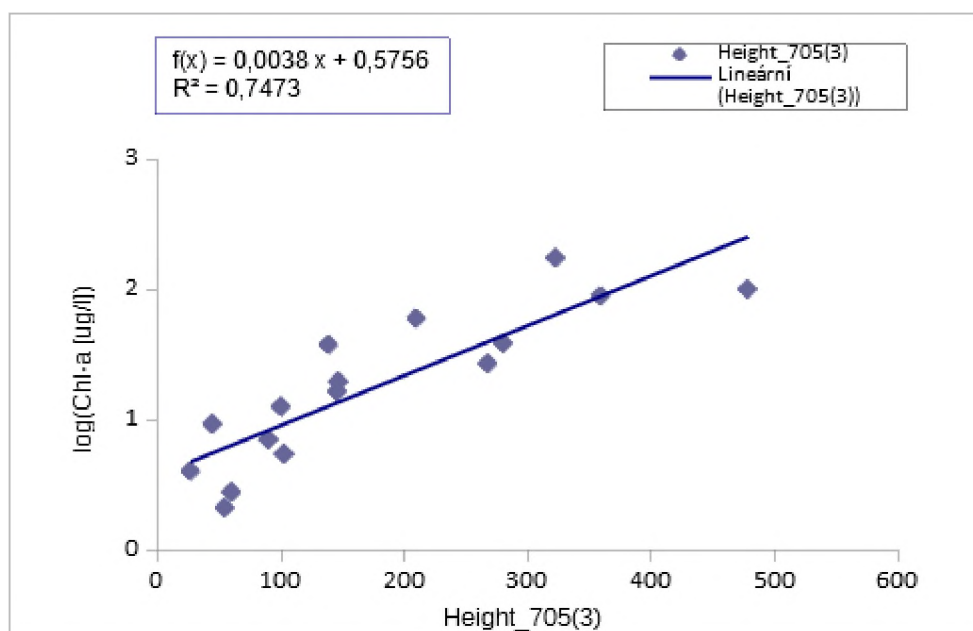
Obr. 23: Validační graf pro nejlepší model po korekci Sen2cor+i.grid.atcor

RMSE [$\mu\text{g/l}$]	15,8
R^2	0,886
směrnice	0,976

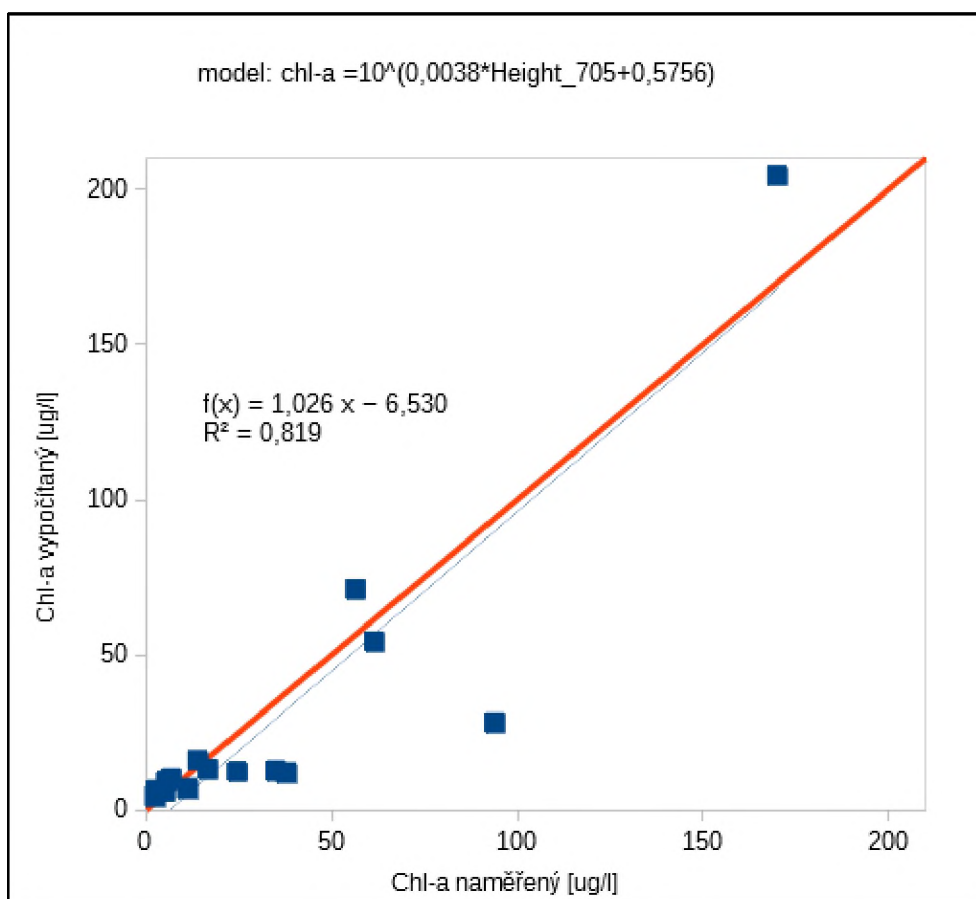
3.3 MAJA

Další korekcí byla korekce MAJA. Pro tuto korekci byl vybrán nejlepší kalibrační model s lineárním proložením na Obr. 24. Graf vyjadřuje závislost hodnot $\log(\text{chl-a})$ na hodnotách vypočítaných algoritmem Height_705 (viz kapitola 1.3.7).

Nejlepší validační graf pro korekci MAJA je zobrazen na Obr. 25. Jeho RMSE bylo $22 \mu\text{g/l}$. Červená linie značí ideální průběh.



