KARLOVA UNIVERZITA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie

URČOVÁNÍ DRUHŮ OBLAČNOSTI Z DRUŽICOVÝCH RADIOMETRICKÝCH MĚŘENÍ

Diplomová práce

DETERMINATION OF CLOUD TYPES FROM SATELLITE RADIOMETRIC MEASUREMENTS

Master degrese thesis

Lukáš OPAT

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jan Kolář, CSc.

Konzultant práce: Mgr. Jindřich Šťástka

Praha, září 2011

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci s názvem „Určování druhů oblačnosti z družicových radiometrických měření“ vypracoval samostatně na základě vlastních zjištění a s použitím řádně citovaných pramenů a uvedených datových zdrojů.

Jsem si vědom toho, že případné použití výsledků práce mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze se souhlasem této univerzity.

Svoluji, aby byla práce zapůjčena ke studijním účelům, a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Praze dne 29. srpna 2011 ……

Lukáš OPAT

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Doc. Ing. Janu Kolářovi, CSc. za odborné vedení mé diplomové práce, jeho cenné rady, připomínky a věnovaný čas. Díky patří i Mgr. Jindřichu Šťástkovi za jeho odborný dohled nad zpracováním diplomové práce a konzultace v oblasti využití dálkového průzkumu Země v meteorologii. Největší díky však patří mé rodině za podporu a trpělivost během celé doby mého studia.

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na analýzu a případné úpravy metod a postupů, které umožňují stanovení různých druhů oblačnosti pomocí satelitních dat. Dnes jsou hlavní metody soustředěny kolem dvou nejpoužívanějších mezinárodních projektů, z nichž jeden byl vyvinut pro přístroje MODIS umístěné na palubě amerických družic Terra, Aqua na polární dráze, a druhý byl vyvinut pro přístrojový komplex SEVIRI na evropské geostacionární družici Meteosat. Na základě těchto modelů byly vytvořeny algoritmy pro automatické určování několika druhů oblačnosti v provozním režimu. Americký program MODIS Atmosphere byl vytvořen v NASA a evropský program NWC SAF byl vyvinut organizací EUMETSAT.

Obsah práce se orientuje na výzkum toho, jak vstupní parametry ovlivňují konečný výsledek rozpoznání oblačnosti v obou modelech, a jak jsou výsledky závislé na vnějších meteorologických a geografických podmínkách, za kterých data byla pořízena. Pozornost bude soustředěna na identifikaci hlavních nedostatků ve dvou modelech, určení podmínek, kdy je omezeno jejich použití, kdy jsou jejich výsledky odlišné a navrhnout případné změny na zmírnění jejich nedostatků. Analýza bude využívat pozemní data a vlastní připravený optimální postup validace zpracování družicových dat. K práci budou použity dostupné soubory družicových dat z přístrojů SEVIRI a MODIS získané nad územím Evropy.

Klíčová slova:

druh oblačnosti, NWC SAF, MODIS Atmosphere, dálkový průzkum Země

ABSTRACT

The thesis is focused on analysis and possible modifications of methods and procedures allowing the determination of various cloud types using the satellite data. Today, the main methods are concentrated around two the most applied international projects, one being developed for the instrument MODIS on board American Terra and Aqua polar satellites, and the other one being developed for the instrument SEVIRI on the European geostationary satellite Meteosat. The algorithms used for automatic discrimination of several cloud types operationally are created on these models. The American program MODIS Atmosphere have been created by NASA and the European program NWC SAF have been developed by organization EUMETSAT.

Content of the thesis is to specify how input parameters influence final result of cloud determination in both models, and how results are depending on the external meteorological and geographical conditions during data acquisition. The effort will be given to identification of main drawbacks at two models and to identify conditions when their respective application is limited, their results different and to make steps towards possible modifications to mitigate the drawbacks. The analysis will use ground data and optimal developed procedure for validation of satellite data processing. The accessible satellite data acquired over Europe by both SEVIRI and MODIS sensor will be use for the study.

Keywords:

Cloud Types, NWC SAF, MODIS Atmosphere, Remote Sensing

OBSAH

OBSAH 7

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK 10

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ 13

1 ÚVOD 15

2 OBLAČNOST 19

2.1 ZÁKLADNÍ TERMINOLOGIE 19
2.2 DRUHY OBLAČNOSTI A JEJICH CHARAKTERISTIKY 20

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY 26

3.1 DRUŽICOVÁ POZOROVÁNÍ OBLAČNOSTI 26
3.2 DETEKCE OBLAČNOSTI 28
3.2.1 INDEXY 28
3.2.2 TESTY 29
3.3 URČOVÁNÍ DRUHŮ OBLAČNOSTI 29
3.3.1 OPTICKÁ DATA 29
3.3.1.1 ISCCP 29
3.3.1.2 Pixel-scale Algorithm 31
3.3.2 RADAROVÁ DATA 32
3.3.2.1 Precipitating Cloud Algorithm 32
3.3.2.2 CloudSat/CALIPSO 33

4 DRUŽICOVÁ POZOROVÁNÍ OBLAČNOSTI 36

4.1 DRUŽICOVÉ SYSTÉMY POUŽÍVANÉ PRO METEOROLOGICKÉ ÚČELY 36
4.1.1 DRUŽICE MSG A RADIOMETR SEVIRI 37
4.1.2 DRUŽICE TERRA, AQUA A RADIOMETR MODIS 39

4.2 MULTISPEKTRÁLNÍ CHARAKTERISTIKY OBLAČNOSTI 40
4.2.1 ZÁKLADY MULTISPEKTRÁLNÍ INTERPRETACE 40
4.3 MOŽNOSTI DETEKCE A URČOVÁNÍ DRUHŮ OBLAČNOSTI 43
4.3.1 NWC SAF 43
4.3.1.1 Cloud Mask 44
4.3.1.2 Cloud type 46
4.3.1.3 Cloud Top Temperature and Height 48
4.3.2 MODIS ATMOSPHERE 50
4.3.2.1 Cloud Mask 50
4.3.2.2 Cloud Product 52

5 DATA A METODY ZPRACOVÁNÍ DRUŽICOVÝCH DAT 55

5.1 POSTUP PRÁCE 55
5.2 POUŽITÁ DATA A SOFTWARE 57
5.3 METODIKA 59
5.3.1 VÝBĚR DAT 59
5.3.2 PŘEDZPRACOVÁNÍ DAT 60
5.3.2.1 Kalibrace 61
5.3.2.2 Georeference 62
5.3.2.3 Ztotožnění 65
5.3.3 KORELACE DAT 66
5.3.4 KLASIFIKACE DRUHŮ OBLAČNOSTI 68
5.3.5 VALIDACE S POZEMNÍMI MĚŘENÍMI 77

6 VÝSLEDKY A DISKUZE 79

6.1 GEOREFERENCE A ZTOTOŽNĚNÍ 79
6.2 KORELACE 82
6.3 KLASIFIKACE 86
6.4 VALIDACE S POZEMNÍMI MĚŘENÍMI 92

7 ZÁVĚR 96

SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ A LITERATURY 99

SEZNAM PŘÍLOH.....103

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

AEMet	*Spanish weather service*
Aqua (EOS PM-1)	*Earth Observing System Post Meridiem*
AVHRR	*Advanced Very High Resolution Radiometer*
BT	*Brightness Temperature*
CALIPSO	*The Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation*
CDP	*Cloud Data Product*
CF	*Cloud Fraction*
CI	*Cloud Index*
CIRT	*Cirrus Test*
CMa	*Cloud Mask*
CMLI	*Cloud Multi Layered Identification*
COT	*Cloud Optical Thickness*
CP	*Cloud Product*
CPD	*Cloud Phase Determination*
CPI	*Cloud Phase Infrared*
CPP	*Centrální Předpovědní Pracoviště*
CT	*Cloud Type*
CTH	*Cloud Top Height*
CTP	*Cloud Top Pressure*
CTT	*Cloud Top Temperature*
CTTH	*Cloud Top Temperature and Height*
CWP	*Cloud Water Path*
ČHMÚ	*Český hydrometeorologický ústav*
DEM	*Digital Elevation Model*
DN	*Digital Number*
ENVI	*Environment for Visualizing Images*
EOS	*Earth Observing System*
EUMETSAT	*European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites*
FOV	*Field Of View*
GCP	*Ground Control Points*
GEO	*Geostationary Earth Orbit*

GEOS	*Geostationary Satellite View*
HDF	*Hierarchical Data Format*
HEO	*High Earth Orbit*
HHO	*Horní hranice oblačnosti*
HRIT	*High Rate Information Transmission*
HRPT	*High Resolution Picture Transmission*
HRV	*High Resolution Visible*
INM	*Instituto Nacional de Meteorologia*
IR	*Infrared channel*
ISCCP	*International Satellite Cloud Climatology Project*
ITT	*International Telephone & Telegraph*
KAGAK	*Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie*
LEO	*Low Earth Orbit*
LRIT	*Low Rate Information Transmission*
LWP	*Liquid water path*
MEO	*Medium Earth Orbit*
MFG	*Meteosat First Generation*
MODIS	*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
MSG	*Meteosat Second Generation*
NCSA	*National Center for Supercomputing Applications*
NIR	*Near Infrared channel*
NWC SAF	*Satellite Applications Facility in Nowcasting*
NWP	*Numerical weather prediction*
OSgeo	*The Open Source Geospatial Foundation*
OT	*Optical Thickness*
PC	*Principal Component*
RMSE	*Root Mean Square Deviation*
ROI	*Regions of Interest*
RTTOV	*Radiative Transfer Code*
SEVIRI	*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*
SHMI	*Swedish weather service*
Terra (EOS AM-1)	*Earth Observing System Ante Meridiem*

UTC	*Universal Coordinated Time*
UTM	*Universal Transverse Mercator*
VISSR	*Visible and Infrared Spin Scan Radiometer*
VLB	*Vlícovací bod*
VSFR	*Very Short-Range Forecasting*
WCRP	*World Climate Research Programme*
ZAMG	*Austrian weather service*

SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obrázky:

Obrázek 1: Rozdělení druhů oblačnosti podle výškových pater 21
Obrázek 2: ISCCP klasifikace druhů oblačnosti..... 30
Obrázek 3: Množství denního výskytu druhu oblak (Cu) vypočtený produktem CP..... 31
Obrázek 4: Vývojový diagram algoritmu Pixel-scale 31
Obrázek 5: Cirrus Test (CIRT) pro přiřazení pixelů do kategorie Cloud type A..... 32
Obrázek 6: Vývojový diagram algoritmu Precipitating Cloud..... 32
Obrázek 7: Validace určování druhů oblačnosti algoritmu CloudSat/CALIPSO, ISCCP a Surface..... 35
Obrázek 8 Grafické znázornění zpracovatelského postupu 56
Obrázek 9: Rozložení vlícovacích bodů (VLB) využitých pro ztotožnění dat 66
Obrázek 10: Rozhodovací algoritmus pro určování druhů oblačnosti z dat MODIS Atmosphere 74
Obrázek 11: Masky zemského povrchu, oceánů a moří a pobřeží nad územím Evropy..... 75
Obrázek 12: Testovací plochy pro určení přesnosti klasifikace..... 76
Obrázek 13: Ukázka SYNOP zprávy vizualizované do mapové podoby..... 78
Obrázek 14: Vizuální porovnání klasifikace dat MODIS Atmosphere a SYNOP mapy..... 93

Tabulky:

Tabulka 1: Charakteristiky druhů oblačnosti podle výše uvedených studií 24
Tabulka 2: Charakteristiky druhů oblačnosti odvozené z různých studií 33
Tabulka 3: Parametry pro určování druhů oblačnosti algoritmem CloudSat/CALIPSO 34
Tabulka 4: Validace určování druhů oblačnosti algoritmu CloudSat/CALIPSO, ISCCP a Surface..... 35
Tabulka 5: Spektrální kanály radiometru SEVIRI 38
Tabulka 6: Spektrální kanály radiometru MODIS vhodné pro výzkum oblačnosti..... 39
Tabulka 7: Spektrální kanály radiometru SEVIRI pro úspěšný výpočet produktu CMa..... 45
Tabulka 8: Hlavní výstup produktu CMa 45
Tabulka 9: Spektrální kanály radiometru SEVIRI pro úspěšný výpočet produktu CT 46
Tabulka 10: Hlavní výstup produktu CT..... 47
Tabulka 11: Rozřazení druhů oblačnost produktu CT do kategorií pro validaci s interaktivní databází48
Tabulka 12: Výsledek hodnocení přesnosti produktu CT 48
Tabulka 13: Spektrální kanály radiometru SEVIRI pro úspěšný výpočet produktu CTTH..... 49

Tabulka 14: Hlavní výstup produktu CTTH 50
Tabulka 15: Vstupy pro úspěšný výpočet produktu CMa 51
Tabulka 16: Výstupy produktu CMa 52
Tabulka 17: Vstupy pro úspěšný výpočet produktu CP 53
Tabulka 18: Výstupy produktu CP 53
Tabulka 19: Pořízená data v rámci diplomové práce 57
Tabulka 20: Zpracovaná data v rámci diplomové práce 60
Tabulka 21: Vybrané kanály produktu CP pro klasifikaci druhů oblačnosti 69
Tabulka 22: Zástupné znaky různých druhů oblačnosti v SYNOP zprávách 77
Tabulka 23: Hodnocení přesnosti georeference dat SAFNWC a MODIS Atmosphere 80
Tabulka 24: Hodnocení přesnosti ztotožnění dat SAFNWC a MODIS Atmosphere 80
Tabulka 25: Hodnocení vzájemného vztahu produktů CTP, CTT 82
Tabulka 26: Rovnice lineární regrese a míry spolehlivosti 84
Tabulka 27: Hodnocené přesnosti klasifikátoru Decision Tree 87
Tabulka 28: Kontingenční tabulka klasifikátoru Decision Tree 88
Tabulka 29: Hodnocené přesnosti klasifikátoru K-means 88
Tabulka 30: Kontingenční tabulka klasifikátoru K-means 89
Tabulka 31: Hodnocené přesnosti klasifikátoru Mahalanobis a Minimum Distance 90
Tabulka 32: Kontingenční tabulka klasifikátoru Mahalanobis Distance 91
Tabulka 33: Vyhodnocení úspěšnosti jednotlivých klasifikátorů 92
Tabulka 34: Legenda pro porovnání druhů oblačnosti z dat SYNOP a CT 94

Grafy:

Graf 1: Histogram průběhu spektrálních hodnot tlaku velmi nízké stratiformní oblačnosti 71
Graf 2: Histogram průběhu spektrálních hodnot teploty velmi nízké stratiformní oblačnosti 71
Graf 3: Závislost produktů CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$ s lineárním trendem v datech 83
Graf 4: Závislost produktů CTT_{SAFNWC} x $CTT_{MODIS\ Atmosphere}$ s lineárním trendem a ukázkou anomálií 84
Graf 5: Závislost produktů CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$ ovlivněný velkým počtem anomálií 85
Graf 6: Závislost produktů CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$ ovlivněný velkým počtem anomálií 86

1 ÚVOD

Oblačnost (angl., *cloudiness*) je významným meteorologickým a klimatologickým prvkem, který je definován svým typem, odrůdou, mikrofyzikální fází (voda/led), propustností apod. S postupným technologickým vývojem družic a jimi nesených pozorovacích přístrojů se zlepšovaly a rozšiřovaly i možnosti zkoumání oblačnosti. V současné době, kdy dochází na Zemi k náhlým přírodním katastrofám a výrazným změnám globálního klimatu, je sledování chování a určování druhů oblačnosti tvořených částicemi vody (nízká a střední oblaka) nebo ledu (střední a vysoká oblaka) ještě o to důležitější.

Výzkum oblačnosti a jejích různých charakteristik byl během několika posledních desetiletí prováděn převážně pomocí meteorologických družic pracujících v režimu pasivního snímání slunečního záření (odraženého či rozptýleného), k čemuž bylo využíváno spektrálních pásem viditelného, blízkého infračerveného, nebo tepelného záření. Nespornou výhodou meteorologických družic je to, že umožňují pohled shora a na základě jimi pořízených družicových snímků je možné sledování a analyzování charakteristik horní hranice oblačnosti (HHO), jež jsou výsledkem vnitřních procesů probíhajících uvnitř oblačnosti.

Meteorologických družic pracujících v režimu aktivního snímání v mikrovlnném oboru (radary, lidary) je využíváno převážně pro zjišťování informací o vertikálním složení atmosféry. V současné době (2011) se tyto přístroje uplatňují hlavně v experimentálním či vývojovém sektoru, ale existují předpoklady, že právě těmto pozorovacím technikám bude patřit při monitorování oblačnosti blízká budoucnost (ŘEZÁČOVÁ a kol., 2007).

Hlavním cílem diplomové práce je zhodnocení možností a porovnání přesnosti určení druhů oblačnosti základními produkty vytvořenými v rámci projektů NWC SAF (dále jen SAFNWC) a MODIS Atmosphere družicovými organizacemi EUMETSAT a NASA. Hlavní cíl diplomové práce je z důvodu přehlednosti jednotlivých kroků rozdělen do čtyř menších sekcí výzkumu.

V první sekci diplomové práce je proveden popis všech základních produktů vytvořených v rámci projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere pro určování druhů oblačnosti. Dílčím úkolem této části je identifikace nedostatků a limitů, které určování druhů oblak negativně ovlivňují.

Ve druhé části diplomové práce je uskutečněna analýza vybraných produktů vytvořených v rámci projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere a jejich vzájemné porovnání pro co nejširší spektrum druhů oblačnosti a situací. Podstatné v této části je nalezení a popsání jejich vzájemného vztahu.

Třetí sekce diplomové práce je věnována vytipování druhů oblačnosti a situací, za nichž dochází k selhání těchto vybraných produktů, nebo kdy se výsledky vybraných produktů odvozených z přístrojů SEVIRI a MODIS výrazně liší. Klíčové v této části je poté teoretické nastínění možností, jak se těchto nepřesností vyvarovat a jakými metodami je případně eliminovat.

Posledním část diplomové práce je zaměřena na validaci výsledků s pozemními či jinými měřeními, které ověří přesnost určení druhů oblačnosti.

Určování různých druhů oblačnosti z družicových dat pořízených družicemi Meteosat, Terra a Aqua je prováděno nad územím Evropy. Oblast Evropy je vybrána ze dvou důvodů. První z nich je, že se území „starého kontinentu“ nachází v rozmezí mírného až subtropického pásu, které se vyznačuje určitými typickými druhy oblačnosti ve všech čtyřech ročních obdobích. Druhý důvod je, že družice Meteosat i družice Terra, Aqua, dokáží toto území snímkovat s dostatečným prostorovým rozlišením minimálně jedenkrát denně.

Pro účely diplomové práce jsou využita data ze dvou senzorů. První skupinou jsou data z družice Meteosat nesoucí na své palubě senzor SEVIRI, jejímž provozovatelem je evropská organizace EUMETSAT. Druhou skupinou jsou data z družic Terra, Aqua nesoucí na své palubě senzor MODIS, jejímž vlastníkem je americká organizace NASA.

Snímky z družice Meteosat použité pro potřeby diplomové práce pochází z archivu družicového oddělení Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ), který tyto snímky archivuje pro vlastní potřeby. ČHMÚ dále také poskytlo data zpracovaná programem SAFNWC. Družicová data z nosičů Terra, Aqua stejně jako produkty MODIS Atmosphere jsou volně dostupná na webových stránkách NASA (http://www.nasa.gov/).

Pro účely diplomové práce jsou vybrána družicová data s výskytem nejrůznějších druhů oblačnosti, které byly nad územím Evropy detekovány během roku 2010.

Hlavním programem, ve kterém jsou data zpracovávána a vizualizována, je program ENVI 4.7 vyvíjený společností ITT. Licenci na tento program vlastní ČHMÚ i KAGAK (Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie Univerzity Karlovy). Dalším programem, v němž jsou data zpracovávána a vizualizována, je program ArcGIS 10 vyvíjený společností ESRI. Licenci na tento program vlastní KAGAK. Vedle těchto dvou klíčových programů je dále pro vizualizaci dat z projektu SAFNWC využíván program HDFView 2.7 vyvíjený společností The HDF Group, z jejichž webových stránek je volně dostupný ke stažení. Pro zpracování dat z obou projektů jsou využívány knihovny PROJ.4 a GDAL, které jsou spravované neziskovou organizací OSgeo (The Open Source Geospatial Foundation) a volně dostupné ke stažení z jejich webových stránek (http://www.osgeo.org/).

Diplomová práce je z hlediska přehlednosti rozdělena do tří částí.

První část diplomové práce je rešeršního charakteru a tvoří ji tři kapitoly. První z nich s názvem *Oblačnost* se zabývá fyzicko-geografickým popisem oblačnosti, jejím vzhledem, vývojem a charakteristikami důležitými pro její členění do různých druhů. V následující kapitole s názvem *Současný stav řešené problematiky* je čtenáři poskytnutý popisný přehled o vývoji významných algoritmů pro detekci a určování různých druhů oblačnosti z pohledu družicových pozorování od jeho počátků až do současnosti. Poslední kapitola této části s názvem *Družicová pozorování oblačnosti* popisuje kategorie meteorologických družic důležitých pro výzkum oblačnosti, a dále se zabývá popisem základních produktů vytvořených v rámci projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere.

Druhá část diplomové práce je věnována čistě zpracovatelské části diplomové práce a je dělena také do tří podkapitol. V první z nich *Postup práce* jsou vysvětleny jednotlivé kroky zpracování dat vedoucí ke splnění vytyčených cílu. Následuje podkapitola *Data a software*, ve které přichází na řadu podrobný popis dat a programů použitých pro zpracování práce. Poslední podkapitola nese název Metodika, v níž jsou podrobně nastíněny všechny kroky postupu vlastního zpracování dat.

Třetí část diplomové práce je rozdělena do dvou kapitol. První z nich s názvem *Výsledky a diskuze* je věnována prezentaci výsledků a výstupů ze zpracovatelské části práce ve spojení s jejich komentářem a diskuzí. Druhá kapitola s názvem *Závěr* slouží

k objektivnímu zhodnocení diplomové práce, popisu a vysvětlení toho, čeho se v práci povedlo docílit, čeho naopak ne a uvedení možné vize budoucího výzkumu tohoto tématu.

2 OBLAČNOST

2.1 Základní terminologie

Oblačnost je velice významným meteorologickým a klimatologickým prvkem v atmosféře, který se skládá ze soustavy nepatrných částic vody, ledu a popř. i jiných částic pocházejících z různých typů exhalací, kouře nebo prachu. Vzhled oblačnosti je závislý na jejích charakteristikách (rozměr, forma, struktura, stavba, jas a barva). Tito činitelé jsou pro každý druh oblačnosti specifické a proto je potřeba je brát při jejich popisu v úvahu (SKŘEHOT, 2004).

První pokusy o klasifikaci druhů oblačnosti probíhaly již na přelomu 18. a 19. století a zasloužili se o ně nezávisle na sobě francouzský přírodovědec Jean Baptiste Lamarck a americký meteorolog Luke Howard. Francouzské názvosloví vytvořené Lamarckem se příliš neujalo, zato latinské názvosloví zvolené Howardem svůj úspěch přineslo a začala vznikat první označení druhů oblačnosti. Oblaka vláknitého vzhledu nesla název „Cirrus“, oblaka plošného vzhledu zakrývající převážnou část oblohy „Stratus“ a oblaka se zřejmou vertikální architekturou „Cumulus“. K těmto třem druhům oblačnosti přibyl ještě dešťový mrak s názvem „Nimbus“. Po určité době byla klasifikace zpřesněna i o výškovou informaci na oblaka nízkého, středního „Alto“ a horního „Cirro“ výškového patra.

Z důvodu snazší orientace v problematice různých druhů oblačnosti, které se neustále vyvíjejí a vytvářejí nekonečně rozmanité tvary, byla v Ženevě roku 1965 na základě mezinárodní úmluvy Světové meteorologické organizace zavedena klasifikace typických oblaků, která je dělí podle druhů, tvarů a odrůd. Tato systematická klasifikace umožňuje jednoznačné nezaměnitelné popsání daného oblaku a zavádí jednotný celosvětový systém popisu oblačnosti (SKŘEHOT, 2004).