Obr. 24: Kalibrační graf s lineárním proložením pro korekci MAJA

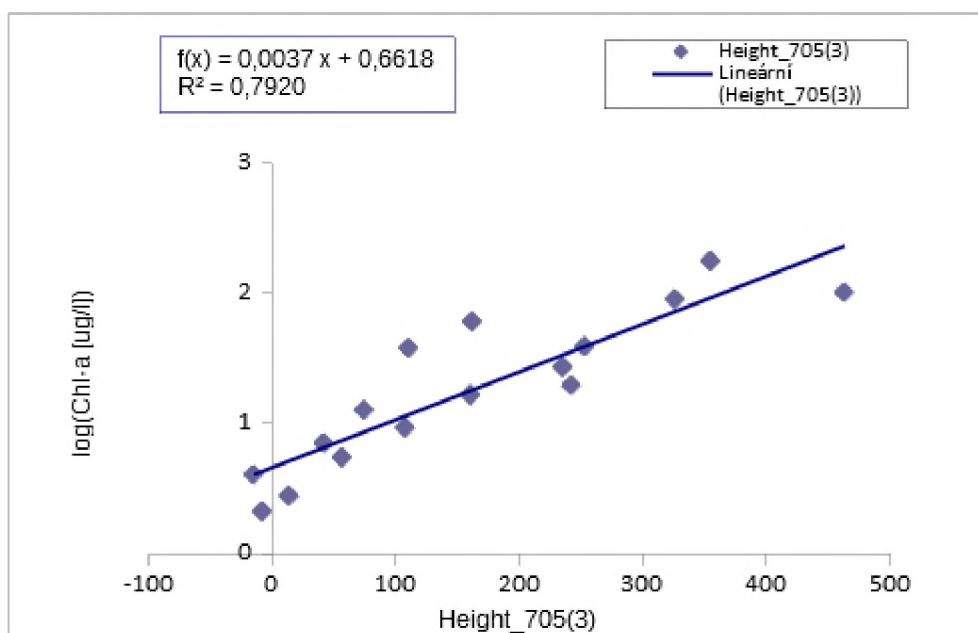


Obr. 25: Validační graf pro nejlepší model po korekci MAJA

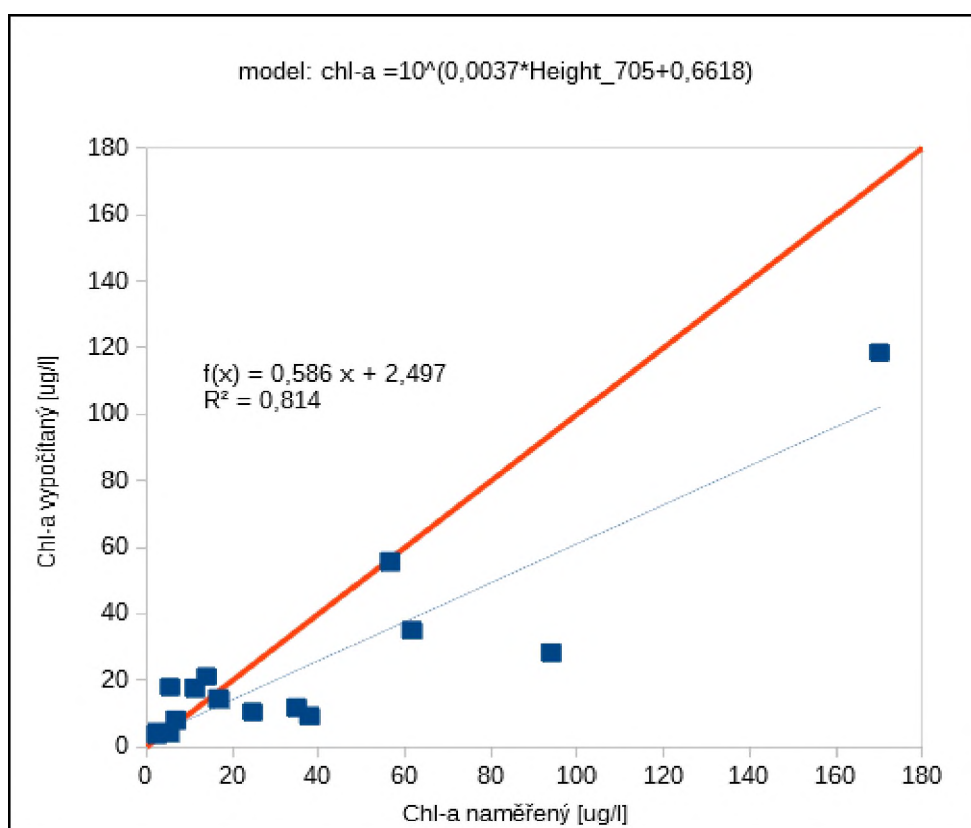
RMSE [$\mu\text{g/l}$]	22,0
R^2	0,819
směrnice	1,026

3.4 MAJA+i.grid.atcor

Posledním typem korekce provedeným v této práci je MAJA doplněná o relativní radiometrickou normalizaci. Nejlepší validační graf vycházel z kalibrační grafu s lineárním proložením na Obr. 26. Stejně jako v předchozím případě vyjadřuje graf závislost $\log(\text{chl-a})$ na hodnotách vypočítaných algoritmem Height_705. Hodnota RMSE nejlepšího modelu na Obr. 27 činila $25,4 \mu\text{g/l}$.