Mezinárodní klasifikace provedla rozdělení oblak do 10 druhů, jimiž jsou Cirrus (Ci), Cirrocumulus (Cc), Cirrostratus (Cs), Altocumulus (Ac), Altostratus (As), Stratocumulus (Sc), Stratus (St), Nimbostratus (Ns), Cumulus (Cu) a Cumulonimbus (Cb). V rámci diplomové práce bude používáno právě toto latinské názvosloví a zkratky, i když každý z druhů oblačnosti má i své české označení.

2.2 Druhy oblačnosti a jejich charakteristiky

Úkolem této podkapitoly není úplný vyčerpávající fyzicko-geografický popis jednotlivých druhů oblačnosti, ale jsou zde popsány pouze dílčí charakteristiky důležité pro jejich klasifikaci z hlediska družicových pozorování. Čtenáře hledající úplný fyzicko-geografický popis druhů oblačnosti lze odkázat na publikace (SKŘEHOT, 2004; ŘEZÁČOVÁ a kol., 2007) nebo na Atlas oblaků (ATLAS OBLAKŮ, 2005).

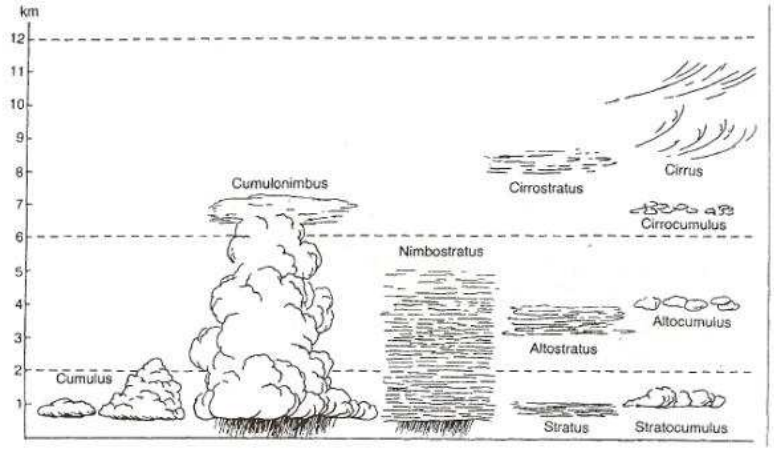
Klasifikací oblaků se rozumí jejich zařazení do klasifikovaných tříd na základě stanovených charakteristik, podle nichž je možné stanovit omezený počet oblačných útvarů, často pozorovatelných ne celé Zemi. Nejčastěji se podle (SKŘEHOT, 2008) při třídění oblaků zohledňují hlediska:

- výška – rozlišení oblačnosti na nízkou, střední, vysokou a oblačnost vertikální prorůstající více výškovými patry,
- složení (fáze) – rozlišení oblačnosti na vodní, smíšenou a ledovou,
- vznik a vývoj – rozlišení oblačnosti na konvektivní, orografickou, apod.,
- vzhled – rozlišení oblačnosti podle druhu, tvaru, odrůd a jiných zvláštností.

1) <u>dělení podle výšky</u>

Hledisko převažující výšky výskytu nad zemským povrchem je velice často využíváno při klasifikacích druhů oblačnosti. Dělení je prováděno do většinou tří výškových pater (nízká, střední a vysoká) a někdy je uváděno i čtvrté patro vertikální (viz obrázek 1).

Obrázek 1: Rozdělení druhů oblačnosti podle výškových pater



Zdroj: DALMACIA, 2011

Řezáčová a kol. 2007 (ŘEZÁČOVÁ a kol., 2007) rozděluje různé druhy oblačnosti podle převažující výšky výskytu nad zemským povrchem do tří výškových pater (nízká, střední a vysoká) viz tabulka 1. Cirovitá oblaka (Ci, Cs, Cc) v tomto rozdělení zařazuje do vysokého patra, druh oblak (Ac) do středního patra a oblaka (St, Sc) do patra nízkého. U ostatních druhů oblačnosti není jejich zařazení úplně jednoznačné. Oblaka (As) se převážně vyskytují ve středním patře, ale často zasahují i do patra vysokého a oblaka (Ns) se pravidelně vyskytují ve středním patře, ale většinou zasahují i do obou dalších pater. Oblaka (Cu, Cb) mají základny v nízkém patře, ale jejich vrcholy mohou zasahovat do patra středního i vysokého (viz obrázek 1).

V rámci projektu ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) vytvořený algoritmus (ROSSOW, SCHIFFER, 1991) klasifikuje druhy oblačnosti také do tří výškových pater (nízká, střední a vysoká). Využívá však na rozdíl od Řezáčová a kol. (2007) druh hluboká konvektivní oblačnost (Deep Convection), která v sobě zahrnuje oblaka (Cb). Oblaka (As, Ns) jsou zde zařazeny do středního patra a oblaka (Cu) do patra nízkého (viz tabulka 1).

Wang a Sassen (2004) používají pro svou klasifikaci určování druhů oblačnosti s využitím tzv. fuzzy logiky[1] (WANG, SASSEN, 2004) dělení druhů oblačnosti také do tří výškových pater (nízká, střední a vysoká), ale na rozdíl od ostatních studií uvádí i kilometrové rozmezí pro jednotlivé výšky (viz tabulka 1).

(WANG, SASSEN, 2007) již uvádějí pro každý druh oblačnosti vlastní kilometrové rozmezí výšky (viz tabulka 1).

2) dělení podle tlaku a teploty

S rostoucí výškou druhů oblačnosti klesá jejich tlak i teplota. Tento fakt je zapříčiněn závislostí tlaku vzduchu na výšce (s výškou klesá sloupec vzduchu, tudíž i tlak) a tlaku vzduchu na teplotě vzduchu (čím chladnější vzduch, tím rychleji klesá jeho tlak). Z tohoto důvodu jsou ve studiích, ve kterých je použité dělení podle výšky, jednotlivým druhům oblačnosti z příslušných výškových pater přiřazeny shodné hodnoty tlaku i teploty.

Studie (ROSSOW, SHIFFER, 1991; CHEN, ROSSOW, ZHANG, 2000) nejčastěji udávají rozmezí hodnot tlaku u vysokých oblak (Ci, Cs, Cc) 50 – 440 hPa, středních oblak (As, Ac, Ns) 440 – 680 hPa, nízkých oblak (St, Sc, Cu) 680 – 1000 hPa a pro oblaka (Cb) 50 – 440 (viz tabulka 1).

Hodnoty teploty jsou nejčastěji podle studií (ROSSOW, SHIFFER, 1991; SASSEN, WANG, 2008) pro vysoká oblaka (Ci, Cs, Cc) udávána do 250 K, střední oblaka (As, Ac, Ns) v rozmezí 253 – 268 K, nízká oblaka (St, Sc, Cu) 258 – 298 K a pro oblaky typu (Cb) 253 – 298 K (viz tabulka 1).

3) dělení podle složení (fáze)

Složení (fáze) je jednou z důležitých charakteristik, která souvisí s výškou a druhem oblačnosti a proto je často používaným hlediskem pro určování druhů oblačnosti.

Skřehot (2004) uvádí složení (fázi) jako možný rozlišovací znak, podle kterého je možné provádět dělení druhů oblačnosti do kategorií vodní, smíšená (voda i led) a ledová

[1] Fuzzy logika vychází z teorie fuzzy množin, v nichž se logické výroky ohodnocují mírou pravděpodobnosti. Na rozdíl od klasické logiky, která využívá pouze dvě logické hodnoty (0 a 1), může fuzzy logika operovat se všemi hodnotami intervalu <0; 1>, kterých je nekonečně mnoho.

(viz tabulka 1). Druhy vysokých oblak (Ci, Cs, Cc) spadají podle (SKŘEHOT, 2004) do kategorie ledová, oblaka (As, Ac, Ns, Cu) jsou zařazena do kategorie smíšená a ostatní (St, Sc, Cb) do kategorie vodní (viz tabulka 1).

Podobné rozdělení využívají ve svém algoritmu i Wang a Sassen (2007), kteří však ještě vedle složení (fáze) oblačnosti uvažují i možnost srážek (WANG, SASSEN, 2007). Jediným rozdílem od Skřehot (2004) je zařazení druhů oblak (Sc) do kategorie smíšená namísto kategorie vodní oblačnosti (viz tabulka 1).

4) dělení podle propustnosti (frakce) a vrstevnatosti

Hledisko propustnosti (frakce) a vrstevnatosti oblačnosti spolu velice úzce souvisejí. Propojenost těchto dvou charakteristik oblačnosti je v tom, že když je oblačnost nepropustná (netransparentní), tak družice nemůže detekovat žádnou jinou vrstvu pod ní, kdežto v případě propustné (transparentní) oblačnosti je detekovatelnost jiné vrstvy možná.

Podle (SKŘEHOT, 2004) jsou vysoká oblaka (Ci, Cs, Cc) transparentní, ale většinou se pod nimi nevyskytuje žádný jiný druh oblačnosti. Střední oblaka (As, Ac) jsou polotransparentní oblačností, pod níž se mohou vyskytovat jiné vrstvy oblačnosti, kdežto oblak (Ns) je netransparentní a nevyskytují se pod ním žádné jiné vrstvy oblačnosti. Nízká oblaka (St, Sc) jsou netransparentní a polotransparentní oblačností, pod nimiž se mohou, ale nemusí vyskytovat jiné vrstvy oblačnosti. Druhy oblačnosti (Cu, Cb) jsou netransparentní, pod níže se můžou, ale nemusí vyskytovat jiné druhy oblačnosti (viz tabulka 1).

Wang a Sassen (2004) pro hledisko frakce (propustnosti) uvádějí i číselné procentuální hodnoty (WANG, SASSEN, 2007). Rozdíl oproti Skřehot (2004) je zařazení oblak (Cc) do kategorie polotransparentní a oblak (As) do kategorie netransparentní oblačnosti (viz tabulka 1).

5) dělení podle optické tloušťky

U určování druhů oblačnosti podle hlediska optické tloušťky se odborné studie velice liší. Hlavním problémem však je fakt, že většina autorů ve svých dílech (ROSSOW, SHIFFER, 1991; ROSSOW, SHIFFER, 1999; CHEN, ROSSOW, ZHANG, 2000; YANG, 2002) neuvádějí jednotky, ve kterých tuto veličinu měřili. Ostatní autoři (WANG, SASSEN, 2004; 2007 a 2008)

pro optickou tloušťku druhů oblačnosti většinou volí kilometrové jednotky nebo je rozdělují do kategorií slabá, střední a silná (viz tabulka 1).

6) dělení podle vodního obsahu

Dělení oblačnosti podle vodního obsahu uvádějí pouze dvě studie (ROSSOW, SHIFFER, 1999; WANG, SASSEN, 2007). Podle Rossow, Schiffer (1999) vodní obsah vysokých oblak (Ci, Cs, Cc) nabývá průměrně 23 $g.m^{-2}$, střední oblaka (As, Ac, Ns) obsahují průměrně 60 $g.m^{-2}$, nízká oblaka (St, Sc, Cu) 51 $g.m^{-2}$ a vertikální oblaka (Cb) 261 $g.m^{-2}$.

Wang, Sassen (2007) zase uvádějí, že vodní obsah vysokých oblak je nulová (pozn. veškerá voda je přeměněna v led), druh oblačnosti (As) může, ale nemusí mít vodní obsah nula a všechny ostatní druhy oblaků mají vodní obsah vyšší než nula (viz tabulka 1).

Tabulka 1: Charakteristiky druhů oblačnosti podle výše uvedených studií

výška (km)	*Ci*	*Cs*	*Cc*	*As*	*Ac*	*Ns*	*St*	*Sc*	*Cu*	*Cb*
ROSSOW, SCHIFFER 1991	vysoké	vysoké	vysoké	střední	střední	střední	nízké	nízké	nízké	vysoké
WANG, SASSEN 2004	vysoké 6 - 14	vysoké 6 - 14	vysoké 6 - 14	střední 2 - 8	střední 2 - 8	střední 2 - 8	nízké 0 - 3	nízké 0 - 3	nízké 0 - 3	vysoké 6 - 14
WANG, SASSEN 2007	> 7	> 7	> 7	2 - 7	2 - 7	0 - 4	0 - 2	0 - 2	0 - 3	0 - 3
ŘEZÁČOVÁ a kol. 2007	vysoké	vysoké	vysoké		střední		nízké	nízké		

tlak (hPa)	*Ci*	*Cs*	*Cc*	*As*	*Ac*	*Ns*	*St*	*Sc*	*Cu*	*Cb*
ROSSOW, SCHIFFER 1991	50 - 440	50 - 440	50 - 440	440 - 680	440 - 680	440 - 680	680 - 1000	680 - 1000	680 - 1000	50 - 440
ROSSOW, SCHIFFER 1999	295a 267a	295a 267a	295a 267a	565a 557a	565a 557a	565a 557a	814a 826a	814a 826a	814a 826a	318a 326a
CHEN, ROSSOW, ZHANG, 2000	50 - 440	50 - 440	50 - 440	440 - 680	440 - 680	440 - 680	680 - 1000	680 - 1000	680 - 1000	50 - 440

teplota (K)	*Ci*	*Cs*	*Cc*	*As*	*Ac*	*Ns*	*St*	*Sc*	*Cu*	*Cb*
ROSSOW, SCHIFFER 1999	234a 228a	234a 228a	234a 228a	265a 263a	265a 263a	265a 263a	281a 281a	281a 281a	281a 281a	236a 235a
WANG, SASSEN 2004	studené 193 - 243	studené 193 - 243	studené 193 - 243	střední 233 - 273	střední 233 - 273	střední 233 - 273	teplé 263 - 283	teplé 263 - 283	teplé 263 - 283	studené 193 - 243
WANG, SASSEN 2008	< 250	< 250	< 250	253 - 268	253 - 268	253 - 268	258 - 298	258 - 298	258 - 298	253 - 298

propustnost (%)	*Ci*	*Cs*	*Cc*	*As*	*Ac*	*Ns*	*St*	*Sc*	*Cu*	*Cb*
SKŘEHOT, 2004	tran	tran	tran	polotran	polotran	netran	netran	polotran	polotran	polotran
WANG, SASSEN 2004	tran 0 - 40	tran 0 - 40	polotran 20 - 80	netran 60 - 100	polotran 20 - 80	netran 60 - 100	netran 60 - 100	polotran 20 - 80	polotran 20 - 80	polotran 20 - 80

vrstevnatost ()	*Ci*	*Cs*	*Cc*	*As*	*Ac*	*Ns*	*St*	*Sc*	*Cu*	*Cb*
SKŘEHOT, 2004	ano	ano	ano	1 - 2 vrstvy	1 - 2 vrstvy	ne	ne	ne 1 - 2 vrst-vy	ne 1 - 2 vrst-vy	ne

složení ()	*Ci*	*Cs*	*Cc*	*As*	*Ac*	*Ns*	*St*	*Sc*	*Cu*	*Cb*
SKŘEHOT, 2004	ledová	ledová	ledová	smíšená	smíšená	smíšená	vodní	vodní	smíšená	vodní
WANG, SASSEN, 2007	ledová ne	ledová ne	ledová ne	smíšená ne	smíšená ano	smíšená ano	vodní ano	smíšená ano	smíšená ano	vodní ano

optická tloušťka ()	*Ci*	*Cs*	*Cc*	*As*	*Ac*	*Ns*	*St*	*Sc*	*Cu*	*Cb*
ROSSOW, SCHIFFER 1991	0 - 3,6	3,6 - 23	3,6 - 23	0 - 9,4	0 - 9,4	9,4 - 125	3,6 - 125	0 - 3,6	0 - 3,6	23 - 125
ROSSOW, SCHIFFER 1999	3a 2a	3a 2a	3a 2a	7a 5a	7a 5a	7a 5a	5a 5a	5a 5a	5a 5a	30a 36a
CHEN, ROSSOW, ZHANG, 2000	0 - 3,6	3,6 - 23		3,6 - 23	0 - 3,6	23 - 379	23 - 379	3,6 - 23	0 - 3,6	23 - 379
YANG, 2003	když ledová 0,04 - 50	když ledová 0,04 - 50	když ledová 0,04 - 50	když ledová 0,04 - 50	když vodní 0,05 - 150	když vodní 0,05 - 150	když vod-ní 0,05 - 150	když vod-ní 0,05 - 150	když vod-ní 0,05 - 150	když ledová 0,04 - 50
WANG, SASSEN 2004	úzká 0 - 2	střední 1 - 6	střední 1 - 6	úzká 0 - 2	úzká 0 - 2	silná 4 - 8	střední 1 - 6	úzká 0 - 2	úzká 0 - 2	silná 4 - 8
WANG, SASSEN 2007	úzká	úzká	střední	střední	střední	silná	střední	střední	střední	silná
WANG, SASSEN 2008	1,5 - 2,5					> 4			> 2	> 6

vodní obsah (g.m-2)	*Ci*	*Cs*	*Cc*	*As*	*Ac*	*Ns*	*St*	*Sc*	*Cu*	*Cb*
ROSSOW, SCHIFFER 1999	23a	23a	23a	60a	60a	60a	51a	51a	51a	261a
WANG, SASSEN 2007	0	0	0	~ 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0

Zdroj: vlastní zpracování

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

3.1 Družicová pozorování oblačnosti

Meteorologický výzkum a s ním spojený i výzkum oblačnosti se do třicátých let 20. století omezoval pouze na jevy velkého, tzv. synoptického měřítka (od 1 : 2 500 000 do 1 : 30 000 000). Přibližně od čtyřicátých let 20. století si začali meteorologové uvědomovat, že řada atmosférických poruch subsynoptického měřítka, které předtím připisovali chybám meteorologických dat, souvisí s prokázanými jevy počasí. Významný pokrok ve sledování těchto jevů nastal na konci padesátých a hlavně na počátku šedesátých let, kdy začaly meteorologické družice představovat jeden z nejdůležitějších zdrojů informací moderní meteorologie a začaly umožňovat i výzkum jevů měřítek menších (ŘEZÁČOVÁ a kol., 2007). Výhodou informací z družicových systémů je ta, že se jedná o data velkoplošná, spojitá a také relativně souvislá (v případě geostacionárních družic). Právě to je důvodem, proč se meteorologické družice staly tak rychle hlavním prostředkem pro pozorování a velmi krátké předpovědi (*nowcasting*[2]) jevů v atmosféře.

První experimentální meteorologická družice TIROS-1 (USA) byla vypuštěna na polární oběžnou dráhu v roce 1960. O dalších 6 let později, tedy v roce 1966, byla na geostacionární dráhu, která je dosažitelná výrazně obtížněji než polární, vypuštěna první experimentální meteorologická družice ATS-1 (USA). První evropskou meteorologickou družicí, která byla vypuštěna na geostacionární dráhu, byla až v roce 1977 družice Meteosat-1 (SETVÁK, 2004).

Z důvodu nedokonalosti prvních meteorologických družicových systémů na oběžných drahách Země, bylo jejich úkolem především monitorování oblačnosti v globálním měřítku. S postupným technologickým vývojem senzorů a s rostoucím počtem spektrálních kanálů, přesnějších kalibrací a zlepšováním prostorové i časové rozlišovací schopnosti, vzrůstaly také možnosti využití družicových pozorování pro stanovení různých parametrů horní hranice oblačnosti (HHO). Vedle charakteristik popisujících morfologické vlastnosti oblačnosti (např.

[2] Nowcasting je termín označující detailní analýzu aktuální situace, zpravidla založenou na prostředcích distančního pozorovaní, a následnou velmi krátkou předpověď, zpravidla na 2 až 6 hodin dopředu, dle typu sledovaného meteorologického jevu.

jasová teplota HHO) se postupně začala pozornost zaměřovat na detailní *multispektrální charakteristiky* HHO, které měly za cíl stanovit *mikrofyzikální parametry* oblačnosti.

Již na přelomu 70. a 80. let vznikaly první práce, zabývající se detekcí a klasifikací druhů oblačnosti, sledováním a určováním jejích spektrálních vlastností (LILJAS, 1981). Na konci 80. let začal výzkum směřovat k vytváření různých postupů (algoritmů) pro detekci oblačnosti a určování jejích různých druhů z družicových dat (KARLSSON, LILJAS, 1990). Pro senzor MODIS se začalo s výše zmíněným výzkumem oblačnosti na počátku 90. let (KING et al. 1992) a pro senzor SEVIRI v prvních letech počátku 21. století (SCHMETZ et al. 2002).

Rozvoj družicové meteorologie postupoval symetricky s rostoucím počtem družic na oběžné dráze Země a největší pokrok v určování druhů oblačnosti nastal na počátku nového tisíciletí. Právě během prvních let 21. století se družicové organizace EUMETSAT a NASA rozhodly začít vytvářet pro své družice základní produkty (algoritmické postupy), které měly za cíl automatizovat určování různých druhů oblačnosti z pořízených družicových dat.

Organizace EUMETSAT vytvořila v rámci projektu s názvem NWC SAF (dále jen SAFNWC) několik základních produktů, které se určováním různých druhů oblačnosti zabývají (EUMETSAT: NWC SAF, 2010). Mezi tyto základní produkty patří např. Cloud Mask (detekce oblačnosti), Cloud Type (určování druhů oblačnosti) a Cloud Top Temperature and Height (výpočet tlaku, teploty a výšky oblačnosti). Organizace NASA vyvíjí pro své družice Terra, Aqua podobný projekt MODIS Atmosphere, který obsahuje obdobný balíček produktů (NASA: MODIS Atmosphere, 2011). Prozatím vytvořenými základními produkty jsou Cloud Mask (detekce oblačnosti) a Cloud Product (výpočet tlaku, teploty, výšky a dalších charakteristik oblačnosti).

Motivací pro vytvoření obou projektů a jejich hlavním cílem je přispět ke zlepšení krátkodobé předpovědi a nowcastingu. Organizacemi vytvořené základní produkty mají sloužit především pro asimilaci družicových dat do různých meteorologických předpovědních modelů.

3.2 Detekce oblačnosti

Pro detekci oblačnosti existuje velké množství různých algoritmů a testů. Dalo by se říci, že každá meteorologická družice na oběžné dráze nese na své palubě alespoň jeden senzor, pro který byl již někdy nějaký algoritmus pro detekci oblačnosti vytvořen. Příkladů senzorů, pro které byly tyto algoritmy vytvořeny, je možné uvést hned několik (např. MODIS, SEVIRI, AVHRR, MERIS, AATSR, apod.). Z důvodu zaměření diplomové práce na určování druhů oblačnosti, byl pouze pro ukázku vybrán jeden index (Cloud Index, CI) a dva testy, na kterých jsou stručně popsány základy detekce oblačnosti. Jeden z testů je založený na rozdílu jasových teplot (Brightness Temperature, BT) a druhý na odrazivosti (reflektance, R) ve středním IR pásmu (R IR > R_{min}).

3.2.1 Indexy

Index oblačnosti (Cloud Index, CI)

Index oblačnosti je konstruován pro data ze senzoru AATSR umístěného na družici ENVISAT. Výpočet indexu je založen na faktu, že oblačnost má ve středním infračerveném pásmu (3,7 μm) vysokou odrazivost, kdežto hodnota odrazivosti sněhu se na této vlnové délce blíží 0 (nemusí platit pro druh oblak Cirrus). Z tohoto důvodu se do výpočtu zahrnuje i pásmo tepelné (11 μm), které napomáhá přesnější detekci oblačnosti a jejímu odlišení od sněhové pokrývky (ZELENKOVÁ, 2010). Výpočet indexu oblačnosti je následující:

$$CI = \left(AATSR\,3{,}7\,\mu m - AATSR\,11\right) / \left(AATSR\,3{,}7\,\mu m + AATSR\,11\right)$$

$$CI > CI_{\min}.$$

Nejdříve jsou vypočítány hodnoty indexu oblačnosti (CI) pro všechny pixely a následně jsou tyto hodnoty porovnávány s krajními hodnotami (CI_{min}), které jsou ve většině případů empiricky odvozeny. Problémy indexu mohou nastat na hranicích oblačnosti a povrchů, které leží pod její úrovní nebo také v místech pokrytých stíny oblačnosti. V těchto situacích je potřeba velmi citlivě volit krajní hodnotu CI_{min}.

3.2.2 Testy

BT 11 – BT 3,7

Test BT 11 – BT 3,7 je testem, který se často používá pro detekci oblačnosti a je založen na rozdílu jasových teplot. Jeho výsledky jsou velice podobné výsledkům, kterých se dostává výpočtem indexu oblačnosti (CI), což je zapříčiněno tím, že do výpočtu vstupují shodná spektrální pásma.

R IR > R_{min}

R IR > R_{min} je testem, založeným na faktu, že hodnota odrazivosti ve středním infračerveném pásmu je vyšší než stanovená minimální prahová hodnota odrazivosti (R_{min}). V této části spektra má totiž oblačnost oproti sněhu stále hodnoty odrazivosti relativně vysoké.

3.3 Určování druhů oblačnosti

3.3.1 Optická data

Od poloviny 80. let se určováním různých druhů oblačnosti z družicových snímků zabývalo již mnoho studií, které se snažili vytvořit na základě různých metod postupy (algoritmy), které by dokázaly klasifikovat oblačnost z optických dat.

3.3.1.1 ISCCP

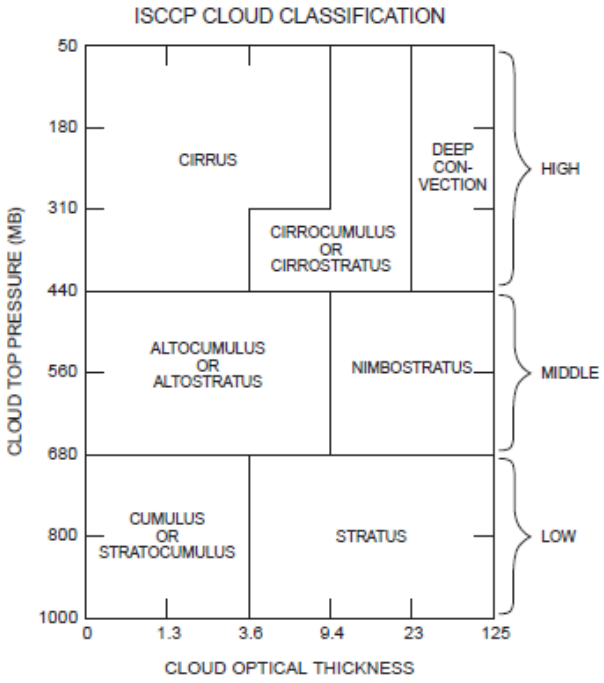
Jeden z prvních algoritmů klasifikujících oblačnost na základě optických dat vznikl v rámci projektu ISCCP. Mezinárodní projekt ISCCP byl spuštěn roku 1983 a stal se prvním programem zabývající se výzkumem zemského klimatu (World Climate Research Programme, WCRP). Jeho součástí byl i výzkum oblačnosti.

Základem projektu byla analýza družicových dat z geostacionárních družic GOES-East, GOES-West, GMS, INSAT a METEOSAT i polárních družic NOAA/Tiros-N a METEOR, která měla posloužit k výzkumu spektrálních vlastností oblačnosti pro možnost modelování jejího efektu na celé zemské klima. Výsledky tohoto výzkumu se staly základem při vývoji a zlepšování algoritmů pro analýzy oblačnosti. Jejich hlavní funkcí bylo z družicového snímku rozhodnout, která z naměřených hodnot přísluší oblačným pixelům a vyvodit z těchto hodnot pro

kategorie oblačnosti (nízká, střední, vysoká a hluboká konvektivní) parametry množství, výšky, teploty a optické tloušťky.

Na základě těchto parametrů byl vytvářen algoritmus CP (Cloud Product), který se mimo jiné zabýval i klasifikací druhů oblačnosti do 10 základních kategorií (viz obrázek 2).

Obrázek 2: ISCCP klasifikace druhů oblačnosti

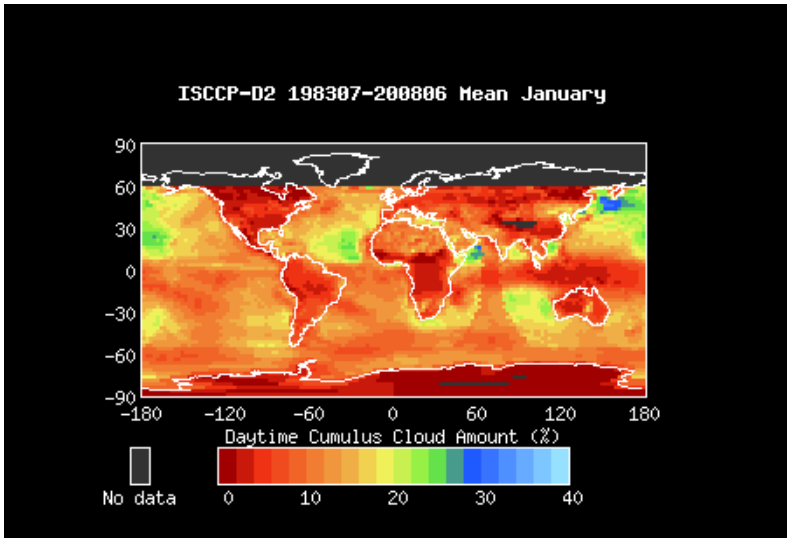


Zdroj: ISCCP, 2011

Klasifikace jednotlivých druhů oblačnosti byla založena na odvozeném tlaku HHO a optické tloušťce, podle nichž byly rozděleny na nízkou, střední a vysokou oblačnost. První tři druhy vysokých oblak (Ci, Cc, Cs) byly definovány výhradně na základě hodnot tlaku (Cloud Top Pressure, CTP), získaných z analýz dat pořízených v infračerveném spektrálním pásmu (IR) během noci, kdežto zbývajících sedm druhů oblačnosti z analýz dat pořízených během dne za pomoci kombinací tlaku (CTP) a optické tloušťky (Cloud Optical Thickness, COT).

Výstup algoritmu CP určovaly množství druhů oblačnosti na území celého světa (viz obrázek 3) v prostorovém rozlišení 280 km a bylo možné je získat v časovém intervalu 3 hodin do roku 2008, kdy byl vývoj tohoto produktu ukončen.

Obrázek 3: Množství denního výskytu druhu oblak (Cu) vypočtený produktem CP

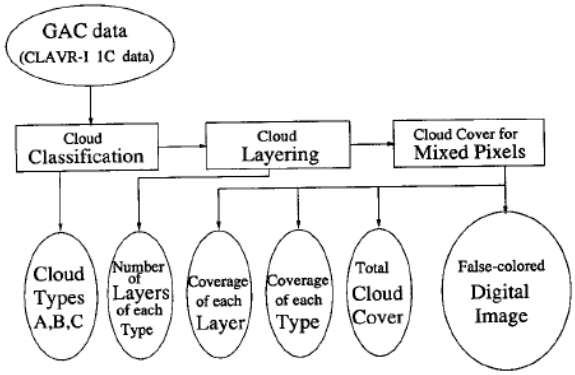


Zdroj: ISCCP, 2011

3.3.1.2 Pixel-scale Algorithm

Další z algoritmů využívající optická data pro určování druhů oblačnosti vznikl v první polovině 90. let a byl vytvořen pro senzor AVHRR (LUO, DAVIS, STOWE, MCCLAIN, 1995). Algoritmus je složen ze tří částí (viz obrázek 4).

Obrázek 4: Vývojový diagram algoritmu Pixel-scale



Zdroj: LUO, DAVIS, STOWE, MCCLAIN, 1995

V první části *Cloud Classification* jsou oddělovány oblačné pixely od bezoblačných a dále shlukovány do tří kategorií (Cloud type A: studené, vysoké a se slabou optickou tloušťkou (např. oblak Ci); Cloud type B: teplé, vodou nasycené a se silnou optickou tloušťkou (např. oblaka St, Sc); Cloud type C: oblaka vznikající hlubokou konvekcí se silnou

optickou tloušťkou (např. As, Ac a Cb)). Ve druhé části *Cloud Layering* dochází ke zkoumání počtu vrstev pixelů ze všech tří kategorií. V případě že se více-vrstevnatost prokáže, tak jsou tyto pixely ve třetí části algoritmu *Cloud Cover for Mixed Pixels* zkoumány jako smíšené. Všechny testy v rámci jednotlivých kroků jsou založeny na prahování hodnot teploty (Kelvin [K]) jasové teploty (T_3 a T_5) v kanálech 3 (3,7 µm) a 5 (12 µm) viz obrázek 5.

Obrázek 5: Cirrus Test (CIRT) pro přiřazení pixelů do kategorie Cloud type A

$$\mathrm{CIRT} = \begin{cases} 0.033, & T_{4,\mathrm{clr}} > 292\ \mathrm{K}; \\ -0.485 + 1.775 \times 10^{-3} T_{4,\mathrm{clr}}, & \\ \qquad 292\ \mathrm{K} \geqslant T_{4,\mathrm{clr}} \geqslant 273\ \mathrm{K}; & \\ 0, & 273\ \mathrm{K} > T_{4,\mathrm{clr}} > 249\ \mathrm{K}. \end{cases}$$

Zdroj: LUO, DAVIS, STOWE, MCCLAIN, 1995

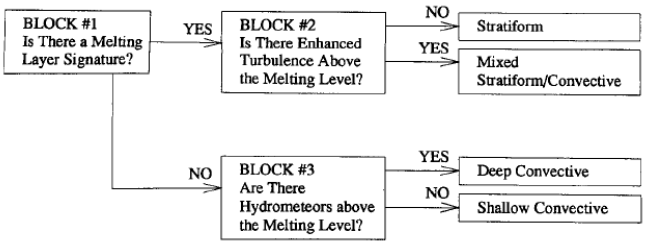
3.3.2 Radarová data

V první polovině 90. let začaly být vytvářeny algoritmy pro určování druhů oblačnosti i na základě klasifikací z radarových dat.

3.3.2.1 Precipitating Cloud Algorithm

Jedním z prvních algoritmů klasifikujících druhy oblačnosti z radarových dat, byl vytvořený odborníky Williams, Ecklund, Gage (1995) a využíval data z družice NOAA. Algoritmus byl vyvíjený pro klasifikaci dešťové oblačnosti do kategorií stratiformní, smíšená stratiformní, konvektivní, hluboká konvektivní a mělká konvektivní oblačnost (viz obrázek 6).

Obrázek 6: Vývojový diagram algoritmu Precipitating Cloud



Zdroj: WILLIAMS, ECKLUND, GAGE, 1995

Základem algoritmu je analýza vertikální struktury odrazivosti, rychlosti a spektrální šířky odvozené z radarových měření (WILLIAMS, ECKLUND, GAGE, 1995).

3.3.2.2 CloudSat/CALIPSO

V březnu roku 2001 byl Wangem a Sassenem z univerzity v Salt Lake City, Utah vytvořen algoritmus určující druhy oblačnosti na základě kombinování radarových, lidarových a optických družicových dat. Ve své studii (WANG, SASSEN, 2001) k tomuto algoritmu, který postupem času neustále vyvíjeli a zdokonalovali, shrnuli základní charakteristiky druhů oblačnosti získané z početných studií (viz tabulka 2).

Tabulka 2: Charakteristiky druhů oblačnosti odvozené z různých studií

Cloud class		Cloud features
High cloud	Base	>7.0 km
	Rain	No
	Horiz. dim.	10^3 km
	Vert. dim.	Moderate
	LWP	=0
As	Base	2.0–7.0 km
	Rain	None
	Horiz. dim.	10^3 km, homogeneous
	Vert. dim.	Moderate
	LWP	~0, dominated by ice
Ac	Base	2.0–7.0 km
	Rain	Virga possible
	Horiz. dim.	10^3 km, inhomogeneous
	Vert. dim.	Shallow or moderate
	LWP	>0
St	Base	0–2.0 km
	Rain	None or slight
	Horiz. dim.	10^2 km, homogeneous
	Vert. dim.	Shallow
	LWP	>0
Sc	Base	0–2.0 km
	Rain	Drizzle or snow possible
	Horiz. dim.	10^3 km, inhomogeneous
	Vert. dim.	Shallow
	LWP	>0
Cu	Base	0–3.0 km
	Rain	Drizzle or snow possible
	Horiz. dim.	1 km, isolated
	Vert. dim.	Shallow or moderate
	LWP	>0
Ns	Base	0–4.0 km
	Rain	Prolonged rain or snow
	Horiz. dim.	10^3 km
	Vert. dim.	Thick
	LWP	>0
Deep convective clouds	Base	0–3.0 km
	Rain	Intense shower of rain or hail possible
	Horiz. dim.	10 km
	Vert. dim.	Thick
	LWP	>0

Zdroj: WANG, SASSEN, 2001

Jako novou érou výzkumu nazvaly Wang a Sassen (2001) použitou metodiku, která se výrazně lišila od dosud aplikovaných postupů. K vytvoření prahovacího algoritmu využili radarových dat z nosičů CALIPSO a CloudSat, který využívá na svém vstupu klasifikačních pravidel vytvořených z výše uvedených charakteristiky vertikálních a horizontálních

vlastností, přítomnosti nebo absence srážek, míru nasycenosti vodou (Liquid water path, LWP) a jasové teploty oblačnosti měřené v infračerveném pásmu (IR). Více o nastavení těchto vstupních charakteristik v disertační práci (WANG, 2000).

Důležitým krokem pro vylepšení algoritmu, kterým byla zmírněna citlivost výsledků na zvolení prahových hodnot, bylo provedení rozšíření klasifikační metody o fuzzy logiku a shlukovou analýzu (WANG, SASSEN, 2004). Došlo také k rozšíření vlastností pro tvorbu klasifikačních pravidel o charakteristiky teploty, složení (fáze), optické tloušťky, propustnosti (frakce), povrchu, srážek a výšky spodní a vrchní vrstvy oblačnosti.

Výsledná podoba algoritmu nakonec využívá jako vstupních dat hodnoty maxima odražené energie (Z_{max}), teploty (T) a dalších speciálních charakteristik (viz tabulka 3).

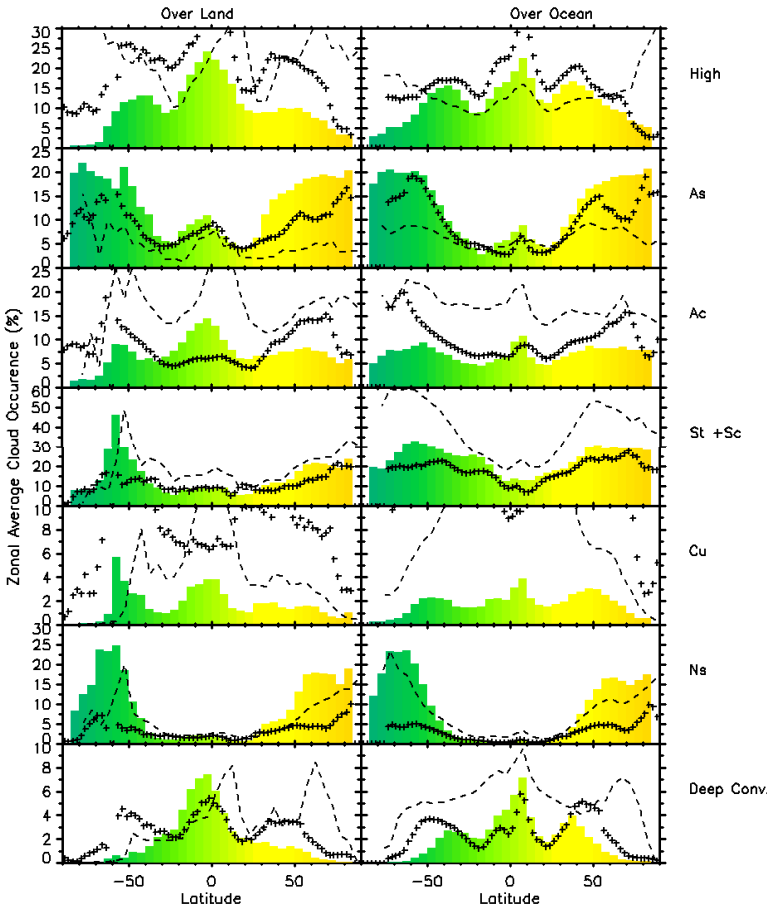
Tabulka 3: Parametry pro určování druhů oblačnosti algoritmem CloudSat/CALIPSO

Type	Z_{max}	Precipitation	Length (km)	Highest Z_{max} frequency	Other
Cirrus	<-3 dBZ, T < -22.5°C	No	2→>1000	-25 dBZ @ -40 °C	
Altostratus	<10 dBZ, -20°< T <-5 °C;	No	50→>1000	-10 dBZ @ -25 °C	
Altocumulus	<0 dBZ, -20° < T <-5 °C;	No	2→ >1000	-25 dBZ @ -10 °C	T_{top} >-35 °C
St	<-5 dBZ, -15°< T <25 °C	Yes/No	50→>1000	-25 dBZ @ 5°C (bright bd)	Altitude of Z_{max} < 2 km
Sc	<-5 dBZ, -15°< T <25 °C	Yes/No	2→ >1000	-25 dBZ @ 5°C (bright bd)	Altitude of Z_{max} < 2 km
Cumulus	< 0dBZ, -5°< T <25 °C	Yes/No	2-25	-25 dBZ @ 15 °C	ΔZ>2 km
Deep (cb)	>-5dBZ, -20° < T < 25 °C	Yes	10-50	10 dBZ @ 5 °C	ΔZ > 6 km
Ns	-10< Z <15 dBZ, -25 ° < T<10 ° C	Yes	>100	+5 dBZ @ 0°C	ΔZ > 4 km

Zdroj: WANG, SASSEN, 2008

Výsledky produktu byly na základě průměrné procentuální detekce různých druhů oblačnosti porovnávány s produktem CP (Cloud Product) projektu ISCCP (viz výše) a pozemními měřeními (viz obrázek 7), z něhož je patrný zvýšený nárůst detekce vysokých oblak (Ci, Cs, Cc) a oblak (As, Sc, Cu) kumulovité oblačnosti oproti produktu CDP, o čemž svědčí i tabulka 4.

Obrázek 7: Validace určování druhů oblačnosti algoritmu CloudSat/CALIPSO, ISCCP a Surface



Zdroj: WANG, SASSEN, 2008

Tabulka 4: Validace určování druhů oblačnosti algoritmu CloudSat/CALIPSO, ISCCP a Surface

Type	CloudSat		Surface		ISCCP	
	Land	Ocean	Land	Ocean	Land	Ocean
High	9.6	10.9	23.1	14.0	19.3	15.6
As	12.7	12.0	4.8	6.50	8.7	9.7
Ac	6.8	6.7	17.2	17.2	8.6	10.2
St+Sc	13.5	22.5	18.9	39.4	10.7	18.3
Cu	1.7	1.7	4.2	9.8	7.7	12.7
Ns	8.6	8.4	6.3	7.9	3.2	3.0
Deep	1.8	1. 9	3.2	5.3	2.5	2.4

Zdroj: WANG, SASSEN, 2008

4 DRUŽICOVÁ POZOROVÁNÍ OBLAČNOSTI

V současné době existuje veliké množství družicových systémů, které podle výšky a charakteru své oběžné dráhy dělíme do kategorií geostacionární (Geostationary Earth Orbit, GEO), vysoká (High Earth Orbit, HEO), střední (Medium Earth Orbit, MEO) a nízká (Low Earth Orbit, LEO). Z meteorologického hlediska jsou však nejvýznamnějšími družicovými systémy GEO a LEO.

4.1 Družicové systémy používané pro meteorologické účely

Prvním z družicových systémů využívaných pro meteorologické účely jsou družice umístěné na geostacionární dráze (GEO) s výškou dráhy nad zemským povrchem okolo 36 000 km. Geostacionární dráha je geosynchronní drahou, jež je umístěna přímo nad zemským rovníkem (rovina oběžné dráhy je totožná s rovinou rovníku), s dobou oběhu rovnou době rotace Země a excentricitou dráhy přibližně nulovou. Těmito podmínkami je zajištěna situace, že družice na oběžné dráze zdánlivě „visí“ nad jedním místem zemského povrchu a je tak umožněno jeho nepřetržitého snímání. V posledních letech mají z evropského hlediska pro meteorologické účely největší význam družice Meteosat, jejímž provozovatelem je evropská organizace EUMETSAT. V současné době se již jedná o druhou generaci družic Meteosat (Meteosat Second Generation, MSG), které jsou vybaveny radiometrem SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager).

Druhým z družicových systémů využívaných pro meteorologické účely jsou družice umístěné na nízkých oběžných drahách (LEO), které jsou někdy označované též jako družice polární, či jako družice umístěné na polárních drahách. Výška dráhy polárních družic se pohybuje mezi 600 až 1250 km, sklon jejich dráhy vůči rovině rovníku (inklinace) se pohybuje v rozmezí 80° - 100° a doba oběhu okolo Země je rovna přibližně 100 minutám (SETVÁK a kol., 2002). Pro meteorologické potřeby mají v současné době veliký význam družice Terra, Aqua, jejichž provozovatelem je americká organizace NASA. Obě družice jsou vybaveny spektroradiometrem MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

4.1.1 Družice MSG a radiometr SEVIRI

Projekt družic MSG (Meteosat Second Generation) se skládá ze čtyř geostacionárních nosičů (MSG-1, -2, -3 a -4), z nichž se zatím na oběžných drahách nacházejí pouze dvě (MSG-1 a MSG-2), které nesou na své palubě radiometr SEVIRI, jenž dokáže snímat zemský povrch ve 12 spektrálních kanálech a poskytuje družicová data potřebná pro operativní předpovědi a podporu klimatických studií (EUMETSAT: MSG, 2011).

Družice MSG jsou svým vzhledem i koncepcí podobná předchozím typům Meteosatu první generace (Meteosat First Generation, MFG). Je charakteristická tvarem válce se stabilizovanou vlastní rotací (100 otáček za minutu), čehož je využito u mechanizmu snímání přístroje SEVIRI. Průměr družice je přibližně 3,2 m a její délka 2,4 m. Rychlost snímání (časová rozlišovací schopnost) je u MSG o polovinu kratší, než tomu bylo u jejich předchůdců, tzn. nový snímek je k dispozici každých 15 minut (SETVÁK, 2004). Družice Meteosat-9 (MSG-2) je v současné době umístěna nad průsečíkem nultého poledníku a rovníku a jejím úkolem je snímání území Afriky, Atlantského oceánu s částí Jižní Ameriky, západní část Indie a většinu Evropy. Stejně jako ostatní geostacionární družice, tak i družice MSG-2, je omezena viditelností do zeměpisné šířky 81°, pro vyšší zeměpisné šířky nelze data z důvodu velmi šikmého úhlu snímání použít. Záložní družice Meteosat-8 (MSG-1) byla na jaře roku 2008 přesunuta na 9,5° východní zeměpisné délky a odstartovala tím snímání severní třetiny Země v 5 minutovém rychlosnímání neboli rapid-scanu (ŘEZÁČOVÁ a kol., 2007).

První družice, Meteosat-8 (MSG-1) byla úspěšně vynesena na svou oběžnou dráhu 28. srpna 2002 raketou Ariane-4 a mezi lety 2004 až 2007 byla tato družice v operativním provozu. Od roku 2007 plní funkci záložní družice pro primární Meteosat-9 (MSG-2), která byla vypuštěna na oběžnou dráhu 21. prosince 2005 raketou Ariane-5 a v operativním provozu je od roku 2006. Start družice MSG-3 je plánován na rok 2012 a MSG-4 na rok 2014 (EUMETSAT: News, 2011).