Obr. 26: Kalibrační graf s lineárním proložením pro korekci MAJA+i.grid.atcor



Obr. 27: Validační graf pro nejlepší model po korekci MAJA+i.grid.atcor

RMSE [$\mu\text{g/l}$]	25,4
R ²	0,814
směrnice	0,586

3.5 Porovnání výsledků

Ze všech zmiňovaných variant korekce se jeví jako nejlepší model na Obr. 23 pro korekci Sen2cor s relativní radiometrickou normalizací. Rovnice modelu je:

$$\text{chl-a} = 10^{(1,3261 \cdot \text{TBDOv1} + 0,8157)} \quad (21)$$

Mohlo to být také díky tomu, že nejlépe předpovídal hodnoty chlorofylu-a z posledních dvou nejvyšších naměřených hodnot, které mají díky velké absolutní hodnotě odchylek velký vliv na RMSE, korelaci i směrnici validačního grafu. Jestliže měla metoda korekce Sen2cor s relativní radiometrickou normalizací nejlepší výsledek podle RMSE ze všech uvedených metod korekce, naopak MAJA s relativní radiometrickou normalizací i přes poměrně nízké RMSE s hodnotou 25,4 $\mu\text{g/l}$ poskytovala z vybraných nejlepších výsledků nejméně spolehlivý model.

Při porovnání kalibračních dat pro jednotlivé varianty korekce snímků vypadala metoda Sen2cor bez dodatečné korekce RRN jako neslibnější. Celkově měla pro různé kombinace kanálů snímků 10 korelací nad hodnotu 0,7 (včetně vícekanálových algoritmů TBDOv1, TBDOv2 a Height_705) Nejvyšší hodnoty korelace v kalibračním grafu měl poměr kanálů S04/S05 s hodnotou 0,824 a algoritmus TBDOv2 s hodnotou 0,827. A právě použitý algoritmus TBDOv2 poskytl pro daný typ korekce nejlepší výsledek také při validaci, který je uveden na Obr. 21 (v kapitole 3.2). Celkem bylo sestrojeno 11 validačních grafů s průměrnou hodnotou RMSE 22,3 $\mu\text{g/l}$.

Korekce Sen2cor doplněná o relativní radiometrickou normalizaci měla celkem 6 korelací s hodnotou přesahující 0,7. Bylo sestrojeno celkem 8 validačních grafů k porovnání s průměrnou hodnotou RMSE 30,15 $\mu\text{g/l}$. Tento typ korekce poskytl vůbec nejlepší výsledek ze všech a je znázorněn na Obr. 23. Podobně jako v předchozím případě vychází model z hodnot vícekanálového algoritmu, avšak v tomto případě z TBDOv1. Nejvyšší hodnoty korelace byly 0,781 a 0,753 právě pro TBDOv2 respektive TBDOv1. Algoritmus Oc2_490 poskytl velmi nízkou hodnotu korelace.

Během testování jednotlivých typů korekcí vše nasvědčovalo tomu, že korekce MAJA využívající časových řad nebude vhodnou volbou pro úpravu obrazových dat. Následné

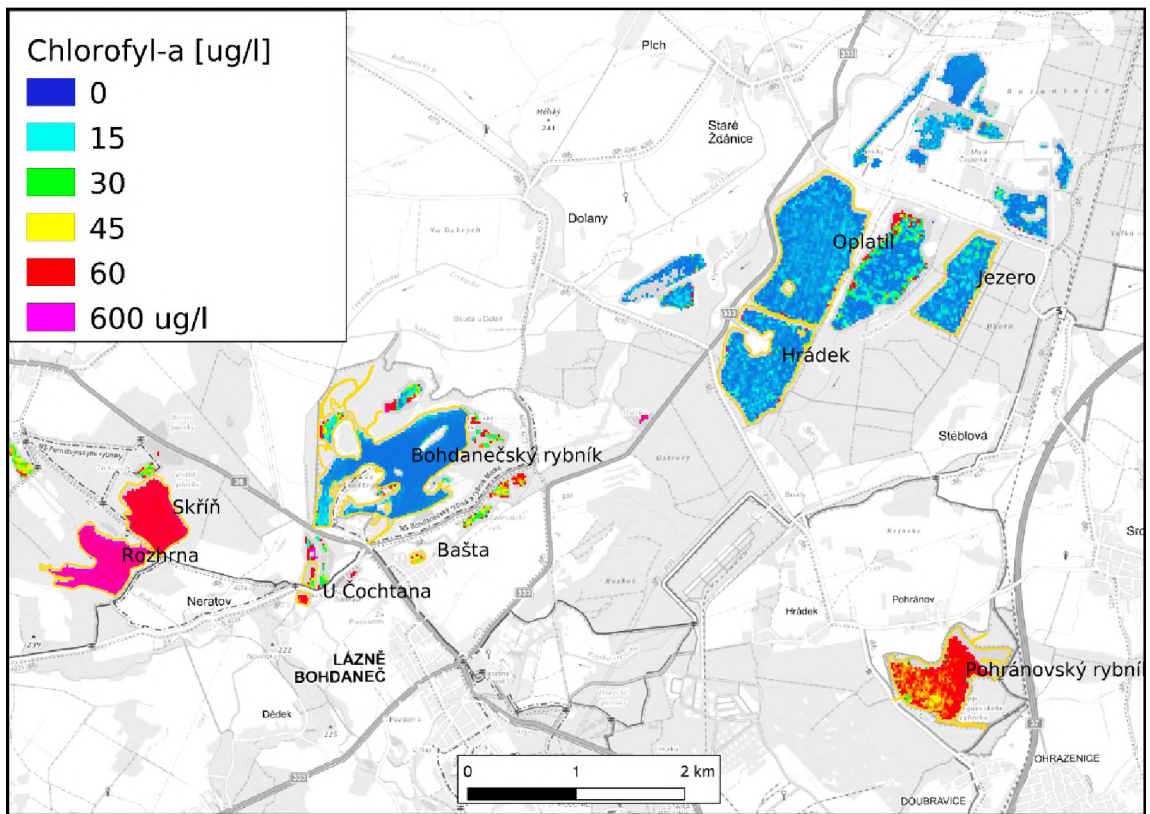
výsledky tuto domněnku potvrdily. Pouze jedna korelace měla hodnotu vyšší než 0,7 a to za použití algoritmu Height_705 (metoda výšky píku). Pravděpodobně proto, že prostý rozdíl mezi bází a vrcholem píku ve spektru, na kterém je algoritmus založen, není ovlivněn nepřesností absolutních hodnot reflektance, a to ani v případě, že jsou posunuté až do záporných čísel. Validační graf vycházející z hodnot tohoto algoritmu je znázorněn na Obr. 25 a je zároveň nejlepším výsledkem pro tento typ korekce. K porovnání byly sestrojeny celkem 3 validační grafy s průměrnou hodnotou RMSE 37,2 $\mu\text{g/l}$.