Nejdůležitějším přístrojem pro výzkum oblačnosti, který družice MSG nesou, je radiometr SEVIRI, jehož spektrální i geometrická rozlišovací schopnost je vyšší než u přístroje VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) používaného pro snímání družicemi MFG. Jedná se v podstatě o zrcadlový dalekohled o průměru primárního zrcadla 0,5 m, jemuž je

podřazeno skenující zrcadlo natočené pod úhlem přibližně 45° (EUMETSAT: SEVIRI, 2011). SEVIRI umožňuje snímání ve 12 spektrálních kanálech, které jsou označovány buď pořadovým číslem, nebo nesou svůj vlastní název (viz tabulka 5). Spektrální kanál HRV (High Resolution Visible) je širokopásmový s rozlišením 1x1 km (pro oblast Evropy přibližně 2x3 km) a ostatních 11 spektrálních kanálů je úzkopásmových mající rozlišení 3x3 km v nadiru (pro oblast Evropy přibližně 4x6 km).

Tabulka 5: Spektrální kanály radiometru SEVIRI

kanál	*rozsah od [µm]*	*rozsah do [µm]*	*hlavní využití*
1	0,580	0,710	povrch, oblačnost, pole proudění
2	0,740	0,880	povrch, oblačnost, pole proudění
3	1,500	1,780	povrch, rozlišení ledové fáze v oblacích
4	3,480	4,360	povrch, oblačnost, pole proudění
5	5,350	7,150	vodní pára, vysoká oblačnost, atmosférická instabilita
6	6,850	7,850	vodní pára, atmosférická instabilita
7	8,300	9,100	povrch, oblačnost, atmosférická instabilita
8	9,380	9,940	ozón
9	9,800	11,800	povrch, oblačnost, pole proudění, atmosférická instabilita
10	11,000	13,000	povrch, oblačnost, atmosférická instabilita
11	12,400	14,400	výška oblak Cirrus, atmosférická instabilita
HRV	0,500	0,900	povrch, oblačnost

Zdroj: SETVÁK a kol., 2002

Skenování zemského povrchu probíhá od jižního pólu k pólu severnímu a od východu na západ. Pro vytvoření jednoho snímku je zapotřebí 1250 otáček družice, po kterých se družice vrací zpět do své původní polohy. Z důvodu, aby bylo docíleno rychlejšího snímání, byly na přístroji SEVIRI pro každý spektrální kanál umístěny v ohniskové rovině tři čidla (kanál HRV jich má devět), což umožňuje snímat tři obrazové řádky během jedné otočky přístroje najednou.

Naskenovaná surová data nemíří po pořízení ihned ke koncovým uživatelům. Nejprve jsou přenesena do řídícího centra organizace EUMETSAT (Darmstadt, Německo), ve kterém je prověřena jejich kvalita a provedeny potřebné korekce. Až poté jsou data distribuována koncovým uživatelům. Digitální přenos dat uživatelským stanicím je možné prostřednictvím vlastní družice nebo pomocí telekomunikační družice uskutečnit dvěma způsoby – pomalejší LRIT (Low Rate Information Transmission) a rychlejší HRIT (High Rate Information Transmission).

4.1.2 Družice Terra, Aqua a radiometr MODIS

Družice Terra, Aqua jsou polárními družicemi, jejichž vlastníkem je americká organizace NASA, nesoucí na své palubě radiometr MODIS, jenž dokáže snímat zemský povrch ve 36 spektrálních kanálech.

Družice Terra, Aqua se pohybují na heliosynchronních kvazipolárních drahách, jejichž výška nad zemským povrchem je okolo 700 km. Z důvodu kvazipolarity oběžné dráhy je doba oběhu družic kolem Země o něco kratší než v případě ostatních polárních družic – necelých 99 minut. Heliosynchronnost spočívá v precesi roviny její oběžné dráhy za jeden rok, což ve výsledku znamená, že oběžná dráha družic je synchronizovaná se sluncem takovým způsobem, že se nachází vždy ve stejný čas na stejném místě. Sklon oběžné dráhy družic Terra a Aqua vůči rovině rovníku činí 98,2° (KNIHOVNA AV ČR: SPACE 40 2011).

Na oběžnou dráhu byla družice Terra vynesena 18. 12. 1999 raketou Atlas IIAS z letecké základny Vandenberg a družice Aqua 4. 5. 2002 raketou Delta II ze stejné letecké základny. Nad územím Evropy prolétá družice Terra přibližně v 11 hodin místního času a družice Aqua okolo 13. hodiny.

Spektroradiometr MODIS je multispektrálním senzorem s prostorovým rozlišením 250 m – 1000 m (závisí na spektrálních kanálech), se šířkou záběru 2230 km a periodou snímání každého místa na Zemi v rozmezí 1 – 2 dní. Jedná se o nástupce radiometru AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) oproti němuž však disponuje lepší rozlišovací schopností i větším počtem spektrálních kanálů. Jelikož však senzor MODIS není prioritně určen pouze pro pozorování a výzkum atmosféry či oblačnosti, tak ne všechny z 36 kanálů jsou pro detekci a určení různých druhů oblačnosti vhodné (viz tabulka 6).

Tabulka 6: Spektrální kanály radiometru MODIS vhodné pro výzkum oblačnosti

kanál	*rozsah od [µm]*	*rozsah do [µm]*	*hlavní využití*
1	0,620	0,670	hranice povrchu, oblačnosti, aerosolů
3	0,459	0,479	vlastnosti povrchu, oblačnosti, aerosolů
4	0,545	0,565	
5	1,230	1,250	
6	1,628	1,652	
7	2,105	2,155	
18	0,931	0,941	vodní páry
20	3,660	3,840	teplota povrchu, oblačnosti

22	3,929	3,989	
23	4,020	4,080	
25	4,482	4,549	teplota atmosféry
26	1,360	1,390	cirovitá oblačnost vodní páry
27	6,535	6,895	
28	7,175	7,475	
29	8,400	8,700	vlastnosti oblačnosti
30	9,580	9,880	ozón
31	10,780	11,280	teplota povrchu, oblačnosti
32	11,770	12,270	
33	13,185	13,485	výška oblačnosti
34	13,485	13,785	
35	13,785	14,085	
36	14,085	14,385	

zdroj: NASA: MODIS Web, 2011

Naskenovaná surová data jsou posílaná uživatelům bez jakýchkoliv úprav. Tento typ přenosu dat je označován jako HRPT (High Resolution Picture Transmission) a je podobný přenosu dat ze senzoru AVHRR družice NOAA. Data jsou přijímána všemi stanicemi, které jsou v okamžiku snímání v zorném poli družice, v reálném čase. Ostatními možnostmi je získání dat pomocí internetu nebo přenosem přes jiné družice.

4.2 Multispektrální charakteristiky oblačnosti

4.2.1 Základy multispektrální interpretace

Družicové snímky pořízené pomocí operativních meteorologických družic nám umožňují monitorovat pouze nejsvrchnější vrstvu oblačnosti (tj. horní hranici oblačnosti, HHO). Pro stanovení základních charakteristik oblačnosti je potřeba využití většího množství spektrálních kanálů meteorologických družic tzn. multispektrální interpretaci snímků. Například kanály spektrálního pásma mezi 1,5 až 4 μm se používají k základnímu odlišení oblačnosti z hlediska jejího složení (fáze), nebo kanály spektrálního pásma 3,5 až 4 μm se nejčastěji využívají pro stanovení mikrofyzikálních charakteristik HHO.

Existuje mnoho publikací zabývajících se základními vztahy fyziky záření, jako jsou například (KOLÁŘ, HALOUNOVÁ, PAVELKA, 1997; HALOUNOVÁ, PAVELKA, 2005), není proto nutné se jimi příliš podrobně zabývat, ale přesto je nutné v rámci diplomové práce pár základních fyzikálních vztahů týkajících se oblačnosti zmínit.

Celkové záření, které družice pomocí svých senzorů měří, se skládá ze dvou složek, a to odraženého (rozptýleného) slunečního záření a emitovaného záření určitých povrchů. Odražené sluneční záření dosahuje vlnových délek viditelného pásma (VIS – 0,38 až 0,72 μm) a blízkého infračerveného pásma (NIR – 0,72 až 1,3 μm). Emitované záření určitých povrchů je charakteristické vyššími vlnovými délkami a dosahuje vlnových délek infračerveného pásma (IR – 0,72 až 25 μm) a mikrovlnného pásma (MW – 0,8 až 100 cm).

Nejdůležitějšími fyzikálními parametry určující vzhled oblačnosti na družicových snímcích v různých vlnových délkách jsou spektrální odrazivost α_λ (tj. odrazivost povrchu v dané vlnové délce λ), spektrální propustnost τ_λ (tj. transmisivita povrchu v dané vlnové délce λ) a spektrální emisivita ε_λ (tj. vyzařovací schopnost povrchu v dané vlnové délce λ). Všechny tyto veličiny jsou většinou vyjadřovány v rozmezí hodnot nula až jedna nebo v procentuální míře. Spektrální odrazivost α_λ rovná nule v dané vlnové délce má za důsledek tmavý povrch. Spektrální propustnost τ_λ rovna nule v dané vlnové délce znamená zcela nepropustnou vrstvu. Někdy se na místo spektrální propustnosti τ_λ využívá pojmu „optická tloušťka (Optical Thickness, OT), která reprezentuje propustnost dané oblačnosti vztaženou k viditelnému záření.

Spektrální emisivita ε_λ vyjadřuje míru efektivity vyzařování *reálného tělesa* od tzv. *černého tělesa*. Je určována vztahem (ŘEZÁČOVÁ a kol., 2007):

$$\varepsilon_\lambda = \frac{\lambda}{B_\lambda(T)}$$

kde λ je intenzita vyzařování reálného tělesa s teplotou T ve vlnové délce λ [W.m^{-2}.sr^{-1}.μm^{-1}] a $B_\lambda(T)$ je intenzita vyzařování černého tělesa ve vlnové délce λ [W.m^{-2}.sr^{-1}.μm^{-1}].

Z důvodu potřeby znalosti přesné hodnoty emisivity určitých druhů oblačnosti nebo zemského povrchu v daném kanálu při družicové interpretaci, je nutné zavedení veličiny jasová teplota (BT). Jedná se o fiktivní teplotu přiřazenou danému povrchu za předpokladu, že by vyzařoval jako *černé těleso* (jeho emisivita by se rovnala jedné). Jasová teplota daného povrchu *BT* je vždy nižší než teplota reálná (termodynamická teplota T). Hodnotu jasové teploty *BT* v dané vlnové délce λ je možné vypočítat z hodnoty naměřené intenzity záření B_λ pomocí tzv. inverzní Planckovy funkce dané vztahem (ŘEZÁČOVÁ a kol., 2007):

$$BT = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{c_1}{\lambda^5 B_\lambda} + 1\right)}$$

kde c_1 je první radiační konstanta, c_2 je druhá radiační konstanta, λ je vlnová délka a B_λ je hodnota spektrálního záření vyzářeného černým tělesem ve vlnové délce λ [$W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$].

Za předpokladu tepelné rovnováhy prostředí (oblačné vrstvy) platí pro odrazivost α_λ, propustnost τ_λ a emisivitu ε_λ tzv. Kirchhoffův vztah (ŘEZÁČOVÁ a kol., 2007):

$$\alpha_\lambda + \tau_\lambda + \varepsilon_\lambda = 1$$

kde α_λ je spektrální odrazivost, je τ_λ spektrální propustnost a ε_λ je spektrální emisivita.

S rostoucí spektrální odrazivostí daného povrchu α_λ a klesajícím zenitovým úhlem ξ (tj. úhlová vzdálenost Slunce od zenitu) se intenzita odraženého slunečního záření v určité vlnové délce zvyšuje. Při nízkých výškách Slunce nad obzorem (tj. vysokém zenitovém úhlu Slunce) a nízkém úhlu snímání družice má dále vliv i charakter rozptylu záření. Velikost emitovaného záření je závislá v dané vlnové délce na teplově daného povrchu *T.* V úseku spektrálního pásma mezi 3,5 až 4 μm je oblast, v níž je obojí záření přibližně rovnocenné. To, která oblast převládne, je dáno různými parametry. V denních hodinách se uplatňuje odražené sluneční záření i tepelná složka a v nočních hodinách pouze tepelné vyzařování.

V pásmu 3,5 až 4 μm může být odrazivost z pohledu velikosti částic v závislosti na fázi částic interpretována následujícími způsoby. V případě stejné velikosti částic mají vodní kapky vyšší odrazivost než ledové částice, ale nejvyšší odrazivosti dosahují částice o velikosti blížící se rozměrem vlnové délce pásma. Čím menší rozměry částic oblačnost tvoří, tím vyšší její odrazivost je.

Horní vrstva nízké a střední oblačnosti je tvořena převážně kapalnými částicemi, kdežto pro vysokou oblačnost jsou charakteristické spíše ledové krystaly. Je proto zřejmé, že ve většině případů bude mít v tomto pásmu větší odrazivost oblačnost tvořená kapalnými částicemi HHO. Existují však i výjimky, kdy je HHO tvořena ledovými krystalky menších rozměrů. V této situaci pak může být odrazivost takovéto oblačnosti srovnatelná s oblačností tvořenou vodními kapkami. V případě výskytu kapek velkých rozměrů v horní vrstvě

oblačnosti bude její odrazivost výrazně menší a může se blížit až odrazivosti ledových krystalků (ŘEZÁČOVÁ a kol., 2007).

4.3 Možnosti detekce a určování druhů oblačnosti

Na konci 20. století se družicové organizace EUMETSAT a NASA rozhodly začít vytvářet základní produkty, které měly za cíl algoritmicky automatizovat určování různých druhů oblačnosti z pořízených družicových dat nosiči MSG a Terra, Aqua.

Družicová organizace EUMETSAT pro své družice MSG do současnosti (rok 2011) vytvořila celkem 16 produktů (týkající se oblačnosti) od její detekce, přes charakteristiku jejího složení (fáze), určení druhů, výpočet výšky, tlaku, teploty, až po rozbor částic nacházejících se na povrchu oblačnosti (EUMETSAT: Atmosphere, 2011). Mezi klíčové produkty v rámci projektu NWC SAF (Satellite Applications Facility in Nowcasting, dále jen SAFNWC) však patří celkem tři produkty (EUMETSAT: NWC SAF, 2011) a těmi jsou Cloud Mask (CMa), Cloud Type (CT) a Cloud Top Temperature and Height (CTTH) a právě tyto produkty budou v rámci diplomové práce analyzovány.

Družicová organizace NASA vytvořila pro své družice Terra, Aqua podobné produkty v rámci projektu MODIS Atmosphere (NASA: MODIS Atmosphere 2011). Prozatím vytvořenými produkty jsou Cloud Mask (CMa) a Cloud Product (CP), které budou v rámci diplomové práci analyzovány a porovnávány.

4.3.1 NWC SAF

V roce 1996 na 29. zasedání rady EUMETSATu bylo dosaženo dohody o spolupráci pro podporu nowcastingu a velmi krátkodobých předpovědí (Very Short-Range Forecasting, VSFR) mezi organizací EUMETSAT a INM (Instituto Nacional de Meteorologia). Projekt odstartoval v únoru roku 1997 a zaměřil se na vytvoření programu využívající data na základě charakteristik geostacionárních družic MSG se senzorem SEVIRI a polárních družic se senzorem AVHRR s názvem NWC SAF (dále jen SAFNWC). Na projektu dále spolupracovaly národní meteorologické ústavy Francie (Metéo-France), Švédska (Swedish weather service, SHMI), Rakouska (Austrian weather service, ZAMG) a Španělka (Spanish weather service, AEMet).

4.3.1.1 Cloud Mask

Cloud Mask (dále jen CMa) je produkt umožňující na družicovém snímku identifikovat oblačné i bezoblačné plochy. Díky produktu CMa mohou být z oblačných ploch pomocí ostatních produktů dále odvozovány např. druhy oblačnosti, jejich výška, tlak či teplota a z bezoblačných ploch např. úhrny vodních srážek, teploty zemského povrchu a oceánů či mapovány sněhové či ledové povrchy.

Hlavním cílem produktu CMa je tedy mapování všech oblačných i bezoblačných pixelů na družicovém snímku s co možná nejvyšší důvěryhodností. Vedlejším cílem produktu je poté poskytování informace o výskytu sněhu, ledu, prachových oblak a vulkanických plynů.

Jasová teplota a odrazivost bezoblačných ploch závisí na jejich typu, atmosférických podmínkách a na pozicích Slunce a družice. Hodnoty těchto veličin se více či méně mění v závislosti na oblačnosti, aerosolech nebo sněhu či ledu. Pixely pokryté oblačností jsou na družicových snímcích často identifikovány, protože se zdají být chladnější (v kanálu 10,8 μm) anebo jasnější (v kanálech 0,6 nebo v 0,8 μm) než bezoblačné plochy. Pro přesnou detekci oblačnosti je proto potřeba analýz jejích spektrálních vlastností.

Algoritmus produktu CMa je založený na multispektrální prahové metodě, v níž je každý pixel snímku porovnáván s prahovými hodnotami, které ohraničují hodnoty jasové teploty nebo odrazivosti bezoblačných pixelů od pixelů oblačných, prachu, sněhu či ledu.

Algoritmus je složen ze dvou procesů. První proces obsahuje sérii testů různých spektrálních kanálů a má za cíl na družicovém snímku identifikovat pixely oblačnosti, sněhu či ledu. Druhý proces pak umožňuje identifikovat prachová oblaka a oblaka vulkanického popela.

Hlavním vstupem produktu CMa jsou družicová data pořízena senzorem SEVIRI, který pro úspěšnost aplikace produktu musí obsahovat kanály (HRV, R0.6μm, R0.8μm, R1.6μm, T3.9μm, T8.7μm, T10.8μm, T12.0μm, T13.4μm), z nichž některé jsou povinné a jiné volitelné (viz tabulka 7).

Tabulka 7: Spektrální kanály radiometru SEVIRI pro úspěšný výpočet produktu CMa

HRV	*R0.6μm*	*R0.8μm*	*R1.6μm*	*T3.9μm*	*T8.7μm*	*T10.8μm*	*T12.0μm*	*T13.4μm*
volitelný	povinný	volitelný	volitelný	povinný	volitelný	povinný	povinný	volitelný

Zdroj: DERRIEN, M., GLÉAU, H., FERNANDEZ, P. 2010

Dále do algoritmu vstupují povinné hodnoty úhlů slunce a družice, které jsou získány z dat na základě zabírané oblasti a charakteristik družice. Dalšími, ale nikoliv však povinnými vstupy, jsou parametry NWP[3] (např. teplota povrchu, teplota vzduchu, celková vodní pára v atmosféře, atd.). Pomocnými povinnými daty jsou atlasy zemského povrchu, oceánů, nadmořských výšek, různé klimatologické výstupy apod..

Hlavním výstupem produktu CMa je rozdělení pixelů vstupního družicového snímku do šesti kategorií z hlediska detekce oblačnosti, sněhu či ledu (viz tabulka 8).

Tabulka 8: Hlavní výstup produktu CMa

0	*žádná data*
1	*bezoblačné*
2	*oblačností kontaminované nebo transparentní*
3	*oblačné netransparentní*
4	*sníh nebo led*
5	*nedefinované*

Zdroj: DERRIEN, M., GLÉAU, H., FERNANDEZ, P. 2010

První nedostatek produktu CMa nastává v době západu slunce (nízká výška nad obzorem), kdy není dostatečně kvalitně detekována nízká oblačnost. Druhým nedostatkem je špatná detekce sněhových ploch v nočních hodinách, kdy může dojít k jejich přiřazení nízké oblačnosti nebo bezoblačným plochám. Třetím nedostatkem je celodenní špatná detekce mraků vulkanického popela. Posledním čtvrtým nedostatkem je provedení detekce prachových mraků pouze v denních hodinách.

[3] NWP (Numerical weather prediction) jsou matematické modely atmosféry a oceánů sloužící k předpovědi počasí založené na stávajících klimatických podmínkách.

4.3.1.2 Cloud type

Produkt Cloud Type (dále jen CT) vyvíjený v rámci projektu SAFNWC slouží hlavně k podpoře nowcastingových aplikací a poskytuje detailní analýzu druhů oblačnosti. Je základním produktem pro generování produktu CTTH a pro identifikaci srážkových oblak.

Hlavním cílem produktu je poskytovat detailní analýzu druhů oblačnosti. Vedlejším cílem je pak rozlišování konvektivní oblačnosti a identifikace druhů oblačnosti vyznačující se vodními kapkami.

Jasová teplota a odrazivost oblačnosti velmi závisí na jejích charakteristikách, jako jsou výška, frakce, složení (fáze) a textura. Všechny tyto charakteristiky jsou ovlivněny atmosférickými podmínkami a pozicí Slunce a družice.

Problém, který algoritmus řeší, je adekvátní určení kombinace spektrálních kanálů SEVIRI, které umožní oddělení druhů oblačnosti prezentujících se různými charakteristikami.

Produkt CT je prahovým algoritmem založeným na využití produktu CMa, spektrálních vlastnostech a textury oblačnosti. Sada prahových testů je aplikována v závislosti na podmínkách osvětlení, pohledové geometrii, geografickém umístění a NWP datech.

Hlavním vstupem produktu CT jsou družicová data pořízena senzorem SEVIRI, který pro úspěšnost aplikace produktu musí obsahovat kanály (R0.6µm, R1.6µm, T3.9µm, T7.3µm, T8.7µm, T10.8µm, T12.0µm), z nichž některé jsou povinné a jiné volitelné (viz tabulka 9).

Tabulka 9: Spektrální kanály radiometru SEVIRI pro úspěšný výpočet produktu CT

R0.6µm	*R1.6µm*	*T3.9µm*	*T7.3µm*	*T8.7µm*	*T10.8µm*	*T12.0µm*
povinný	volitelný	povinný	volitelný	volitelný	povinný	povinný

Zdroj: DERRIEN, M., GLÉAU, H., FERNANDEZ, P. 2010

Povinným a důležitým vstupem je produkt CMa. Dále do algoritmu vstupují povinné hodnoty úhlů slunce a družice, které si produkt CT sám vypočítá na základě zabírané oblasti a charakteristik družice. Dalšími, ale nikoliv však povinnými vstupy, jsou parametry NWP (např. teplota povrchu, teplota vzduchu, celková vodní pára v atmosféře, atd.). Pomocnými povinnými daty jsou atlasy zemského povrchu, oceánů, nadmořských výšek, různé klimatologické výstupy apod..

Hlavním výstupem produktu CT je klasifikace družicového snímku do 21 kategorií různých druhů oblačnosti poskytované v 5bitové hloubce (viz tabulka 10).

Tabulka 10: Hlavní výstup produktu CT

0	*žádná data*
1	*zemský povrch*
2	*oceán nebo moře*
3	*zemský povrch kontaminovaný sněhem*
4	*oceán nebo moře kontaminované sněhem nebo ledem*
5	*velmi nízká kumuliformní oblačnost*
6	*velmi nízká stratiformní oblačnost*
7	*nízká kumuliformní oblačnost*
8	*nízká stratiformní oblačnost*
9	*střední kumuliformní oblačnost*
10	*střední stratiformní oblačnost*
11	*vysoká netransparentní kumuliformní oblačnost*
12	*vysoká netransparentní stratiformní oblačnost*
13	*velmi vysoká netransparentní kumuliformní oblačnost*
14	*velmi vysoká netransparentní stratiformní oblačnost*
15	*vysoká úzká transparentní oblačnost*
16	*vysoká středně silná transparentní oblačnost*
17	*vysoká silná transparentní oblačnost*
18	*vysoká transparentní oblačnost nad nízkou nebo střední*
19	*frakční oblačnost*
20	*nedefinované*

Zdroj: DERRIEN, M., GLÉAU, H., FERNANDEZ, P. 2010

Prvním nedostatkem je častá klasifikace druhů oblak Cirrus do kategorie frakční oblačnosti. Druhým nedostatkem je možná klasifikace velmi nízké oblačnosti do kategorie střední oblačnosti v případě silné teplotní inverze. Třetím a posledním nedostatkem je klasifikace nízké oblačnosti, nad níž se vyskytují druhy oblak Cirrus do kategorie střední oblačnosti.