Metoda MAJA doplněná o relativní radiometrickou normalizaci poskytovala o něco lepší výsledky než samotná MAJA. Celkem 4 korelace v kalibračních grafech měly hodnotu vyšší než 0,7 a nejvyšší z nich 0,770 a 0,739 patřily normalizované diferencii kanálů S04 a S05 a poměru kanálů S05/S04. Pro porovnání bylo sestrojeno celkem 6 validačních grafů s průměrnou hodnotou RMSE 70,6 $\mu\text{g/l}$. Nejlepší model pro danou korekci je znázorněn na Obr. 27 a navzdory výše zmíněným vyšším korelacím jiných kombinací kanálů v kalibračních grafech, validace dopadla opět nejlépe pro algoritmus Height_705.

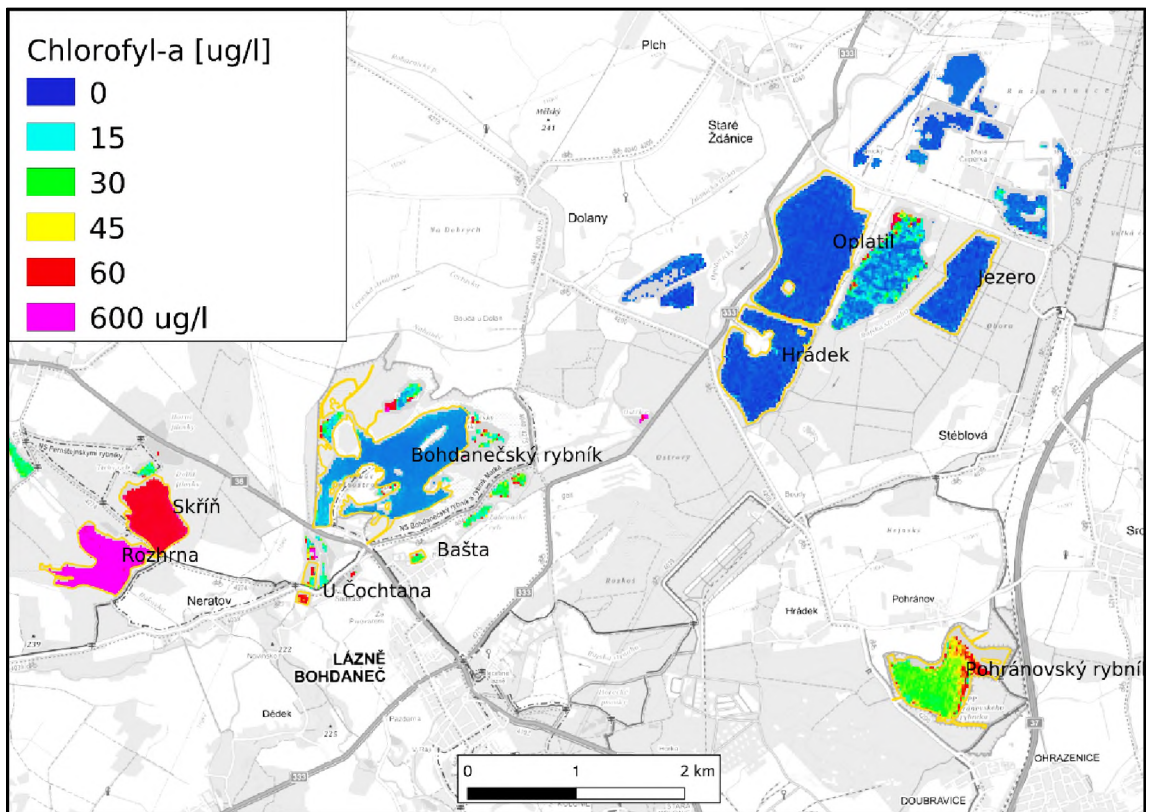
Celkově z výsledků vyplývá, že pro samotnou korekci sen2cor nebo doplněnou a relativní radiometrickou normalizaci bylo nejlepší použít vícekanálový algoritmus TBDOv1 nebo TBDOv2. Pro jednotlivé typy korekce MAJA měl nejlepší výsledky algoritmus Height_705.

Ve všech případech bylo dosaženo nejlepších výsledků vícekanálovými semi-empirickými algoritmy před samotnými kanály či jejich poměry popřípadě normalizovanými diferencemi.