Produkt CT bude ve zpracovatelské části využitý jako referenční podklad pro porovnávání s klasifikacemi druhů oblačnosti z dat MODIS Atmosphere, proto je nutné zde uvést jeho přesnost.

Ověření přesnosti produktu CT bylo zkoumáno nad územím Evropy a přilehlých moří. Jako referenční data byla využita interaktivní databáze různých druhů oblačnosti a povrchů odvozená z dat družice MSG-1 mezi lety 2003 – 2005 (EUMETSAT: Validation Report for

Cloud Products, 2011). Pro validaci byly zvoleny kategorie oceány a moře, zemský povrch, led, sníh, nízká oblačnost, střední oblačnost, transparentní oblačnost a vysoká oblačnost, do kterých byly zařazovány příslušné kategorie z interaktivní databáze a produktu CT, aby bylo možné provést jejich porovnání (viz tabulka 11).

Tabulka 11: Rozřazení druhů oblačnost produktu CT do kategorií pro validaci s interaktivní databází

Hlavní třída	***CT třída***
Oceán a moře	nekontaminovaný oceán nebo moře
Zemský povrch	nekontaminovaný zemský povrch
Led	oceán a moře kontaminované ledem
Sníh	zemský povrch kontaminovaný sněhem
Nízká oblačnost	velmi nízká a nízká oblačnost
Střední oblačnost	střední oblačnost
Transparentní oblačnost	vysoká transparentní slabá oblačnost vysoká transparentní středně silná oblačnost vysoká transparentní silná oblačnost vysoká transparentní oblačnost nad nízkými nebo středními oblaky
Vysoká oblačnost	vysoká netransparentní oblačnost velmi vysoká netransparentní oblačnost

Zdroj: EUMETSAT: Validation Report for Cloud Prodtucts, 2010

Při validaci v denních hodinách bylo dosaženo přesnosti u nízké oblačnosti 90,75%, střední oblačnosti 52,71%, transparentní oblačnosti 94,08% a u vysoké oblačnosti 79,43% (viz tabulka 12).

Tabulka 12: Výsledek hodnocení přesnosti produktu CT

CT v2.0	***Nízká oblačnost***	***Střední oblačnost***	***Transparentní oblačnost***	***Vysoká oblačnost***
Všechny podmínky	93,82%	49,84%	90,95%	79,43%
Den	90,75%	52,71%	94,08%	78,40%
Noc	95,53%	49,78%	85,12%	80,15%
Stmívání	96,50%	36,23%	82,14%	84,62%

Zdroj: EUMETSAT: Validation Report for Cloud Prodtucts, 2010

4.3.1.3 Cloud Top Temperature and Height

Cloud Top Temperature and Height (dále jen CTTH) je produkt vyvíjený jako jeden z produktů SAFNWC sloužící pro podporu nowcastingu. Produkt CTTH dále slouží jako vstup do mezi-měřítkových modelů nebo do dalších SAFNWC produktů a některých aplikací zahrnují výšku vrcholu oblačnosti pro předpověď leteckých aktivit.

Hlavním cílem produktu CTTH je získání informace o tlaku, teplotě a výšce na vrcholu oblačnosti pro všechny pixely identifikované na družicovém snímku jako oblačné.

Teplota na vrcholu netransparentní oblačnosti může být zjišťována z jasových teplot infračerveného pásma měřených v kanálech atmosférického okna. Výška oblačnosti může být potom získaná z teplotních profilů předpovídaných NWP. Tato metodika však není aplikovatelná pro transparentní oblačnosti nebo pod-pixelovou oblačnost z důvodu kontaminace hodnoty jasové teploty vyzařováním povrchu (zemský nebo oceánský).

Tlak (Cloud Top Pressure, dále jen CTP) nebo výška (Cloud Top Height, dále jen CTH) na vrcholu oblak jsou odvozovány z hodnot teploty (Cloud Top Temperature, dále jen CTT) získaných pomocí jasových teplot v infračerveném spektru (IR), které byly porovnávány se simulovanými jasovými teplotami v infračerveném pásmu (IR) a hodnot vlhkosti předpovědních vertikálních profilů s využitím NWP a RTTOV[4].

Hlavním vstupem produktu CTTH jsou družicová data pořízená senzorem SEVIRI, který pro úspěšnost aplikace produktu musí obsahovat kanály (R6.2µm, R7.3µm, R10.8µm, R13.4µm, T10.8µm, T12.0µm), z nichž některé jsou povinné a jiné volitelné (viz tabulka 13).

Tabulka 13: Spektrální kanály radiometru SEVIRI pro úspěšný výpočet produktu CTTH

Rad6.2µm	Rad7.3µm	Rad13.4µm	Rad10.8µm	T10.8µm	T12.0µm
volitelný	volitelný	povinný	povinný	povinný	volitelný

Zdroj: DERRIEN, M., GLÉAU, H., FERNANDEZ, P. 2010

Dalším povinným vstupem jsou jednotlivé kategorie produktů CMa a CT. Dále do algoritmu vstupují povinné hodnoty úhlů slunce a družice na základě zabírané oblasti a charakteristik družice. NWP povinnými parametry jsou teplota zemského povrchu, tlak zemského povrchu, teplota vzduchu a relativní vlhkost, teplota vzduchu a relativní vlhkost na úrovních vertikálního tlaku, nadmořská výška mřížky modelu NWP. Pomocnými povinnými daty, přemapovávanými do družicových snímků, jsou atlasy zemského povrchu, oceánů, nadmořských výšek, různé klimatologické výstupy apod..

[4] RTTOV je rychlý model pro výpočet záře pro družice snímající pomocí radiometrů v infračerveném a mikrovlnném spektru.

Hlavním výstupem produktu CTTH jsou tlak (6 bitová hloubka), výška (7 bitová hloubka) a teplota (8 bitová hloubka) vypočítané na vrcholu oblačnosti (viz tabulka 14).

Tabulka 14: Hlavní výstup produktu CTTH

6bit	*tlak na vrcholu oblak [hPa]*
7bit	*výška vrcholu oblak [m]*
8bit	*Teplota na vrcholu oblak [K]*

Zdroj: DERRIEN, M., GLÉAU, H., FERNANDEZ, P. 2010

Produkt CTTH je z důvodu vstupů produktů CMa a CT závislý na jejich přesnostech, tudíž v případě, že dojde ke špatné klasifikaci oblačnosti, bude výsledek výpočtu hodnot tlaku, teploty i výšky také špatně. Prvním nedostatkem je špatná dostupnost produktu CTTH pro transparentní oblačnost. Druhým nedostatkem je nedostupnost produktu pro tenké druhy oblak Cirrus. Posledním čtvrtým nedostatkem je možné nadhodnocení výšky na vrcholu nízkých druhů oblačnosti.

4.3.2 MODIS Atmosphere

Vytvořením senzoru MODIS uprostřed roku 1995 začala organizace NASA s testováním jeho schopností. Nejdříve byl senzor umístěn na palubu družice Terra (start 1999) a o tři roky později i na palubu družice Aqua (start 2002). Na konci 20. století se organizace NASA rozhodla pro vytváření programu MODIS Atmosphere využívající data nejprve z polární družice Terra a později i z polární družice Aqua (NASA: MODIS Atmosphere, 2011).

4.3.2.1 Cloud Mask

Produkt Cloud Mask (dále jen CMa) nese v rámci projektu MODIS Atmosphere označení MOD35 a je vytvořen v prostorovém rozlišení 250 m (v nadiru) a 1 km. Produkt CMa vyžaduje radiometricky přesná měření, proto se v místech nekompletních vstupních parametrů nebo špatné kvality objevují „díry“.

Existují dva produkty CMa v rámci projektu MODIS Atmosphere a těmi jsou:

- MOD35_L2 – vznikl na základě dat shromážděných z družice Terra
- MYD35_L2 – vznikl na základě dat shromážděných z družice Aqua

Detekce oblačnosti na družicovém snímku je hlavním cílem produktu CMa ze dvou důvodů. Zaprvé, oblačnost hraje kritickou roli v rovnováze záření Země a musí být přesně detekována získání možnosti hodnocení klimatu a potenciálních klimatických změn. Zadruhé, oblačnost musí být přesně detekována pro získání jejích mnoha atmosférických a povrchových charakteristik.

Produkt CMa využívá sadu spektrálních testů používaných např. u projektů APOLLO, ISCCP, CLAVR a SERCAA pro identifikaci oblačnosti z různých zorných úhlů (Field Of View, FOV). Pixely družicového snímku jsou po aplikaci těchto testů rozděleny do čtyř kategorií (bezoblačný, pravděpodobně bezoblačný, nerozhodnutý, oblačný). U nerozhodnutých výsledků jsou ještě aplikovány prostorové a časové testy různorodosti. Spektrální testy jsou založeny na aplikaci prahových hodnot záření (teploty) v IR spektrálním pásmu a prahových hodnotách odrazivosti ve VIS a NIR spektrálním pásmu. Tyto hodnoty se mění s typem povrchu, atmosférickými podmínkami a pohledovou geometrií.

Pro výpočet produktu CMa je požadovaný jako hlavní vstup kalibrovaný družicový snímek produktu s označením MOD02 (Level-1B Calibrated Geolocation Data Set) se všemi spektrálními kanály 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 17, 18, 20, 21, 22, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33 a 35. Dále je vyžadováno několik vedlejších datových vstupů jako např. parametry Slunce, azimutu a pohledového úhlu (z produktu MOD03), mapa zemského povrchu v 1km prostorovém rozlišení (z produktu MOD03), nadmořské výšky DEM (z produktu MOD03) apod. (viz tabulka 15).

Tabulka 15: Vstupy pro úspěšný výpočet produktu CMa

1	*kanály 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 17, 18, 20, 21, 22, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 35: MOD02*
2	*slunce, azimut, pohledové úhly: MOD03*
3	*mapa zemského povrchu a oceánů v 1 km rozlišení: MOD03*
4	*topografie: průměrná střední výška nad mořem: MOD03*
5	*ekosystém: mapa ekosystémů v 1 km rozlišení: Olson*
6	*denní mapy sněhu nebo ledu: NSIDC*
7	*týdenní teploty zemského povrchu a oceánů: NOAA*
8	*5 roční mapy průměrného indexu NDVI*
9	*teplota zemského povrchu, mapy celkových úhrnů srážek: GDAS*

Zdroj: ACKERMAN, FREY, STRABALA, LIU, GUMLEY, BAUM, MENZEL, 2010

Hlavním výstupem produktu CMa je 48 bitový družicový snímek v prostorovém rozlišení 1 km obsahující výše uvedené čtyři kategorie klasifikace (viz tabulka 16).

Tabulka 16: Výstupy produktu CMa

nedefinované
definované
oblačné
pravděpodobně oblačné
pravděpodobně bezoblačné
bezoblačné

Zdroj: ACKERMAN, FREY, STRABALA, LIU, GUMLEY, BAUM, MENZEL, 2010

Prvním nedostatkem je špatná detekce oblačnosti nad pobřežími, řekami a vnitrozemskými jezery. Druhým nedostatkem je špatná detekce oblačnosti v nočních hodinách nad pouštními regiony. Třetím nedostatkem je nefungování v regionech s výskytem polárních nocí. Posledním čtvrtým nedostatkem je problematická detekce stínů.

4.3.2.2 Cloud Product

Produkt Cloud Product (dále jen CP) s označením MOD06 a je v rámci projektu MODIS Atmosphere na úrovni Level 2. Produkt CP využívá pro získání fyzikálních a zářivých vlastností oblačnosti množství prahových hodnot testů v rámci viditelného a infračerveného spektra.

Existují dva produkty CP v rámci projektu MODIS Atmosphere a těmi jsou:

- MOD06_L2 – vznikl na základě dat shromážděných z družice Terra,
- MYD06_L2 – vznikl na základě dat shromážděných z družice Aqua.

Produkt CP poskytuje informace např. o složení (fázi) oblačnosti (voda vs. led), optické tloušťce a nasycenosti vodní parou, které jsou odvozené z VIS a NIR kanálů senzoru MODIS v prostorovém rozlišení 1km. Dále jsou produktem poskytnuty informace např. o tlaku, teplotě, výšce, efektivní zářivosti, frakci (propustnosti), které jsou získané v denních a nočních metodách z IR kanálu senzoru MODIS v prostorovém rozlišením 5 km.

Oblačnost hraje kritickou roli v bilanci záření Země a musí být přesně popsána pro hodnocení klimatu a potenciálních klimatických změn. Z tohoto důvodu je nutné přesně určit atmosférické a povrchové parametry oblačnosti. Právě popis těchto parametrů je

hlavním cílem produktu CP, který k jeho naplnění využívá senzoru MODIS s pro polární družice tohoto výzkumného charakteru nebývalým prostorovým rozlišením.

Z důvodu rozdílných postupů, testů a volených prahových hodnot pro výpočet jednotlivých charakteristik a parametrů oblačnosti, které všechny produkt CP poskytuje, není v rámci diplomové práce možné a ani podstatné je všechny uvádět. Pro zvídavé čtenáře prahnoucí po výzkumu těchto metodik je možné odkázat na technickou zprávu, která byla vytvořena pro tento produkt (MENZEL, FREY, BAUM, 2010).

Pro výpočet produktu CP je požadovaný nejprve vstup oblačné masky z produktu MOD35 (Cloud Mask), který je využit jako indikátor povrchu oblačnosti v 1 km prostorovém rozlišení. Dále produkt požaduje několik vedlejších datových vstupů, jako jsou např. kalibrovaná, koregistrovaná data s 1 km prostorovým rozlišením ze spektrálních kanálů 29, 31, 32, 33 – 36 nebo informace o povrchu terénu a nadmořské výšce z DEM apod. (viz tabulka 17).

Tabulka 17: Vstupy pro úspěšný výpočet produktu CP

1	*kanály 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36: MOD02*
2	*navigace: terénní model (DEM), zemský povrch, oceán*
3	*pohledový úhel: FOV*
4	*produkt Cloud Mask (CMa)*
5	*data o zemském povrchu (tlak, teplota): SST*
6	*profily modelů (teplotní, vlhkostní): AIRS/AMSU*
7	*mapy čisté zářivosti v kanálech 31, 33, 34, 35, 36: CMa*

Zdroj: MENZEL, FREY, BAUM, 2010

Výstupy produktu CP jsou výše uvedené charakteristiky oblačnosti v prostorovém rozlišení 1 km a 5 km (viz tabulka 18).

Tabulka 18: Výstupy produktu CP

	5 km	**1 km**
1	*skenovaný čas startu*	*optická tloušťka oblačnosti*
2	*zeměpisná šířka a délka*	*efektivní úhel oblačnosti*
3	*zenitový úhel slunce a senzoru*	*rozdíl efektivního úhlu*
4	*azimutový úhel slunce a senzoru*	*vodní hodnota oblačnosti*
5	*jasová teplota z kanálů 29, 31-36*	*efektivní úhel oblačnosti (procenta)*
6	*teplota zemského povrchu*	*optická tloušťka oblačnosti (procenta)*
7	*tlak zemského povrchu*	*vodní hodnota oblačnosti (procenta)*
8	*úspěšnost průběhu algoritmu*	*optické vlastnosti fáze oblačnosti*

9	*metoda výpočtu výšky oblačnosti*	*mnoho-vrstevnatost oblačnosti*
10	*tlak oblačnosti (den/noc)*	*odrazivost cirovité oblačnosti*
11	*teplota oblačnosti (den/noc)*	*kvalita algoritmu*
12	*výška tropopauzy*	*maska oblačnosti*
13	*propustnost oblačnosti (den/noc)*	
14	*efektivní vyzařování oblačnosti (den/noc)*	
15	*spektrální síla oblačnosti*	
16	*typ zemského povrchu*	
17	*rozdíl zářivosti v 7 kanálech*	
18	*rozdíl jasových teplot*	
19	*složení oblačnosti v infračerveném pásmu (den/noc)*	
20	*kvalita algoritmu*	
21	*maska oblačnosti*	

Zdroj: MENZEL, FREY, BAUM, 2010

Prvním nedostatkem produktu je příliš nízká hodnota tlaku a teploty v inverzních podmínkách, což je způsobeno příliš nadhodnocenou hodnotou výšky. Druhým a posledním nedostatkem je zvýšená hodnota odrazivosti druhu oblak Cirrus nad povrchy s vysokou nadmořskou výškou.

5 DATA A METODY ZPRACOVÁNÍ DRUŽICOVÝCH DAT

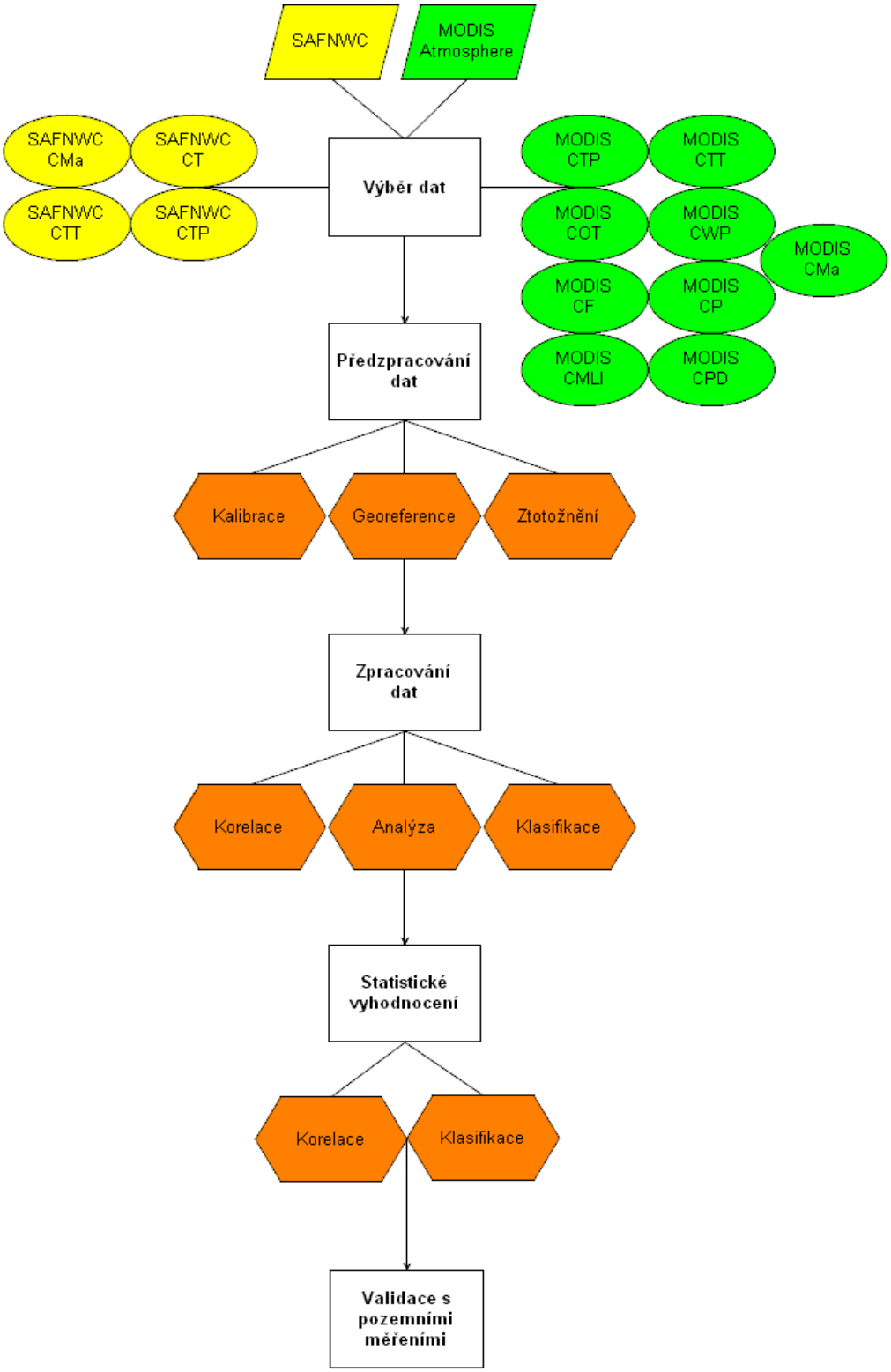
5.1 Postup práce

Postup práce je možné shrnout do následujících kroků:

1. **Výběr dat** – výběr vhodných družicových dat pořízených nosiči MSG a Terra, Aqua
2. **Předzpracování dat**
    a. Kalibrace – převod relativních hodnot na hodnoty absolutní
    b. Georeference – zvolení a nastavení vhodného souřadnicového systému
    c. Ztotožnění – geometrické ztotožnění výše georeferencovaných dat
3. **Zpracování dat**
    a. Korelace – porovnání produktů z projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere
    b. Analýza – zjištění průběhu hodnot dílčích charakteristik druhů oblačnosti
    c. Klasifikace – rozhodovací prahový algoritmus, řízená a neřízená klasifikace
4. **Statistické vyhodnocení**
    a. Korelace – korelační koeficient, rovnice regrese a míra spolehlivosti
    b. Klasifikace – celková přesnost a kappa index
5. **Validace s pozemními měřeními**

Celý zpracovatelský postup je graficky vyjádřen ER diagramem (viz obrázek 8).

Obrázek 8 Grafické znázornění zpracovatelského postupu



Zdroj: vlastní zpracování

5.2 Použitá data a software

Pro účely diplomové práce byla vybrána data ze zimního (leden, únor) a letního (červenec, srpen) období roku 2010 se snahou, aby se v nich vyskytovalo co nejširší spektrum druhů oblačnosti. Přehled pořízených a zpracovaných dat z projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere je uveden v tabulce 19.

Tabulka 19: Pořízená data v rámci diplomové práce

MODIS Atmosphere					
id	*datum*	*rok*	*čas*	*družice*	*produkty*
003	3.1.	2010	12:25	Aqua	CMa, CP
005	5.1.	2010	10:25	Terra	CMa, CP
006	6.1.	2010	12:55	Aqua	CMa, CP
037	6.2.	2010	10:25	Terra	CMa, CP
045	14.2.	2010	13:00	Aqua	CMa, CP
051	20.2.	2010	12:25	Aqua	CMa, CP
186	5.7.	2010	12:30	Aqua	CMa, CP
206	25.7.	2010	12:05	Aqua	CMa, CP
210	29.7.	2010	11:40	Aqua	CMa, CP
225	13.8.	2010	10:50	Terra	CMa, CP
236	24.8.	2010	10:30	Terra	CMa, CP
242	30.8.	2010	11:40	Aqua	CMa, CP

SAFNWC				
datum	*rok*	*čas*	*družice*	*produkty*
3.1.	2010	12:15	MSG-2	CMa, CT, CTTH
5.1.	2010	10:15	MSG-2	CMa, CT, CTTH
6.1.	2010	12:45	MSG-2	CMa, CT, CTTH
6.2.	2010	10:15	MSG-2	CMa, CT, CTTH
14.2.	2010	12:45	MSG-2	CMa, CT, CTTH
20.2.	2010	12:15	MSG-2	CMa, CT, CTTH
5.7.	2010	12:15	MSG-2	CMa, CT, CTTH
25.7.	2010	12:00	MSG-2	CMa, CT, CTTH
29.7.	2010	11:30	MSG-2	CMa, CT, CTTH
13.8.	2010	10:45	MSG-2	CMa, CT, CTTH
24.8.	2010	10:15	MSG-2	CMa, CT, CTTH
30.8.	2010	11:30	MSG-2	CMa, CT, CTTH

Zdroj: vlastní zpracování

Prvním z vybraných produktů projektu SAFNWC je CMa (Cloud Mask), který nese označení *PGE01 v3.1*. Druhým produktem je CT (Cloud Type) označován jako *PGE02 v2.1* a třetím produktem je CTTH (Cloud Top Temperature and Height) s označením *PGE03 v2.2*. Data z projektu SAFNWC jsou uloženy ve formátu *HDF5*, což je dosud nejnovější z *HDF* formátů podporovaných skupinou The HDF Group, který vznikl v roce 2002 a odstraňuje některé nedostatky formátu *HDF4* (viz výše). Snímky zobrazující území Evropy byly pořízeny družicí Meteosat-9 (MSG-2) v režimu snímání 15 minut, která se nachází nad průsečíkem nultého poledníku a rovníku. Velikost rastrů jednotlivých snímků je 750 x 1500 a prostorové rozlišení 1 km. Data pro získání z projektu SAFNWC nemají nastavený žádný souřadnicový systém a nejsou též kalibrovaná. Velikost jednoho souboru je okolo 1 MB v závislosti na zvoleném produktu.

Vybrané produkty projektu MODIS Atmosphere byla vytvořené na druhé úrovni produktů (Level-2 Product). Prvním z nich je produkt CMa (Cloud Mask), který při odvození

z družicových snímků nosiče Terra nese označení *MOD35*_L2 a při pořízení družicí Aqua *MYD35*_L2. Druhým produktem je CP (Cloud Product) nesoucí označení při odvození z družicových snímků nosiče Terra *MOD06*_L2 a při pořízení družicí Aqua *MYD06*_L2. Data jsou po vytvoření uložena ve formátu *HDF4*, což je starší z formátů *HDF* (Hierarchical Data Format, HDF) navržených k ukládání a organizaci rozsáhlého množství číselných hodnot, který byl původně vytvořený Národním centrem pro výpočetní aplikace (National Center for Supercomputing Applications, NCSA) a v současné době podporovaných skupinou The HDF Group (HDF, 2011). Prostorové rozlišení záleží na zvoleném snímku. Snímky s velikostí rastru (2500 x 2500) mají prostorové rozlišení 1 km a snímky s velikostí rastru (500 x 500) mají prostorové rozlišení 5 km. Data po získání z projektu MODIS Atmosphere nejsou kalibrována na absolutní hodnoty a nemají nastavený žádný souřadnicový systém. Velikost souboru (resp. produktu) se pohybuje okolo 30 MB v závislosti na velikosti snímané scény.

Během procesu zpracovávání dat bylo využito celkem tří různých programů a dvou knihoven. Prvním z důvodu, proč tomu tak bylo, byl nestejný formát použitých dat (*HDF4*, *HDF5*), který některé programy podporovaly a jiné ne. Druhým důvodem byla možnost využití vhodných nástrojů, které jednotlivé programy pro zpracování a vizualizaci nabízely. Pro zpracování dat v diplomové práci byl klíčovým programem IDL/ENVI 4.7 od firmy ITT Visual Information Solution (http://www.ittvis.com/). V tomto programu byla prováděna kalibrace, georeference, klasifikace i statistické vyhodnocení dat. Dalším důležitým programem hlavně z důvodu interoperability formátu *HDF5* byl program ArcGIS 10 od firmy ESRI (http://www.esri.com/), který posloužit též ke kalibraci, georeferenci i statistickému vyhodnocení dat a hlavně k tvorbě mapových výstupů. Program HDFView 2.7 od společnosti The HDF Group (http://www.hdfgroup.org/) byl využit zejména k vizualizaci dat projektu SAFNWC a seznámení se s jednotlivými produkty a hodnotami, kterých nabývají. Knihovny PROJ.4 a GDAL pod záštitou konsorcia OSGeo (http://www.osgeo.org/) byly využity ke georeferenci dat z projektu SAFNWC do shodného souřadnicového systému, do kterého byla georeferencována data z projektu MODIS Atmosphere.

5.3 Metodika

Využití produktů z projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere určující dílčí charakteristiky oblačnosti a kategorizující její druhy není v České republice zatím příliš známé a rozšířené. Z tohoto důvodu budou v této kapitole práce, zahrnující výběr, předzpracování, zpracování, statistické vyhodnocení a validaci dat, všechny kroky detailně popsány i včetně nastínění teoretických základů použitých metod a operací.

5.3.1 Výběr dat

Při výběru dat bylo postupováno tak, že nejprve byla vybrána data z polárních družic Terra, Aqua a následně k nim byla dohledávána data z geostacionární družice MSG. Důvodem k této posloupnosti výběru byla frekvence snímání území Evropy příslušnými radiometry SEVIRI a MODIS.

Polární družice Terra, Aqua pořizují snímky území Evropy 2krát denně, z čehož jeden snímek je pořízen v dopoledních a druhý v nočních hodinách. Družice Terra snímá území Evropy mezi 9 – 12 hodinou světového času (Universal Coordinated Time, UTC) a Aqua mezi 11 – 14 hodinou UTC. Družice MSG pořizuje snímky téhož území čtyřikrát během jedné hodiny. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že vhodnější bude provést nejprve výběr snímků pořízených senzorem MODIS a poté k nim dohledávat snímky pořízené senzorem SEVIRI.

Prvním kritériem výběru vhodných dat bylo časové hledisko. Pro výzkum byla vybrána data z roku 2010, která pocházela ze zimních (leden, únor) a letních měsíců (červenec, srpen). Druhým kritériem bylo hledisko míry pokrytí snímku oblačností, kdy z každého měsíce byly vybrány pouze snímky s nejvyšší mírou pokrytí oblačností. Posledním kritériem bylo hledisko druhů oblačnosti. Druhy oblačnosti je velice těžké vizuálně z družicového snímku určit, ale mou snahou vždy bylo, aby se na každém ze snímků nacházelo co nejširší spektrum druhů oblačnosti. Z každého měsíce tedy nakonec byly pro zpracování vybrány tři snímky (tj. celkem 12), které splňovaly všechny výše uvedená kritéria.

Výběr vhodných družicových snímků pořízených družicemi Terra, Aqua byl prováděn pomocí prohlížeče L1B Granule Images projektu MODIS Atmosphere (NASA: Images, 2011), který nabízí archiv RGB kompozitů všech družicových snímků od roku 2000 do aktuálního

data. Na základě zvolených družicových snímků byly z on-line archivu LAADS Web (NASA: LAADS Web, 2011) volně staženy vybrané produkty.

K vybraným družicovým snímkům z nosičů Terra, Aqua byly pomocí datumu a času pořízení dohledány v archivu ČHMÚ vhodné družicové snímky pořízené družicí MSG, na které Mgr. Jindřich Šťástka aplikoval vybrané produkty vytvořené v rámci projektu SAFNWC. Při dohledávání družicových snímků z MSG byla snaha, aby časový rozdíl mezi jejich pořízením senzorem SEVIRI a senzorem MODIS byl co nejmenší, protože během pořízení jednotlivých scén mohlo dojít (a určitě také došlo) k pohybu oblačnosti (viz tabulka 20).

Synoptické mapy vytvořené na základě převodu SYNOP zpráv do mapové podoby byly získány z archivu centrálního předpovědního pracoviště (CPP) ČHMÚ.

Tabulka 20: Zpracovaná data v rámci diplomové práce

MODIS Atmosphere			**SAFNWC**			
datum	*rok*	*čas*	*datum*	*rok*	*čas*	*časový rozdíl*
3.1.	2010	12:25	3.1.	2010	12:15	0:10
5.1.	2010	10:25	5.1.	2010	10:15	0:10
6.1.	2010	12:55	6.1.	2010	12:45	0:10
6.2.	2010	10:25	6.2.	2010	10:15	0:10
14.2.	2010	13:00	14.2.	2010	12:45	0:15
20.2.	2010	12:25	20.2.	2010	12:15	0:10
5.7.	2010	12:30	5.7.	2010	12:15	0:15
25.7.	2010	12:05	25.7.	2010	12:00	0:05
29.7.	2010	11:40	29.7.	2010	11:30	0:10
13.8.	2010	10:50	13.8.	2010	10:45	0:05
24.8.	2010	10:30	24.8.	2010	10:15	0:15
30.8.	2010	11:40	30.8.	2010	11:30	0:10

Zdroj: vlastní zpracování

5.3.2 Předzpracování dat

V procesu předzpracování dat byla nejdříve provedena kalibrace dat z relativních hodnot na hodnoty absolutní, následovala jejich georeference do zvoleného souřadnicového systému a poté jejich ztotožnění, aby si data z projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere prostorově odpovídala a bylo možné vzájemně jednotlivé produkty porovnávat a provádět nad nimi prostorové analýzy.

5.3.2.1 Kalibrace

Prvním procesem předzpracování dat byla jejich kalibrace. Kalibrace dat je proces, při kterém jsou převáděny relativní hodnoty pixelů na některou z fyzikálních (tzn. absolutních) veličin. Kalibrace je založena na skutečnosti, že výstupní hodnota radiometru má funkční vztah k množství záření, které na čidlo radiometru dopadá. Výstupní hodnoty z radiometru však není možné zaznamenat spojitě, a proto je rozsah těchto hodnot, rozdělen do intervalů (např. 256 intervalů pro 8bitový snímek). Výsledná hodnota pixelu tedy není fyzikální veličinou, ale jedná se pouze o pořadové číslo intervalu, do kterého byla naměřená hodnota zařazena. Tyto relativní hodnoty jsou označovány zkratkou DN (Digital Number). Většina současných radiometrů je konstruována tak, aby závislost hodnot DN na množství dopadajícího záření byla lineární a bylo možné je převést na požadovanou radiometrickou veličinu pomocí lineárního vztahu:

$$L = a * DN + b$$

kde a…kalibrační parametr určující směrnici přímky (*slope*); b...kalibrační parametr určující svislý posun přímky (*intercept*); DN…relativní hodnota.

Kalibrace dat projektu MODIS Atmosphere byla provedena v programu ENVI pomocí nástroje MODIS Conversion Toolkit. Tento nástroj byl vytvořený Devinem Whitem a volně získán z knihovny kódů firmy ITT (ITT: Code Library, 2011). Kalibrační rovnice byla následující:

$$orig_val = cal * (cal_value - offset)$$

kde cal…kalibrační parametr určující směrnici přímky (*slope*); offset…kalibrační parametr určující svislý posun přímky (*intercept*); cal_value...relativní hodnota.

Tato rovnice byla získána ze souborové specifikace (*File Spec*) projektu MODIS Atmosphere (NASA MODIS Atmosphere, 2011) a v různých modifikacích aplikována na kanály tlaku (CTP), teploty (CTT), propustnosti (CF), složení neboli fáze (CPI), optické tloušťky (COT), vodní hodnoty (CWP), optického složení neboli fáze (CPD) a mnoho-vrstevnatosti (CMLI) projektu MODIS Atmosphere v následující podobě:

*(CTP - 0.00000000) * 0.10000000,*
*(CTT- (-15000.00000000)) * 0.01000000,*
*(CF- 0.00000000) * 0.01000000,*
*(CPI - 0.00000000) * 0.01000000,*
*(COT - 0.00000000) * 0.01000000,*
*(CWP - 0.00000000) * 0.01000000,*
*(CPD - 0.00000000) * 1.00000000,*
*(CMLI - 0.00000000) * 1.00000000.*

Kalibrace dat projektu SAFNWC byla provedena v programu ArcGIS pomocí nástroje Raster Calculator na základě následující kalibrační rovnice:

$$orig_val = gain * (cal_value + intercept)$$

kde gain…kalibrační parametr určující směrnici přímky (*slope*); intercept… kalibrační parametr určující svislý posun přímky (*intercept*); cal_value...relativní hodnota.

Tato rovnice byla získaná z popisu výstupů (Description of Outputs) projektu SAFNWC (EUMETSAT NWC SAF, 2011) a opět v různých modifikacích aplikována na produkty tlaku (CTP) a teploty (CTT) projektu SAFNWC v podobě:

*(1 * CTT) + (150),*
*(25 * CTP) + (-250).*

5.3.2.2 Georeference

Druhým procesem v rámci předzpracování dat bylo provedení jejich georeference, jelikož získaná data neměla nastavený žádný souřadnicový systém. Georeference dat je jedním z typů geometrické transformace, během níž se data zavádí do zvoleného souřadnicového systému, čímž jsou získána tzv. geokódovaná data. Zvoleným souřadnicovým systémem byl WGS 84 / UTM zone 33N, jehož referenční plochou je elipsoid WGS 84 a použitým kartografickým zobrazením UTM (Universal Transverse Mercator) s definicí poledníkové zóny 33N, která v sobě zahrnuje celé území České republiky. Geometrická transformace je vždy spojena s převzorkováním dat (resampling). Z důvodu nutnosti zachování původních hodnot obrazových dat, byla jako typ převzorkování zvolena metoda nejbližšího souseda (Nearest Neighbor), která jako jediná z interpolací zachovává původní hodnoty pixelu.

Aby bylo možné jednotlivé produkty vzájemně porovnávat a provádět nad nimi prostorové analýzy, bylo nutné převést oba typy dat projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere do stejného prostorového rozlišení, jelikož produkty odvozené ze senzoru SEVIRI měly rozlišení vyšší (1 km) nežli produkty odvozené ze senzoru MODIS (1 km a 5 km). Všechna data vyššího prostorového rozlišení byla proto převedena do nižšího rozlišení s velikostí pixelu 5 km. Při změně prostorového rozlišení dochází k dopočítání hodnoty nově vzniklého pixelu, k čemuž byla použita opět interpolace metodou nejbližšího souseda (Nearest Neighbor).

Georeference dat MODIS Atmosphere byla provedena v programu ENVI pomocí nástroje MODIS Conversion Toolkit, který vstupní data na základě doprovodné informace (kanály zeměpisné šířky a délky) georeferencoval do zvoleného souřadnicového systému pomocí automaticky vygenerovaných 50 vlícovacích bodů (dále jen VLB).

Georeference dat SAFNWC byla náročnou záležitostí, která pramenila z faktu, že pořízená data ve formátu *HDF5* neobsahovala žádnou doprovodnou informaci potřebnou ke georeferenci dat (např. kanály zeměpisné šířky a délky), nehledě na fakt, že téměř žádný z komerčně využívaných programů nedokázal pracovat s geostacionární družicovou projekcí (GEOS), ve které byla data z družice MSG pořízena.

Na tuto problematiku dat SAFNWC upozornil 27. 4. 2010 na konferenci v Madridu Marcel Derrien z francouzského meteorologického ústavu Météo-France. Řešení, jak lze data SAFNWC georeferencovat pomocí knihoven PROJ.4 a GDAL, poté částečně nastínil v doprovodném článku (DERRIEN, 2010) k této konferenci. Po kontaktování Marcela Derriena a jeho dovysvětlení mi některých nejasností jsem dokázal provést georeferenci dat pomocí těchto knihoven. Georeference byla provedena v operačním systému Linux Ubuntu 10.10 „Maverick Meerkat“. Pro její provedení bylo využito následujícího postupu příkazů:

1) Nastavení geostacionární družicové projekce (GEOS) pro data projektu SAFNWC pomocí knihovny PROJ.4 a její uložení pomocí knihovny GDAL (viz příkaz).

```
echo +proj=geos +a=6378169 +b=6356583.8 +lon_0=0 +h=35785831 >
msg_option.txt
```

2) Nastavení projekce UTM pro data projektu MODIS Atmosphere pomocí knihovny PROJ.4 a její uložení pomocí knihovny GDAL (viz příkaz).

```
echo "+proj=utm +zone=33 +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +units=m
+no_defs" > modis_option.txt
```

3) Nastavení rozměru zájmové oblasti dat projektu SAFNWC pomocí knihovny GDAL (viz příkaz).

```
gdal_translate -a_srs msg_option.txt -of "Gtiff" -a_ullr -
1585713.174441 5366221.404261 2914891.861059 3115918.886511
SAFNWC_MSG2_CMa.gif SAFNWC_MSG2_CMa.tif
```

4) Zvolení vstupního a výstupního souřadnicového systému s nastavením prostorového rozlišení dat pomocí knihovny GDAL (viz příkaz).

```
gdalwarp -s_srs msg_option.txt -t_srs modis_option.txt -tr 5000
5000 SAFNWC_MSG2_CMa.tif SAFNWC_MSG2_CMa_UTM33.tif
```

5) Nastavení rozměru ořezového okna výstupních dat projektu SAFNWC pomocí knihovny GDAL (viz příkaz).

```
gdal_translate -projwin -714006.125 7009071.500 2160993.875
4449071.500 SAFNWC_MSG2_CMa_UTM33.tif SAFNWC_MSG2_CMa_georef.tif
```

Přesnost georeference dat SAFNWC a MODIS Atmosphere byla zjištěna pomocí manuálně zvolených kontrolních bodů (Ground Control Points, GCP). Pro zhodnocení přesnosti georeference byly vypočteny následující statistické charakteristiky:

a) rozdíl souřadnic v osách x, y (dx, dy) podle vzorce:

$$dx = x_i - x_j ; dy = y_i - y_j$$

kde dx…rozdíl souřadnic v ose x; x_i…souřadnice souboru i; x_j…souřadnice souboru j; dy…rozdíl souřadnic v ose y; y_i…souřadnice souboru i; y_j…souřadnice souboru j.

b) směrodatná odchylka v osách x, y (σ_x, σ_y) podle vzorce:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} ; \sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(y_i - \bar{y}\right)^2}$$

kde σ_x…směrodatná odchylka v ose x; x_i…rozdíl souřadnic v ose x; x…průměrný rozdíl souřadnic v ose x; σ_y…směrodatná odchylka v ose y; y_i…rozdíl souřadnic v ose y; y…průměrný rozdíl souřadnic v ose y.

c) střední kvadratická chyba v osách x, y ($rmse_x$, $rmse_y$) podle vzorce:

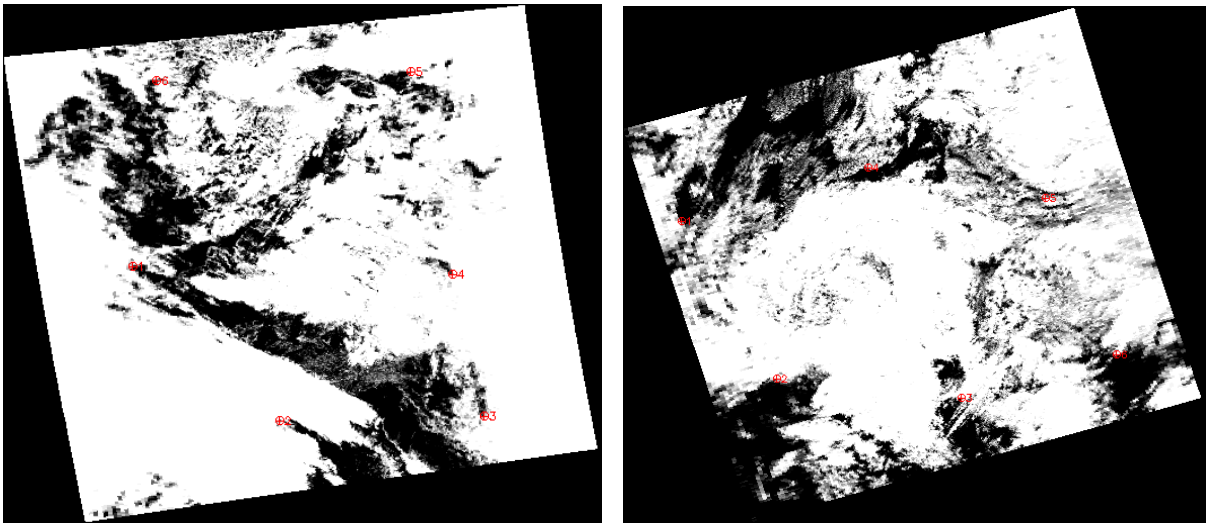
$$rmse_x = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - x_j)^2}; rmse_y = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - y_j)^2}$$

kde $rmse_x$…střední kvadratická chyba v ose x; x_i…souřadnice souboru i; x_j…souřadnice souboru j; $rmse_y$… střední kvadratická chyba v ose y; y_i…souřadnice souboru i; y_j…souřadnice souboru j.

5.3.2.3 Ztotožnění

Finální ztotožnění dat SAFNWC a MODIS Atmosphere bylo provedeno v programu ENVI pomocí nástroje Image To Image s využitím VLB. Snímky MODIS Atmosphere byly použity jako tzv. *master*, ke kterým byly ztotožňovány snímky SAFNWC jako tzv. *slave*. Ztotožnění bylo nejdříve provedeno na produktech CMa (SAFNWC a MODIS Atmosphere) z důvodu, že je na nich dobře rozpoznatelný zemský povrch od oblačnosti, který byl využit k zanesení VLB. Jelikož většina snímků byla velmi rozsáhle pokrytá oblačností, bylo možné zanesení maximálně 6 VLB pro každý z nich, při čemž byla vždy snaha o jejich rovnoměrné rozmístění po celé ploše družicového snímku v rozložení 2 x 3 nebo 3 x 2 (viz obrázek 9).

Obrázek 9: Rozložení vlícovacích bodů (VLB) využitých pro ztotožnění dat



2 x 3 3 x 2

Zdroj: vlastní zpracování

Vzhledem k takto nízkému počtu VLB mohla být využita pouze 1. polynomická transformace (afinní), jejíž transformační rovnice mají následující tvar:

$$X = a_0 + a_1 x + a_2 y$$
$$Y = b_0 + b_1 x + b_2 y$$

kde X, Y…výstupní souřadnice; a, b…koeficienty matice; x, y…vstupní souřadnice.

Po získání souřadnic VLB a koeficientů 1. polynomické transformace pro jednotlivé dny, bylo provedeno ztotožnění i ostatních vybraných produktů (např. CT, CTP, CTT, apod.).

Zhodnocení přesnosti ztotožnění dat SAFNWC a MODIS Atmosphere bylo provedeno pomocí manuálního zadání kontrolních bodů (dále jen GCP), které byly vždy rovnoměrně rozmístěny po ploše snímku v celkovém počtu 6 bodů. Pro zhodnocení přesnosti ztotožnění bylo využito výše uvedených statistických charakteristik (tzn. rozdílu souřadnic (dx, dy), směrodatné odchylky (σ_x, σ_y) a střední kvadratická chyba ($rmse_x$, $rmse_y$)).

5.3.3 Korelace dat

Analýza vybraných produktů vytvořených v rámci projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere a jejich vzájemné porovnání byla provedena pouze nad shodnými produkty (tj. CTP a CTT). K tomuto účelu posloužil výpočet korelace, která měla odhalit vzájemný vztah

produktů (tzn. CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$ a CTT_{SAFNWC} x $CTT_{MODIS\ Atmosphere}$) pro všechny zkoumané dny. Míra korelace byla vyjádřena korelačním koeficientem a po proložení trendové křivky vzorkem dat příslušné zkoumané dvojice, byl zjištěn předpis (tzn. rovnice regrese) pro úpravu hodnot z jednoho typu dat (SAFNWC) do druhého (MODIS Atmosphere).

Než byla provedena změna prostorového rozlišení na 5 km (viz výše), měla data z projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere různou úroveň detailu detekce oblačnosti. To zapříčinilo nutnost provedení maskování všech neoblačných pixelů na obou typech dat, aby při výpočtu korelačního koeficientu nedošlo k porovnávání jiných dvojic pixelů, nežli těch, které odpovídají na snímku oblačným pixelům.

Masky neoblačných pixelů byly vytvořeny v programu ENVI pomocí nástroje Build Mask, do něhož vstupovaly produkty CMa projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere, podle kritérií:

$$CMa_{SAFNWC} = 0,$$
$$CMa_{MODIS\ Atmosphere} = NaN.$$

V programu ArcGIS byly tyto vytvořené masky aplikovány na příslušná data za pomoci nastavení Mask (Geoprocessing - Environment Settings – Raster Analysis). Dále bylo potřebné provést oříznutí dat pomocí nástroje Clip z ArcToolbox (Analysis Tools – Extract) na velikost rastru 100 x 100 pixelů z důvodu, že používaná verze programu Microsoft Excel 2003, ve kterém byly následně prováděny výpočty korelace, je omezena počtem řádků 65 536 a počtem sloupců 255, a data původní velikosti by nebylo možné načíst. Po oříznutí byla data pomocí nástroje Raster To ASCII z ArcToolbox (Conversion Tools – From Raster) exportována do formátu *.txt. Celý tento proces v programu ArcGIS byl automatizován pomocí nadstavby ModelBuilder (viz příloha 1).