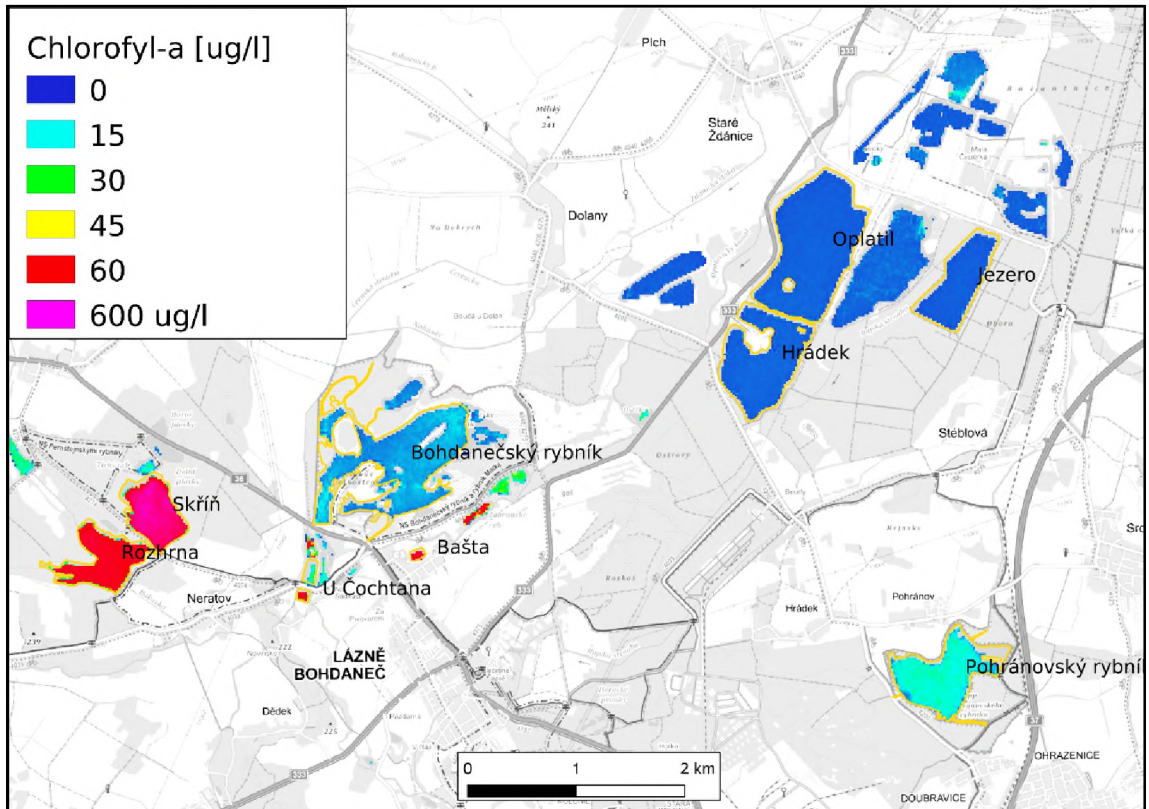
Na následujících Obr. 28, Obr. 29, Obr. 30 a Obr. 31 jsou znázorněny výsledné mapy chl-a ze vzorkování, které proběhlo dne 25.07.2019, pro jednotlivé varianty korekce.