Po načtení dat do programu Microsoft Excel, byla potřeba převedení matic (100 x 100) do sloupcové podoby. K tomuto účelu byl vytvořen skript napsaný v programovacím jazyce Visual Basic (viz příloha 2).

Pro zhodnocení korelace produktů (CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$ a CTT_{SAFNWC} x $CTT_{MODIS\ Atmosphere}$) byly vypočteny následující statistické veličiny:

a) korelační koeficient (Correl) podle vzorce:

$$Correl(X,Y) = \frac{\sum (x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum (x-\bar{x})^2 \sum (y-\bar{y})^2}}$$

kde x…hodnota souboru x; $\bar{x}$ …průměr všech hodnot ze souboru x; y…hodnota souboru y; $\bar{y}$ …průměr všech hodnot ze souboru y.

b) průměrná odchylka ($\bar{d}$) podle vzorce:

$$\bar{d} = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n}$$

kde x_i…hodnota ze souboru; $\bar{x}$ ...hodnota průměru; n…počet hodnot.

c) směrodatná odchylka (σ) podle vzorce:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

kde x_i…hodnota ze souboru; $\bar{x}$ ...hodnota průměru; n…počet hodnot.

Následně byly do bodového grafu XY vyneseny odpovídající si sloupcové hodnoty tlaku (CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$) a teploty (CTT_{SAFNWC} x $CTT_{MODIS\ Atmosphere}$) pro jednotlivé dny, kterými byla proložena trendová křivka, na základě níž byly stanoveny rovnice regrese a hodnoty spolehlivosti R^2.

5.3.4 Klasifikace druhů oblačnosti

Vytipování druhů oblačnosti a situací, za nichž dochází k selhání vybraných produktů, nebo kdy se výsledky odvozených produktů z přístrojů SEVIRI a MODIS výrazně liší, bylo založeno na porovnávání produktu CT projektu SAFNWC a klasifikacemi vytvořenými z dostupných produktů projektu MODIS Atmosphere.

Klasifikace je proces, v němž na základě znalosti tzv. přenosové funkce (funkční vztah mezi naměřenými radiometrickými hodnotami a parametry snímaného objektu) můžeme provádět rozřazování různých typů zemského povrchu do tříd právě podle podobnosti jejich parametrů. Před samotnou klasifikací je nejdříve nutné definovat tzv. klasifikační pravidla (tj.

pravidla, podle nichž bude prováděno rozdělení do jednotlivých tříd), při jejichž sestavování se vychází z tzv. klasifikačních příznaků (tj. typické projevy chování dané třídy objektů). Celý proces klasifikace se tedy skládá z následujících kroků:

1) zvolení klasifikačních tříd
2) analýza spektrálního chování
3) definice klasifikačních pravidel
4) výběr klasifikační metody
5) určení přesnosti klasifikace

Zvolení klasifikovaných kategorií druhů oblačnosti vycházelo z názvů kategorií druhů oblačnosti používaných v rámci produktu CT projektu SAFNWC, což mělo své opodstatnění, jelikož klasifikace vytvořené z produktů projektu MODIS Atmosphere byly porovnávány právě s produktem CT projektu SAFNWC. Klasifikované kategorie oblačnosti byly tedy velmi nízká stratiformní, nízká stratiformní, střední stratiformní, velmi vysoká netransparentní, vysoká netransparentní, vysoká slabá transparentní, vysoká středně silná transparentní, vysoká silná transparentní, vysoká transparentní nad nízkými nebo středními oblaky a frakční oblačnost.

Produkt CP projektu MODIS Atmosphere obsahuje celkem 53 kanálů, z nichž ne všechny se týkají oblačnosti, a ne všechny byly pro klasifikaci druhů oblačnosti využity. Po nastudování problematiky určování druhů oblačnosti z výše uvedených studií (viz kapitoly 2, 3), bylo vybráno celkem 8 kanálů (viz tabulka 21), které byly pro klasifikaci využity.

Tabulka 21: Vybrané kanály produktu CP pro klasifikaci druhů oblačnosti

kanál	***český název***	***anglický název***	***zkratka***
11	*tlak vrcholu oblačnosti*	*Cloud Top Pressure*	*CTP*
14	*teplota vrcholu oblačnosti*	*Cloud Top Temperature*	*CTT*
18	*propustnost oblačnosti*	*Cloud Fraction*	*CF*
30	*složení oblačnosti v infračerveném pásmu*	*Cloud Phase Infrared*	*CPI*
41	*optická tloušťka oblačnosti (procenta)*	*Cloud Optical Thickness (percent)*	*COT*
42	*vodní hodnota oblačnosti (procenta)*	*Cloud Water Path (percent)*	*CWP*
46	*optické vlastnosti složení oblačnosti*	*Cloud Phase Optical Properties*	*CPD*
47	*mnoho-vrstevnatost oblačnosti*	*Cloud Multi Layer Flag*	*CMLI*

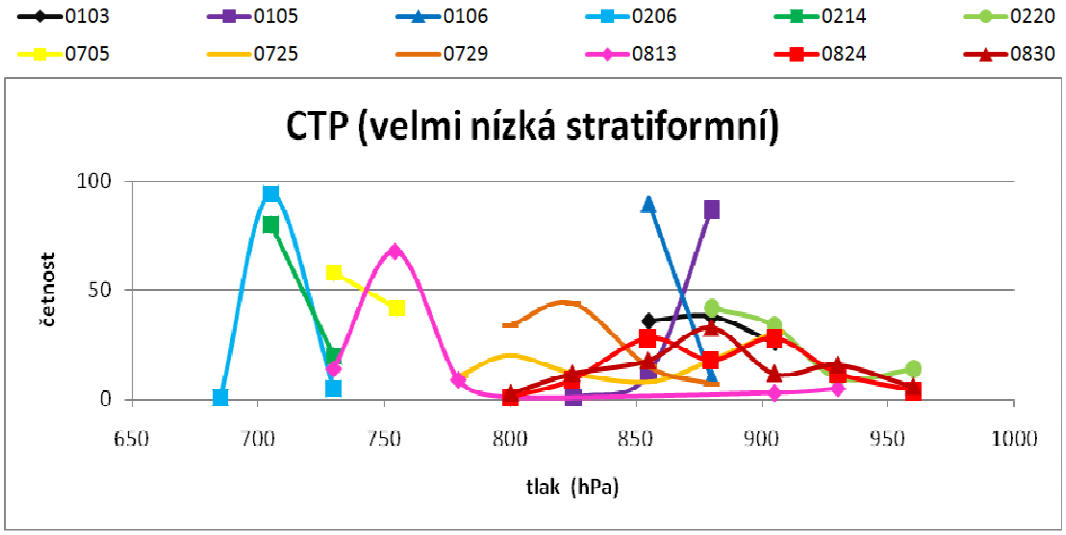
Zdroj: vlastní zpracování

Před přistoupením k definici klasifikačních pravidel, bylo nejdříve nutné porozumět spektrálnímu chování výše uvedených druhů oblačnosti. K tomuto účelu posloužilo vykreslení průběhu jejich spektrálních křivek ze všech vybraných 8 kanálů (tzn. CTP, CTT, CF, CPI, COT, CWP, CPD a CMLI). Vykreslení spektrálních křivek a následné analýze spektrálního chování předcházel výběr tzv. trénovacích množin (tj. reprezentativní příklady jednotlivých klasifikovaných tříd). Výběr trénovacích množin je klíčovým krokem každé klasifikace, protože jejich nekvalitní a nevhodné určení zavádějí do výsledků klasifikace značné chyby.

Trénovací množiny byly na snímcích MODIS Atmosphere definovány manuálně na základě podkladů referenčních snímků produktu CT projektu SAFNWC. Definice trénovacích množin byla provedena v programu ENVI pomocí objektů zájmových regionů (Regions of Interest, ROI), kdy pro každý druh oblačnosti byl vytvořen příslušný jeden ROI. Při výběru trénovacích množin byla vždy snaha o výběr jednotných ploch, které nebyly kontaminovány jinými typy povrchů. Velikost trénovacích množin byla maximálně 10 x 10 pixelů. I přes poměrně přesnou „geolokaci“ dat SAFNWC a MODIS Atmosphere (průměrný posun okolo 0,5 pixelu), bylo raději počítáno s možnými polohovými nepřesnostmi. Z tohoto důvodu byly trénovacími množinami umisťovány do středů větších ploch.

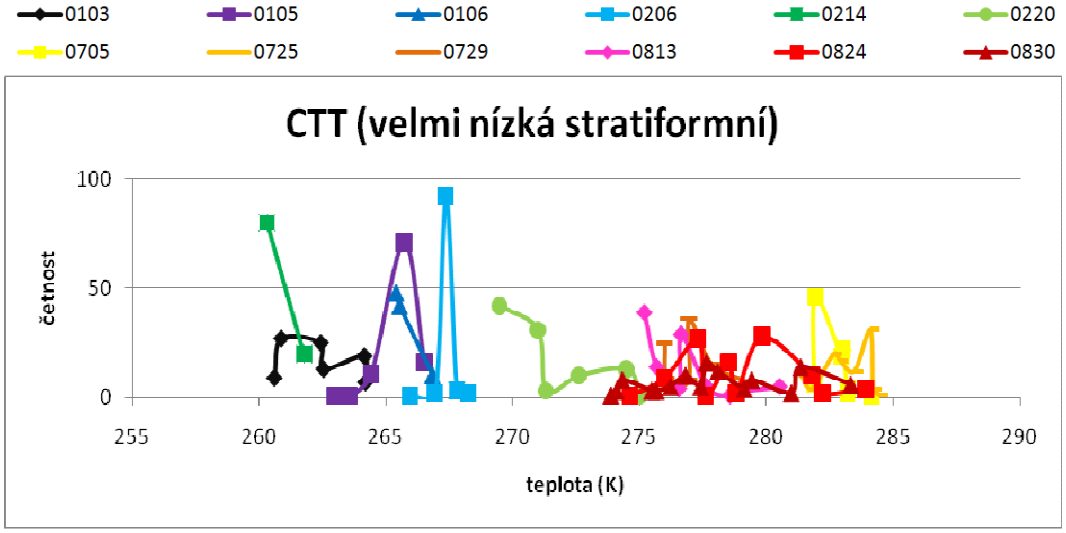
Pomocí funkce Stats v nástroji ROI Tool byly vygenerovány statistické soubory hodnot popisující průběh spektrálních křivek jednotlivých druhů oblačnosti z výše zvolených kanálů. Tyto hodnoty byly následně exportovány do souboru formátu *.txt a nahrány do programu Microsoft Excel, v němž byly vykresleny jako histogramy do příslušných grafů pro jednotlivé zpracovávané dny (viz graf 1, 2).

Graf 1: Histogram průběhu spektrálních hodnot tlaku velmi nízké stratiformní oblačnosti



Zdroj: vlastní zpracování

Graf 2: Histogram průběhu spektrálních hodnot teploty velmi nízké stratiformní oblačnosti



Zdroj: vlastní zpracování

Na základě vytvořených histogramů a studia spektrálních křivek chování různých druhů oblačnosti v rámci zvolených kanálů (viz příloha 4), bylo možné definovat klasifikační příznaky a sestavovat z nich klasifikační pravidla pro určování různých druhů oblačnosti. Tato klasifikační pravidla byla využita zejména při klasifikaci metodou prahování.

a) K-means

První použitou klasifikační metodou byla metoda K-means. Klasifikátor K-means je řazen mezi metody neřízené klasifikace, v nichž jsou na základě vzájemné podobnosti hodnot víceobrazu f_m (x, y) automaticky vytvářeny shluky (angl., clusters). Proces neřízené klasifikace probíhá tak, že jsou nejdříve na základě posuzování hodnot víceobrazové funkce v rámci všech spektrálních pásem (kanálů) vytvářený shluky a poté jsou pixely pomocí iteračního výpočtu do příslušných shluků rozdělovány (HALOUNOVÁ, PAVELKA, 2005). U klasifikátoru K-means jsou nejdříve definovány počty shluků a jednotlivé pixely se poté zařazují do takového shluku, kterému jsou svými parametry nejblíže.

Pro aplikaci tohoto klasifikátoru na data MODIS Atmosphere byla v programu ENVI využita naprogramovaná metoda K-means. Nejoptimálnější nastavení vstupních parametrů se po vizuální kontrole výsledků s referenčním produktem CT projektu SAFNWC ukázalo u počtu shluků (12) a u počtu iterací (3).

b) Minimum Distance

Druhou použitou klasifikační metodou byla metoda minimální vzdálenosti (Minimum Distance). Klasifikátor Minimum Distance je z metod řízené klasifikace, v nichž je nutné předem definovat třídy pomocí reprezentativních příkladů (tzv. trénovacích množin). Proces klasifikace u Minimum Distance funguje tak, že je vypočítáván průměr pro všechny příznaky vzoru (trénovací množiny) pro každou třídu pro každý spektrální kanál víceobrazu. Tímto způsobem jsou vypočítány hodnoty těžišť tříd, které jsou poté porovnávány s hodnotami všech pixelů obrazu. Ke kterému z těžišť tříd má příslušný pixel nejmenší Euklidovskou vzdálenost podle vzorce:

$$D_E = \sqrt{\left(x_p - x_t\right)^2 + \left(y_p - y_t\right)^2}$$

, do té třídy je zařazen, pokud tato vzdálenost nepřekročí předem definovanou hodnotu prahu. Je-li tato hodnota překročena, objekt zůstává neklasifikován (HALOUNOVÁ, PAVELKA, 2005).

c) Mahalanobis Distance

Vedle klasifikátoru Minimum Distance založeného na Euklidovské vzdálenosti, byl vyzkoušen i klasifikátor Mahalanobis Distance, který je obdobou metody Minimum Distance, avšak vzdálenost příslušných pixelů od těžišť tříd je vypočítávána podle vzorce:

$$D_M = \sqrt{\left(\bar{x}_p - \bar{x}_t\right)^T S^{-1}\left(\bar{x}_p - \bar{x}_t\right)}.$$

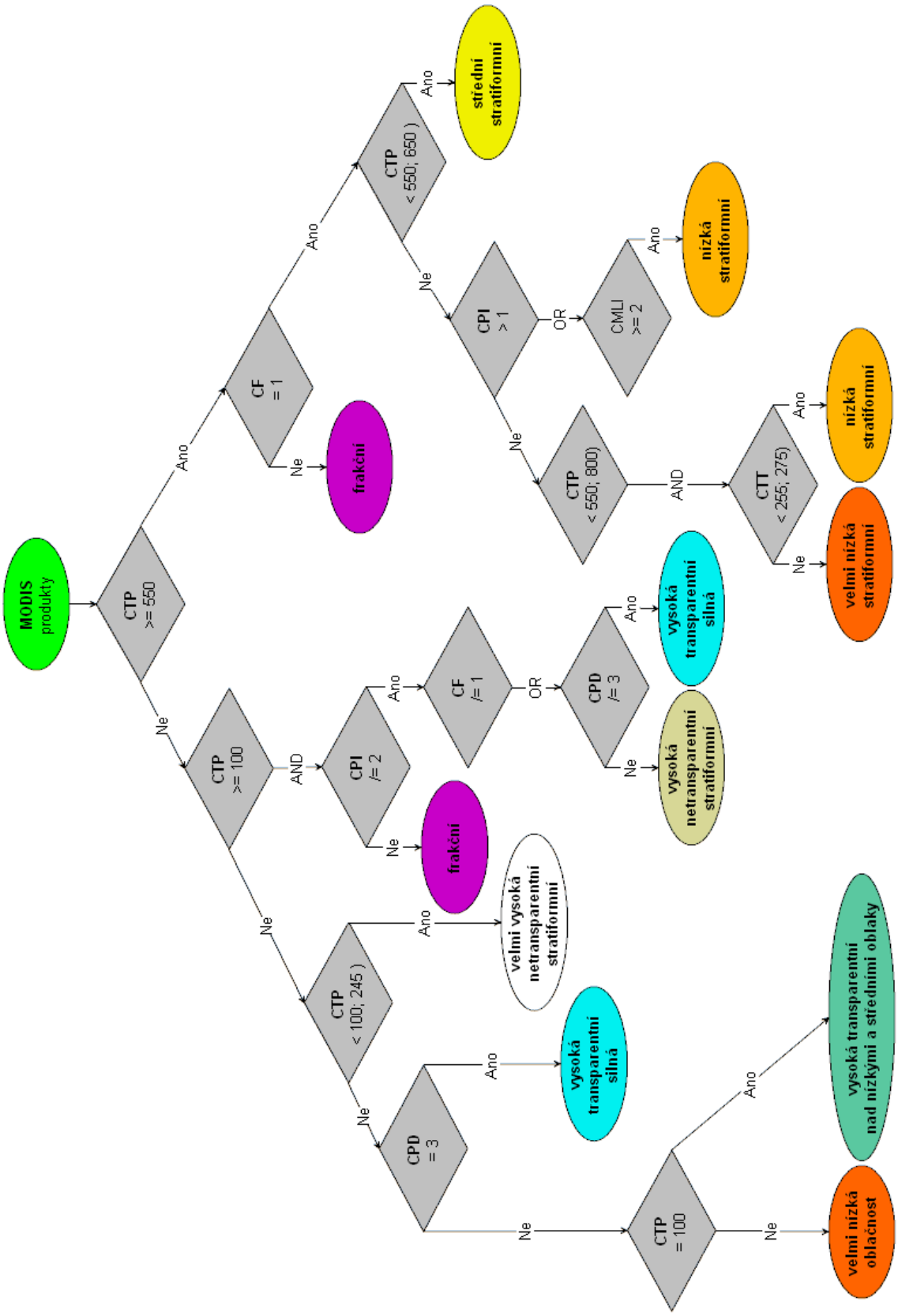
Pro aplikaci těchto klasifikátorů na data MODIS Atmosphere bylo v programu ENVI využito naprogramovaných metod Minimum Distance a Mahalanobis Distance.

d) Decision Tree

Čtvrtou použitou klasifikací byla metoda rozhodovacího algoritmu (angl., Decision Tree). Rozhodovací algoritmus je řetězcem několika postupně na sebe navazujících podmínek, které klasifikují všechny pixely víceobrazu do předem zvolených kategorií. Tyto dílčí podmínky jsou ve většině případů založeny na prahových hodnotách. Metoda prahování je určitý typ segmentace a nejjednodušší způsob klasifikace víceobrazu, kdy dochází k porovnávání hodnot pixelů s prahovou hodnotou, která je nejčastěji stanovena empiricky (KOLÁŘ, HALOUNOVÁ, PAVELKA, 1997).

Pro vytvoření rozhodovacího algoritmu a jeho aplikaci na data MODIS Atmosphere bylo v programu ENVI využito prostředí metody Decision Tree, ve kterém byl na základě definovaných klasifikačních pravidel vytvořen algoritmus určující stejné kategorie druhů oblačnosti jako produkt CT projektu SAFNWC (viz obrázek 10).

Obrázek 10: Rozhodovací algoritmus pro určování druhů oblačnosti z dat MODIS Atmosphere



Zdroj: vlastní zpracování

Vytvořený rozhodovací algoritmus (Decision Tree) využívá pro oddělení druhů oblačnosti na snímku prahových hodnot, které jsou zaneseny v rámci jednotlivých podmínek. Na základě nich se algoritmus rozhoduje, zda hodnoty vstupních pixelů podmínky splňují booleovské operátory pravda (Ano) nebo nepravda (Ne). V rámci jednotlivých podmínek pak byly použity aritmetické operátory (+, -, *, /, >, <, ≥, ≤, =, ≠) a v případě využití více podmínek najednou s větším množstvím produktů byly zapojeny i logické operátory (NOT, OR, XOR, AND).

Před samotným hodnocením přesnosti klasifikace, byly z důvodu získání informace, zda vlivem geografického rozložení nedochází ke změně její přesnosti, vytvořeny celkem tři masky území Evropy. Jednalo se o masky zemského povrchu, oceánů a moří a pobřeží. Maska pobřeží byla definovaná obalovou zónou (angl., Buffer) 50 kilometrů od pobřežní linie (viz obrázek 11).

Obrázek 11: Masky zemského povrchu, oceánů a moří a pobřeží nad územím Evropy

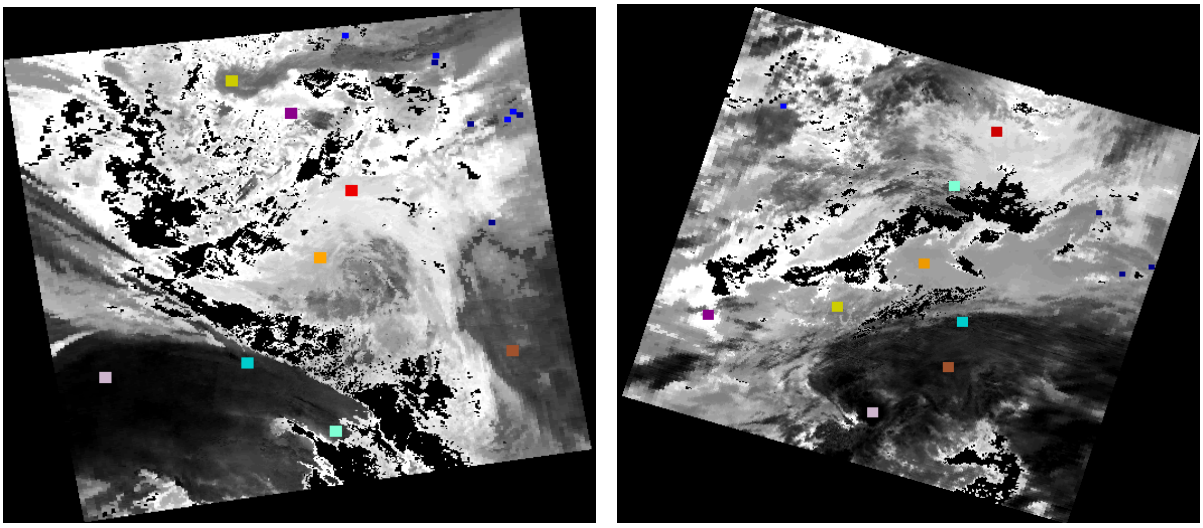
zemský povrch oceány a moře pobřeží

Zdroj: vlastní zpracování

Hodnocení přesnosti klasifikace bylo provedeno u snímků bez aplikace masek (celá scéna) definováním testovacích ploch nad referenčními daty produktu CT projektu SAFNWC. Definice testovacích ploch byla provedena v programu ENVI na základě výběru objektů ROI, kdy pro každý druh oblačnosti byly vytvořeny příslušné ROI. Testovacími plochami byly

voleny vždy homogenní plochy nekontaminované jinými typy povrchů o velikosti 10 x 10 pixelů[5], které se svým prostorovým umístěním lišily od ploch trénovacích (viz obrázek 12).

Obrázek 12: Testovací plochy pro určení přesnosti klasifikace



Zdroj: vlastní zpracování

U hodnocení přesnosti klasifikace při aplikaci jednotlivých masek (zemský povrch, oceán a moře, pobřeží) bylo z důvodu nedostatku možností pro výběr jednotlivých testovacích ploch druhů oblačnosti využito prostorového překrytí klasifikací s referenčním snímkem produktu CT pro příslušné zpracovávané dny.

Úspěšnost klasifikace byla hodnocena na základě následujících ukazatelů:

- Overall Accuracy – vyjádření celkové úspěšnosti klasifikace (0 – 100%),
- Kappa index – vyjádření míry schody (přesnosti) mezi klasifikovaným a referenčním obrazem (0 – 1),
- Producer's Accuracy – pravděpodobnost, že referenční pixel byl správně klasifikován (0 – 100%),
- User's Accuracy – pravděpodobnost, že klasifikovaný pixel skutečně reprezentuje danou třídu (0 – 100%).

[5] Velikost testovacích ploch nebylo možné vždy z důvodu malých velikostí určitých druhů oblačnosti (např. vysoká silná transparentní oblačnost) na referenčních datech SAFNWC dodržet.