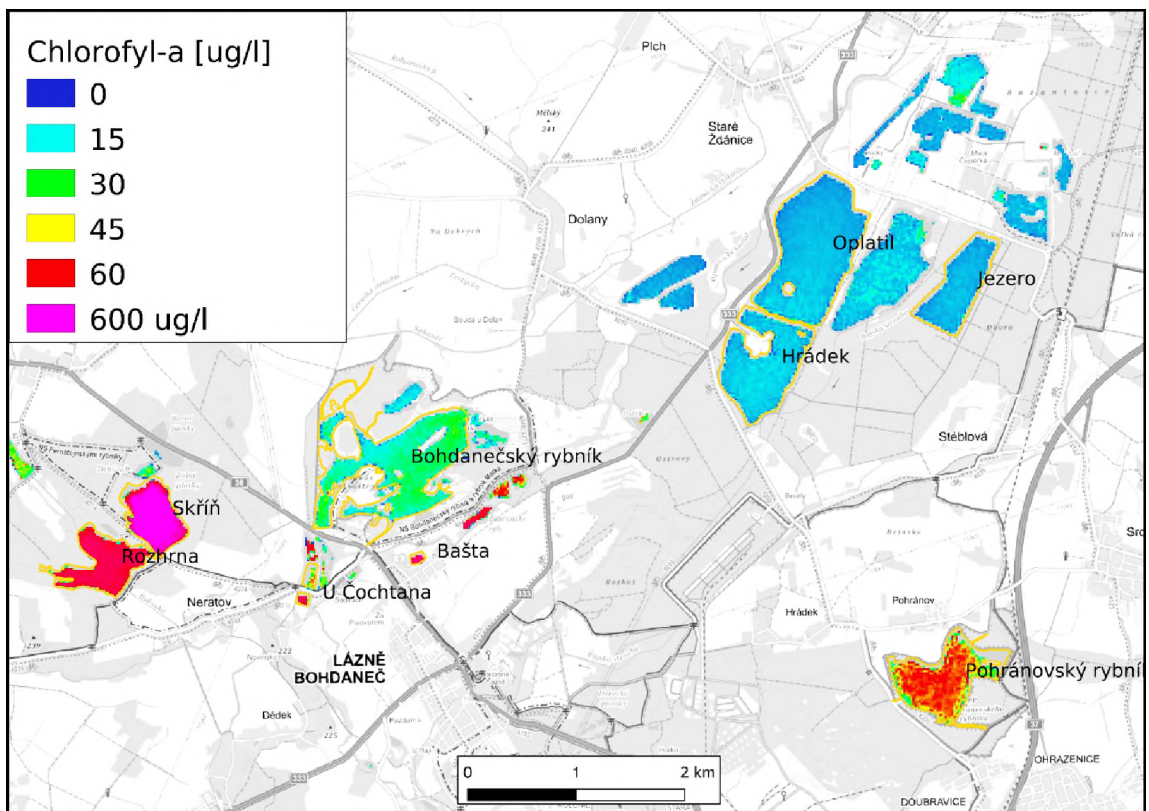
Obr. 28: Mapa chl-a po korekci Sen2cor



Obr. 29: Mapa chl-a po korekci Sen2cor+i.grid.atcor



Obr. 30: Mapa chl-a po korekci MAJA



Obr. 31: Mapa chl-a po korekci MAJA+i.grid.atcor

Při porovnání všech čtyř map vyplývá, že pro všechny varianty korekce byly odhady obsahu chlorofylu-a ve vodě podobné. Výrazný rozdíl byl u Pohránovského rybníku, který mohl být způsoben přítomností huminových látek. Jejich zbarvení může výsledky ovlivnit a míra tohoto ovlivnění může být ovlivněna kombinací kanálů v daném algoritmu.

4 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvoření modelů pro odhad koncentrace chlorofylu-a v několika variantách zpracování obrazových dat z družice Sentinel-2 a jejich vzájemné srovnání. Byly použity čtyři varianty korekcí, konkrétně Sen2cor, Sen2cor s dodatečnou korekcí i.grid.atcor, MAJA a MAJA s dodatečnou korekcí i.grid.atcor. Byla vyzkoušena řada kombinací spektrálních kanálů včetně čtyř semi-empirických algoritmů z literatury.

Celkem bylo sestrojeno a validováno 28 modelů. V práci jsou podrobně popsány čtyři nejlepší modely (pro každou variantu zpracování snímků jeden) a modely byly porovnány.

Z výsledků vyplývá, že nejúčinnější korekcí byl Sen2cor+i.grid.atcor s kombinací s prediktorem TBDOv1. Nejlepší nalezený model podle rovnice (21) měl $RMSE = 15,8 \mu\text{g/l}$, $R^2 = 0,886$ a směrnici 0,976.

Naopak korekce MAJA se v současné verzi jeví jako méně vhodná korekce pro aplikaci v oblasti modelování kvality povrchových vod.

LITERATURA

- [1] HEKERA, Petr. *Monitoring životního prostředí*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013. ISBN 978-80-244-3475-9.
- [2] *Dálkový průzkum Země (DPZ) | CGI.com* [online]. [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.cgi.com/ceska-republika/cs/dalkovy-pruzkum-zeme>
- [3] OPPELTOVÁ, Petra. *Ochrana vodních zdrojů*. B.m.: Mendelova univerzita, 2015. ISBN 978-80-7509-218-2.
- [4] BC. PETRA HUBALOVÁ A RNDR. TOMÁŠ JANÍČEK. *ZPRÁVA O STAVU VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ ČESKÉ REPUBLIKY V ROCE 2017* [online]. B.m.: Ministerstvo zemědělství, 2018 [vid. 2020-03-18]. ISBN 978-80-7434-463-3. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/607186/Modra_zprava_2017_WEB_18.pdf
- [5] *Povodí Labe* [online]. [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://www.pla.cz/planet/webportal/internet/default.aspx>
- [6] *Krajská hygienická stanice Královéhradeckého kraje - Novinky* [online]. [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.khshk.cz/news.php>
- [7] ŠELEŠOVSKÁ, Renáta, BANDŽUCHOVÁ, Lenka, CHÝLKOVÁ, Jaromíra, UNIVERZITA PARDUBICE, CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ FAKULTA. *Ekoanalýza II*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-80-7395-633-2.
- [8] *NV401-2015.pdf* [online]. [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/docu/predpisy/download/NV401-2015.pdf>
- [9] J. ŠOLC, MORÁVKOVÁ, L., POSPÍŠILOVÁ, J. 2 VODA / WATER. *PRAHA- Životní prostředí 1999* [online]. 1999 [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: http://envis.prahamesto.cz/rocenky/Pr_99/kap_021.htm
- [10] GIARDINO, Claudia, PEPE, Monica, BRIVIO, Pietro Alessandro, GHEZZI, Paolo, ZILIOLI, Eugenio. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery. *Science of The Total Environment* [online]. 2001, **268**(1–3), 19–29. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/S0048-9697(00)00692-6
- [11] SCHOTT, John R, BARSİ, Julia A, NORDGREN, Bryce L, RAQUEÑO, Nina Gibson, DE ALWIS, Dilkushi. Calibration of Landsat thermal data and application to water resource studies. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2001, **78**(1–2), 108–117. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-4257(01)00253-X
- [12] HE, Xianqiang, BAI, Yan, PAN, Delu, TANG, Junwu, WANG, Difeng. Atmospheric correction of satellite ocean color imagery using the ultraviolet wavelength for highly turbid waters. 2012, 17.
- [13] PUMANN, P, BAUDIŠOVÁ, D, KOŽÍŠEK, F, ŠAŠEK, J, MYŠÁKOVÁ, M. *Metodický návod na vzorkování, terénní a laboratorní vyšetřování a hodnocení jakosti vody v přírodních koupalištích a povrchových vodách ke koupání* [online]. B.m.: Státní zdravotní ústav. 2014 [vid. 2020-01-10]. Dostupné

z: http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/voda/pdf/tacr/Metodika_koupaci_vody.pdf. Ministerstvem zdravotnictví certifikovaná metodika

- [14] ANDERSON, Paul, DAVIE, Robert D. Use of Transparency Tubes for Rapid Assessment of Total Suspended Solids and Turbidity in Streams. *Lake and Reservoir Management* [online]. 2004, **20**(2), 110–120. ISSN 1040-2381, 2151-5530. Dostupné z: doi:10.1080/07438140409354355
- [15] PATEL, B. H. 11 - Natural dyes. In: M. CLARK, ed. *Handbook of Textile and Industrial Dyeing* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, 2011 [vid. 2020-04-22], Woodhead Publishing Series in Textiles, s. 395–424. ISBN 978-1-84569-695-5. Dostupné z: doi:10.1533/9780857093974.2.395
- [16] FRANCIS, G. W. PIGMENTS | Thin-Layer (Planar) Chromatography☆. In: *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering* [online]. B.m.: Elsevier, 2013 [vid. 2020-04-22]. ISBN 978-0-12-409547-2. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-409547-2.04879-4
- [17] PÜNTENER, ALOIS G., SCHLESINGER, ULRICH. 9 - Natural Dyes. In: H. S. FREEMAN a A. T. PETERS, ed. *Colorants for Non-Textile Applications* [online]. Amsterdam: Elsevier Science, 2000 [vid. 2020-04-22], s. 382–455. ISBN 978-0-444-82888-0. Dostupné z: doi:10.1016/B978-044482888-0/50040-4
- [18] Algae, Phytoplankton and Chlorophyll. *Environmental Measurement Systems* [online]. [vid. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/algae-phytoplankton-chlorophyll/>
- [19] YACOBI, Yosef Z., GITELSON, Anatoly, MAYO, Meir. Remote sensing of chlorophyll in Lake Kinneret using highspectral-resolution radiometer and Landsat TM: spectral features of reflectance and algorithm development. *Journal of Plankton Research*. 1995, **17**(11), 2155–2173.
- [20] BRUNCLÍK, T., DANQUAH, K. a. B. Relativní radiometrická normalizace pro monitoring chlorofylu-a ve vodách pomocí družice Sentinel-2. *Chemické listy*. 2018, **112**(12), 866–869. ISSN 1213-7103.
- [21] CHENG, Chunmei, WEI, Yuchun, LV, Guonian, XU, Ning. Remote sensing estimation of chlorophyll-a concentration in Taihu Lake considering spatial and temporal variations. *Environmental Monitoring and Assessment* [online]. 2019, **191**(2), 84. ISSN 0167-6369, 1573-2959. Dostupné z: doi:10.1007/s10661-018-7106-4
- [22] *Centrum pro cyanobakterie a jejich toxiny - sinice.cz: Co jsou sinice* [online]. [vid. 2020-06-14]. Dostupné z: <http://www.sinice.cz/index.php?pg=o-sinicich>
- [23] GREGOR, J, MARŠÁLEK, B. Freshwater phytoplankton quantification by chlorophyll a: a comparative study of in vitro, in vivo and in situ methods. *Water Research* [online]. 2004, **38**(3), 517–522. ISSN 00431354. Dostupné z: doi:10.1016/j.watres.2003.10.033
- [24] DALEŠICKÝ, J, DESORTOVÁ, B, CHALUPA, J, PITTER, P, ČAPKOVÁ, A, ČERMÁK, O. *ISO ČSN 10260: Jakost vod. Měření biochemických ukazatelů. Spektrofotometrické stanovení koncentrace chlorofylu-a*. únor 1996

- [25] *Norma - Jakost vody - Odběr vzorků - Část 1: Pokyny pro navrhování programů odběru vzorků a technik odběru vzorků ISO 5667-1: 2006* [online]. [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: [/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/vattenkvalitet/allmanna-vattenundersokningar/iso566712006/](https://produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/vattenkvalitet/allmanna-vattenundersokningar/iso566712006/)
- [26] *Katedra geologického inženýrství - HGF VŠB-TUO* [online]. [vid. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.hgf.vsb.cz/541/cs>
- [27] HORÁK, J. *Dálkový průzkum Země* [online]. B.m.: VŠB – TU Ostrava, 2014 [vid. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~hor10/Vyuka/DPZ%20prednasky/DPZ%202014.pdf>
- [28] FUSSELL, Jay, RUNDQUIST, Donald, HARRINGTON, J. A. On defining remote sensing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 1986, **52**(9), 1507–1511.
- [29] PAHLEVAN, N., SARKAR, S., FRANZ, B. A., BALASUBRAMANIAN, S. V., HE, J. Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI) data processing for aquatic science applications: Demonstrations and validations. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2017, **201**, 47–56. ISSN 00344257. Dostupné z: [doi:10.1016/j.rse.2017.08.033](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.08.033)
- [30] MULLER-WILM, U, LOUIS, J, RICHTER, R, GASCON, F, NIEZETTE, M. Sentinel-2 Level 2A Prototype Processor: Architecture, Algorithms And First Results. In: *SA Living Planet Symposium 2013: ESA Special Publication 722* [online]. 2013 [vid. 2016-06-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Ferran_Gascon/publication/273002025_Sentinel-2_Level-2A_Prototype_Processor_Architecture_Algorithms_and_First_Results/links/54f4c2f80cf2eed5d7356e0c.pdf
- [31] LI, Yingjie, CHEN, Jing, MA, Qingmiao, ZHANG, Hankui K., LIU, Jane. Evaluation of Sentinel-2A Surface Reflectance Derived Using Sen2Cor in North America. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* [online]. 2018, **11**(6), 1997–2021. ISSN 1939-1404, 2151-1535. Dostupné z: [doi:10.1109/JSTARS.2018.2835823](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2835823)
- [32] MAHINY, Abdolrassoul S., TURNER, Brian J. A Comparison of Four Common Atmospheric Correction Methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* [online]. 2007, **73**(4), 361–368. ISSN 00991112. Dostupné z: [doi:10.14358/PERS.73.4.361](https://doi.org/10.14358/PERS.73.4.361)
- [33] LIANG, Shunlin. Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery—Part I: Methods. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*. 2001, **39**(11), 9.
- [34] HAGOLLE, O. MACCS/MAJA, how it works – Séries Temporelles. *multitemp* [online]. 17. listopad 2015 [vid. 2020-02-11]. Dostupné z: <https://labo.obs-mip.fr/multitemp/maccs-how-it-works/>
- [35] PEREIRA-SANDOVAL, Marcela, RUESCAS, Ana, URREGO, Patricia, RUIZ-VERDÚ, Antonio, DELEGIDO, Jesús, TENJO, Carolina, SORIA-PERPINYÁ, Xavier, VICENTE, Eduardo, SORIA, Juan, MORENO, José. Evaluation of Atmospheric Correction Algorithms over Spanish Inland Waters for Sentinel-2 Multi Spectral Imagery

- Data. *Remote Sensing* [online]. 2019, **11**(12), 1469. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs11121469
- [36] DUAN, Hongtao, ZHANG, Yuanzhi, ZHANG, Bai, SONG, Kaishan, WANG, Zongming. Assessment of Chlorophyll-a Concentration and Trophic State for Lake Chagan Using Landsat TM and Field Spectral Data. *Environmental Monitoring and Assessment* [online]. 2006, **129**(1–3), 295–308. ISSN 0167-6369. Dostupné z: doi:10.1007/s10661-006-9362-y
- [37] NAZEER, Majid, NICHOL, Janet E. Selection of atmospheric correction method and estimation of Chlorophyll-a (Chl-a) in coastal waters of Hong Kong. In: *2014 3rd International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA): 2014 Third International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA)* [online]. Changsha, China: IEEE, 2014, s. 374–378 [vid. 2020-05-15]. ISBN 978-1-4799-4184-1. Dostupné z: doi:10.1109/EORSA.2014.6927916
- [38] PEREIRA-SANDOVAL, Marcela, RUIZ-VERDÚ, Antonio, TENJO, Carolina, DELEGIDO, Jesús, URREGO, Patricia, PENA, Ramón, VICENTE, Eduardo, SORIA, Juan, SORIA, Javier, MORENO, José. Calibration and Validation of Algorithms for the Estimation of Chlorophyll-A in Inland Waters with Sentinel-2. In: *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. B.m.: IEEE, 2018, s. 9276–9279.
- [39] PAHLEVAN, Nima, SMITH, Brandon, SCHALLES, John, BINDING, Caren, CAO, Zhigang, MA, Ronghua, ALIKAS, Krista, KANGRO, Kersti, GURLIN, Daniela, HÀ, Nguyễn, MATSUSHITA, Bunkei, MOSES, Wesley, GREB, Steven, LEHMANN, Moritz K., ONDRUSEK, Michael, OPPELT, Natascha, STUMPF, Richard. Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2020, 111604. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2019.111604
- [40] O'REILLY, John E., WERDELL, P. Jeremy. Chlorophyll algorithms for ocean color sensors - OC4, OC5 & OC6. *Remote Sensing of Environment* [online]. 2019, **229**, 32–47. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2019.04.021
- [41] MOSES, W.J., GITELSON, A.A., BERDNIKOV, S., POVAZHNYI, V. Satellite Estimation of Chlorophyll-a Concentration Using the Red and NIR Bands of MERIS—The Azov Sea Case Study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* [online]. 2009, **6**(4), 845–849. ISSN 1545-598X, 1558-0571. Dostupné z: doi:10.1109/LGRS.2009.2026657
- [42] TOMING, Kaire, KUTSER, Tiit, LAAS, Alo, SEPP, Margot, PAAVEL, Birgot, NÕGES, Tiina. First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote Sensing* [online]. 2016, **8**(8), 640. Dostupné z: doi:10.3390/rs8080640
- [43] KEINER, Louis E., YAN, Xiao-Hai. A Neural Network Model for Estimating Sea Surface Chlorophyll and Sediments from Thematic Mapper Imagery. *Remote Sensing of Environment* [online]. 1998, **66**(2), 153–165. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/S0034-4257(98)00054-6

- [44] RUESCAS, Ana, HIERONYMI, Martin, MATEO-GARCIA, Gonzalo, KOPONEN, Sampsa, KALLIO, Kari, CAMPS-VALLS, Gustau. Machine Learning Regression Approaches for Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) Retrieval with S2-MSI and S3-OLCI Simulated Data. *Remote Sensing* [online]. 2018, **10**(5), 786. ISSN 2072-4292. Dostupné z: doi:10.3390/rs10050786
- [45] LARY, David J., ALAVI, Amir H., GANDOMI, Amir H., WALKER, Annette L. Machine learning in geosciences and remote sensing. *Geoscience Frontiers* [online]. 2016, **7**(1), Special Issue: Progress of Machine Learning in Geosciences, 3–10. ISSN 1674-9871. Dostupné z: doi:10.1016/j.gsf.2015.07.003
- [46] GATTI, A, NAUD, C. *Sentinel-2 Products Specification Document*. 14.3. France: Thales Alenia Space, 2017.
- [47] XU, Hanqiu. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* [online]. 2006, **27**(14), 3025–3033. Dostupné z: doi:10.1080/01431160600589179