Tyto ukazatele byly v programu ENVI automaticky vygenerovány pomocí nástroje Confusion Matrix, následně exportovány do souborů formátu *.txt a nakonec statisticky upraveny a vyhodnoceny v programu Microsoft Excel.

5.3.5 Validace s pozemními měřeními

Posledním cílem diplomové práce byla stanovena validace výsledků s pozemními či jinými měřeními, která měla ověřit přesnost určení druhů oblačnosti z dat MODIS Atmosphere. Validace výsledků s jinými měřeními (tj. produkty určujícími druhy oblačnosti) nebyla možná z důvodu, že jedinému produktu (ISCCP), z něhož bylo možné získat data pro porovnání, byla ukončena činnost v roce 2008. Pro porovnání výsledků s pozemními měřeními SYNOP byly možnosti mnohem rozsáhlejší, ale pro provedení vizuální validace nad větším množstvím dat časově náročně splnitelné. Z tohoto důvodu bylo uskutečněno vizuální porovnání pouze v případě jednoho snímku.

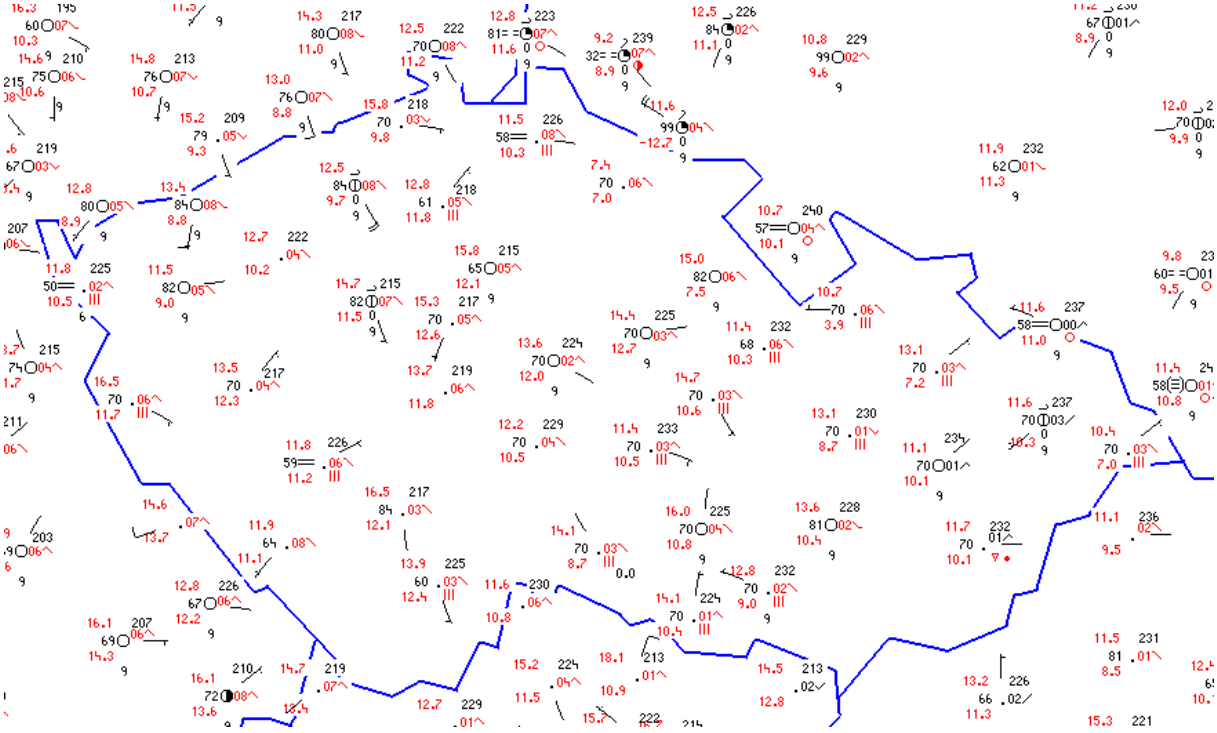
ČHMÚ provádí na svých měřících stanicích vedle měření ostatních hydrometeorologických jevů a procesů i určování druhů oblačnosti, které je společně s ostatními zaneseno do tzv. SYNOP zpráv. Jedná se o zakódovanou zprávu, kterou je možné rozšifrovat pouze nastudováním jednotlivých SYNOP kódů. ČHMÚ vlastní program, který tyto SYNOP zprávy dokáže vizualizovat do podoby SYNOP map (viz obrázek 13) pomocí zvoleného znakového klíče. Každý z druhů oblačnosti je na SYNOP mapách reprezentován jiným zástupným znakem (viz tabulka 22).

Tabulka 22: Zástupné znaky různých druhů oblačnosti v SYNOP zprávách

Stanice: 10 480	**Celková oblačnost**	0/8	**Výška**	**Tlak**	1017,2 hPa (QFF)
	Nejnižší oblačnost	-	jasno	**Tlaková tendence**	1,8 hPa
5.8 172 80 18 -2.2 9	**Střední oblačnost** **Vysoká oblačnost**	- -			stupal a pak klesal
	Směr větru	210°		(nižší než před třemi hodinami)	
	Rychlost větru	02 m/s		**Teplota**	5,8°C
Datum: 16.12.04	**Dohlednost**	30 km		**Rosný bod**	-2,2°C
Čas: 10.00 UTC	**Stav počasí**	-		**Průběh počasí**	-
Zpráva SYNOP: 10480 42980 02102 10058 21022 39985 40172 58018 333 55310=					

Zdroj: ČHMÚ, 2011

Obrázek 13: Ukázka SYNOP zprávy vizualizované do mapové podoby



Zdroj: ČHMÚ, 2011

Pro účel vizuální validace nejúspěšnější vytvořené klasifikace s pozemními měřeními muselo být nejdříve provedeno sjednocení druhů oblačnosti definovaných v rámci produktu CT projektu SAFNWC s druhy oblačnosti definovanými znakovým klíčem pro zprávy SYNOP (viz příloha 3).

Validace výsledků klasifikace dat MODIS Atmosphere se SYNOP mapami byla provedena v programu ArcGIS. Jelikož SYNOP mapové podklady nebyly zaneseny do žádného souřadného systému, tak bylo potřeba provést jejich ztotožnění za pomoci nástroje Georeferencing a definice 10 VLB rovnoměrně rozmístěných po celém snímku.

Následně již mohla být provedena vizuální interpretaci a validace výsledků.

6 VÝSLEDKY A DISKUZE

V rámci diplomové práce byly zpracovávány výsledky z každé ze zpracovatelských částí (viz kapitola 5). V podkapitole předzpracování dat byla hodnocena přesnost georeference a následného ztotožnění dat SAFNWC a MODIS Atmosphere pomocí statistických vzorců pro výpočet (rozdílů souřadnic, směrodatné odchylky, střední kvadratické chyby). V rámci podkapitoly korelace dat byla hodnocena míra podobnosti produktů z projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere pomocí statistických vzorců (korelační koeficient, průměrná odchylka, směrodatná odchylka). V podkapitole klasifikace bylo pro hodnocení její úspěšnosti využito výpočtů celkové přesnosti, kappa indexu, zpracovatelské a uživatelské přesnosti. Nakonec v podkapitole validace s pozemními měřeními byla provedena vizuální kontrola úspěšnosti vybrané nejúspěšnější klasifikace dat MODIS Atmosphere se SYNOP mapou na základě jejich vzájemného překrytí.

6.1 Georeference a ztotožnění

Z důvodu získání možnosti vzájemného porovnávání a provádění prostorových analýz nad daty SAFNWC a MODIS Atmosphere, byla provedena jejich geometrická transformace do zvoleného souřadnicového systému WGS 84/UTM zone 33N, která se skládala ze dvou kroků (viz kapitola 5.3.2).

Úspěšnost georeference dat SAFNWC a MODIS Atmosphere byla hodnocena na základě průměrných hodnot rozdílů souřadnic v osách x, y (d_x, d_y), směrodatné odchylky v osách x, y (σ_x, σ_y) a střední kvadratické chyby ($RMSE_x$, $RMSE_y$, RMSE) pro všechny zpracované dny. Přesnost georeference nabývala hodnot průměrné směrodatné odchylky v ose x (σ_x = 3,12 pixelu) a v ose y (σ_y = 2,46 pixelu), střední kvadratické chyby v ose x ($RMSE_x$ = 2,84 pixelu) a v ose y ($RMSE_y$ = 3,06 pixelu) a celková střední kvadratická chyba RMSE = 1,30 pixelu (viz tabulka 23).

Tabulka 23: Hodnocení přesnosti georeference dat SAFNWC a MODIS Atmosphere

id	*dx_vlb*	*dy_vlb*	*σx_vlb*	*σy_vlb*	*RMSEx_vlb*	*RMSEy_vlb*	*RMSE_vlb*
0103	1,92	1,50	5,11	1,91	3,88	2,39	1,68
0105	0,50	0,67	1,59	2,02	1,67	2,12	1,31
0106	0,63	0,71	2,09	0,91	1,79	1,15	1,64
0206	0,42	1,71	1,02	1,41	1,10	1,80	0,74
0214	0,21	0,83	1,77	2,63	1,74	2,68	1,80
0220	0,67	2,17	1,70	2,33	1,24	2,80	1,26
0705	1,75	3,71	9,20	4,91	9,37	5,84	1,37
0725	0,75	1,96	1,55	2,57	0,85	3,00	0,23
0729	1,75	3,13	3,88	3,33	2,42	4,35	1,68
0813	3,25	2,79	1,66	2,00	3,65	3,40	0,71
0824	2,21	3,50	2,46	2,82	3,30	4,30	1,85
0830	2,54	1,54	5,35	2,68	3,04	2,92	1,37
μ	1,38	2,02	3,12	2,46	2,84	3,06	1,30

Zdroj: vlastní zpracování

Georeference s přesnostmi směrodatných odchylek (σ_x, σ_y) a středních kvadratických chyb ($RMSE_x$, $RMSE_y$) v obou osách vyššími než 2 pixely a celkovou chybou RMSE = 1,30 pixelu, nemohla být považována pro možnosti porovnávání a prostorových analýz dat SAFNWC a MODIS Atmosphere za dostačující. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno ke ztotožnění dat SAFNWC a MODIS Atmosphere pomocí 1. polynomické transformace (afinní). Přesnost a úspěšnost ztotožnění byla hodnocena opět na základě výše uvedených statistických ukazatelů.

Po ztotožnění dat se přesnosti směrodatných odchylek (σ_x, σ_y) snížily v obou osách pod 2 pixely, středních kvadratických chyb ($RMSE_x$, $RMSE_y$) v obou osách na hodnoty okolo 1 pixelu a celková střední kvadratická chyba RMSE na 0,52 pixelu (viz tabulka 24).

Tabulka 24: Hodnocení přesnosti ztotožnění dat SAFNWC a MODIS Atmosphere

id	*dx_gcp*	*dy_gcp*	*σx_gcp*	*σy_gcp*	*RMSEx_gcp*	*RMSEy_gcp*	*RMSE_gcp*
0103	0,33	0,54	1,67	1,59	0,63	0,96	0,57
0105	0,50	0,71	1,46	1,18	1,18	1,36	0,61
0106	0,83	0,54	1,48	0,70	0,87	0,88	0,34
0206	0,75	0,50	1,22	0,63	0,83	0,80	0,30
0214	0,04	0,00	0,74	0,80	0,70	0,78	0,66
0220	0,38	0,63	1,13	0,59	0,57	0,86	0,50
0705	0,88	2,29	2,95	4,43	1,60	2,93	0,81
0725	0,17	0,00	1,35	1,11	1,00	0,82	0,60
0729	0,21	0,58	2,03	1,48	0,59	1,08	0,38

0813	0,08	0,04	3,54	3,28	1,18	0,68	0,68
0824	0,21	0,25	2,45	2,52	0,47	0,60	0,46
0830	1,04	0,71	3,59	1,86	1,07	0,77	0,29
μ	0,45	0,57	1,97	1,68	0,89	1,04	0,52

Zdroj: vlastní zpracování

Tento výsledek prostorového ztotožnění dat SAFNWC a MODIS Atmosphere byl, vzhledem k nízkému počtu VLB a GCP kvůli nedostatku možnosti jejich kvalitního zanesení, považován za kvalitní a s vědomím si těchto chyb ($RMSE_x$, $RMSE_y$) okolo 1 pixelu a celkové chyby (RMSE) okolo 0,5 pixelu bylo pracováno dále.

diskuze georeference a ztotožnění

Přesnost geometrické transformace dat SAFNWC a MODIS Atmosphere během procesů georeference a ztotožnění ovlivnily následující skutečnosti.

První z nich plynula z formátu dat HDF5, do nichž nebyly zaneseny žádné doprovodné informace pro jejich georeferenci a z nemožnosti pracovat v komerčních programech (např. ENVI, ArcGIS, apod.) s geostacionární družicovou projekcí (GEOS). Z tohoto důvodu muselo být pro georeferenci dat SAFNWC použito nestandardní řešení, které využívalo knihoven PROJ.4 a GDAL a jako referenčních podkladů již georeferencovaných dat MODIS Atmosphere.

Druhou skutečností bylo rozsáhlé pokrytí snímků oblačností, což bylo na druhou stranu pro analýzy a určování jejích druhů klasifikacemi vyžadováno. Podstatně to však při procesu ztotožnění dat ovlivnilo možnosti volby VLB i GCP bodů, protože míst pro jejich zvolení nebyl dostatek a jejich rovnoměrné rozmístění bylo v některých případech jen těžko dosažitelné.

Třetí vychází z druhé skutečnosti. Jelikož totiž nebyl vybrán dostatečný počet VLB pro georeferenci a ztotožnění dat, tak nebylo možné zvolit jiný typ geometrické transformace nežli polynomickou 1. řádu (afinní).

Ve výsledku lze považovat georeferenci a ztotožnění dat SAFNWC a MODIS Atmosphere vzhledem k výše uvedeným skutečnostem za kvalitní, ale dovoluji si tvrdit, že v případě možnosti práce v komerčních programech s projekcí GEOS, možnosti zanesení většího množství VLB a tedy i volby jiných geometrických transformací by se výsledky georeference a ztotožnění dat ještě o něco zlepšily.

6.2 Korelace

Pro zjištění vzájemného vztahu mezi shodnými produkty (CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$ a CTT_{SAFNWC} x $CTT_{MODIS\ Atmosphere}$) vytvořenými v rámci projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere, byla provedena jejich analýza a vzájemné porovnání skládající se ze dvou kroků.

Prvním krokem bylo hodnocení vzájemného vztahu produktů na základě výpočtu statistických ukazatelů korelačního koeficientu (Correl), průměrné odchylky ($\overline{d}$) a směrodatné odchylky (σ) pro všechny zpracované dny. Výsledky všech statistických ukazatelů se při vzájemném porovnávání produktů (CTP a CTT) lišily. V případě výpočtu korelačního koeficientu (Correl) bylo u produktů CTP dosaženo průměrné hodnoty $Correl_{\mu}$ = 0,863 a u produktů CTT průměrné hodnoty $Correl_{\mu}$ = 0,968. Při výpočtu průměrné odchylky ($\overline{d}$) se rozdíl u produktů CTP lišil v průměru o $\overline{d}_{\mu}$ = 262,286 hPa a u výpočtu směrodatné odchylky (σ) v průměru o σ = 307,414 hPa. U produktů CTT bylo dosaženo hodnoty průměrné odchylky v průměru $\overline{d}_{\mu}$ = 78,550 K a směrodatné odchylky (σ) v průměru σ = 99,616 K (viz tabulka 25).

Tabulka 25: Hodnocení vzájemného vztahu produktů CTP, CTT

CTP	*Correl*	$\overline{d}$	σ
0103	0,973	363,032	392,732
0105	0,859	304,414	341,144
0106	0,853	193,381	248,901
0206	0,829	212,139	249,338
0214	0,934	193,833	265,116
0220	0,929	261,519	313,751
0705	0,802	311,908	346,969
0725	0,860	270,014	317,775
0729	0,833	213,259	257,666
0813	0,810	291,268	332,209
0824	0,808	310,009	348,722
0830	0,866	222,658	274,649
μ	0,863	262,286	307,414
min	0,802	193,381	248,901
max	0,973	363,032	392,732

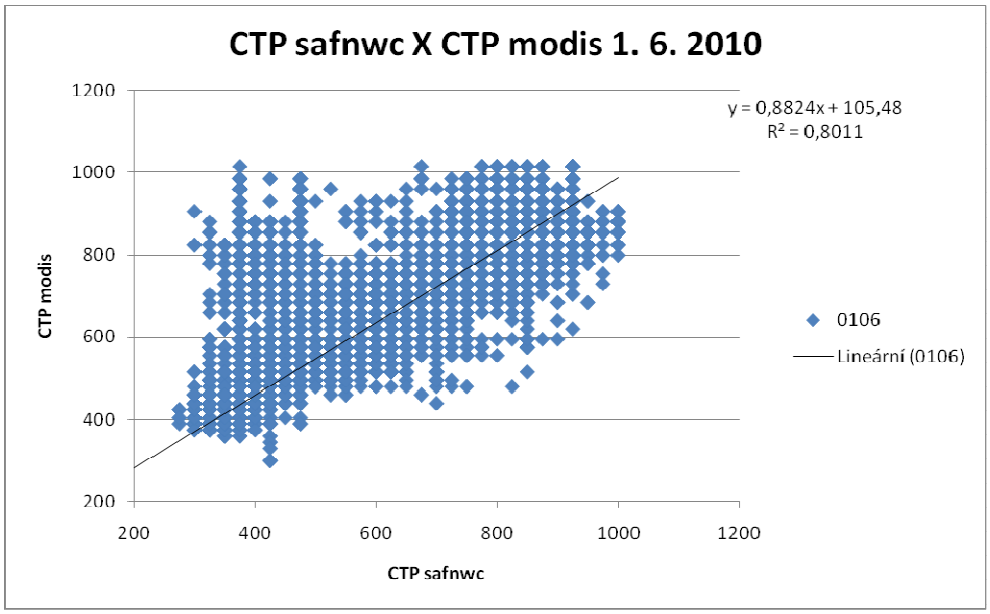
CTT	*Correl*	$\overline{d}$	σ
0103	0,997	117,364	123,138
0105	0,937	103,935	115,449
0106	0,971	46,792	76,328
0206	0,951	34,953	64,509
0214	0,963	55,892	84,706
0220	0,993	70,538	96,083
0705	0,952	111,088	122,732
0725	0,988	86,156	107,421
0729	0,986	49,563	81,140
0813	0,917	106,345	118,918
0824	0,992	105,582	119,536
0830	0,966	54,393	85,437
μ	0,968	78,550	99,616
min	0,917	34,953	64,509
max	0,997	117,364	123,138

Zdroj: vlastní zpracování

Z uvedených statistických ukazatelů vyplývá, že produkty (CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$) spolu silně korelují ($Correl_{\mu}$ = 0,863) a produkty (CTT_{SAFNWC} x $CTT_{MODIS\ Atmosphere}$) spolu korelují ještě o něco více ($Correl_{\mu}$ = 0,968) a jejich korelaci lze hodnotit jako velice silnou.

Druhým krokem hodnocení vzájemného vztahu produktů bylo zjištění rovnice regrese a určení míry spolehlivosti pro možnost úpravy hodnot mezi typy dat SAFNWC a MODIS Atmosphere. Po vykreslení závislostí produktů (CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$) a (CTT_{SAFNWC} x $CTT_{MODIS\ Atmosphere}$) do XY bodových grafů, bylo zjištěno, že obě závislosti produktů (CTP, CTT) je možné proložit lineární trendovou křivku (viz graf 3).

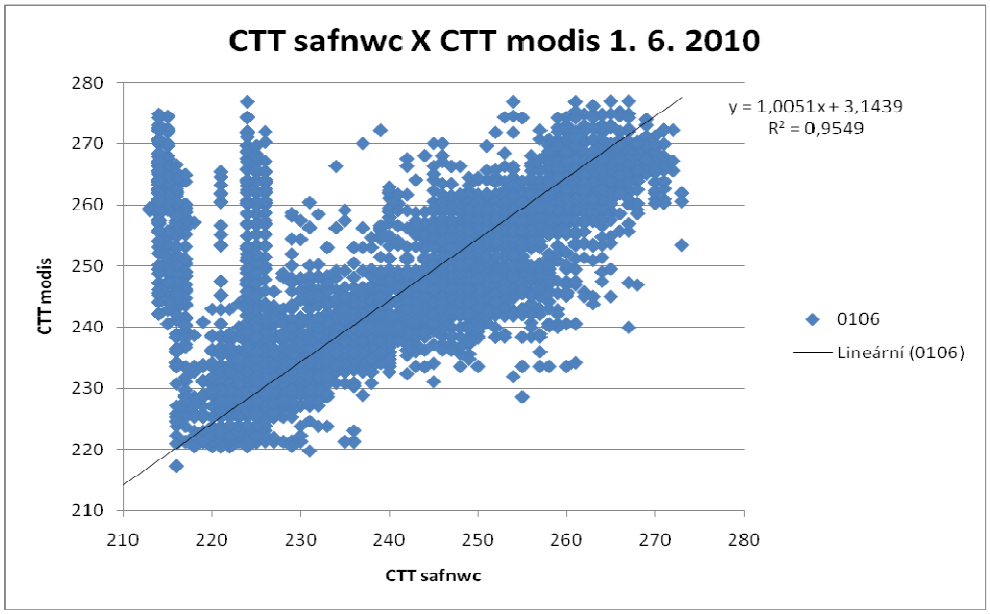
Graf 3: Závislost produktů CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$ s lineárním trendem v datech



Zdroj: vlastní zpracování

V některých grafech se však důsledkem nepřesného prostorového ztotožnění dat SAFNWC a MODIS Atmosphere (viz kapitola 6.1) vyskytovaly anomálie, kdy hodnotu z dat SAFNWC prostorově překrývala hodnota z dat MODIS Atmosphere, která byla řádově o stovky hPa (CTP) či desítky K (CTT) jiná (viz graf 4, vlevo nahoře). Tyto anomálie měly samozřejmě vliv i na výpočet rovnice regrese a určení míry spolehlivosti.

Graf 4: Závislost produktů CTT_{SAFNWC} x $CTT_{MODIS\ Atmosphere}$ s lineárním trendem a ukázkou anomálií



Zdroj: vlastní zpracování

Po získání rovnic lineární regrese pro oba typy produktů (CTP, CTT) v jednotlivých dnech a zprůměrování jejích dílčích parametrů, byl získán univerzální předpis rovnic pro možnost převodu hodnot mezi typy dat SAFNWC a MODIS Atmosphere, které mají následující podobu:

CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$ $\quad y = 0{,}899x + 71{,}903$

CTT_{SAFNWC} x $CTT_{MODIS\ Atmosphere}$ $\quad y = 0{,}989x + 3{,}668$

s mírou spolehlivosti R^2 = 0,786 u produktů CTP a R^2 = 0,945 u produktů CTT (viz tabulka 26).

Tabulka 26: Rovnice lineární regrese a míry spolehlivosti

CTP	*x*	*k*	*R²*
0103	1,009	20,783	0,943
0105	0,965	57,147	0,816
0106	0,882	105,480	0,801
0206	0,835	105,110	0,744
0214	0,993	25,945	0,893
0220	0,981	33,982	0,907
0705	0,905	94,517	0,737
0725	0,739	148,490	0,500
0729	0,902	75,474	0,825
0813	0,794	106,740	0,620
0824	0,850	56,399	0,769

CTT	*x*	*k*	*R²*
0103	1,015	0,437	0,996
0105	0,982	5,320	0,896
0106	1,005	3,144	0,955
0206	0,985	4,254	0,925
0214	0,999	2,246	0,954
0220	1,001	1,275	0,991
0705	0,994	4,795	0,932
0725	0,965	11,928	0,923
0729	0,996	2,007	0,989
0813	0,947	5,841	0,834
0824	1,001	2,037	0,988

0830	0,928	32,765	0,871	*0830*	0,984	0,728	0,955
μ	0,899	71,903	0,786	***μ***	0,989	3,668	0,945

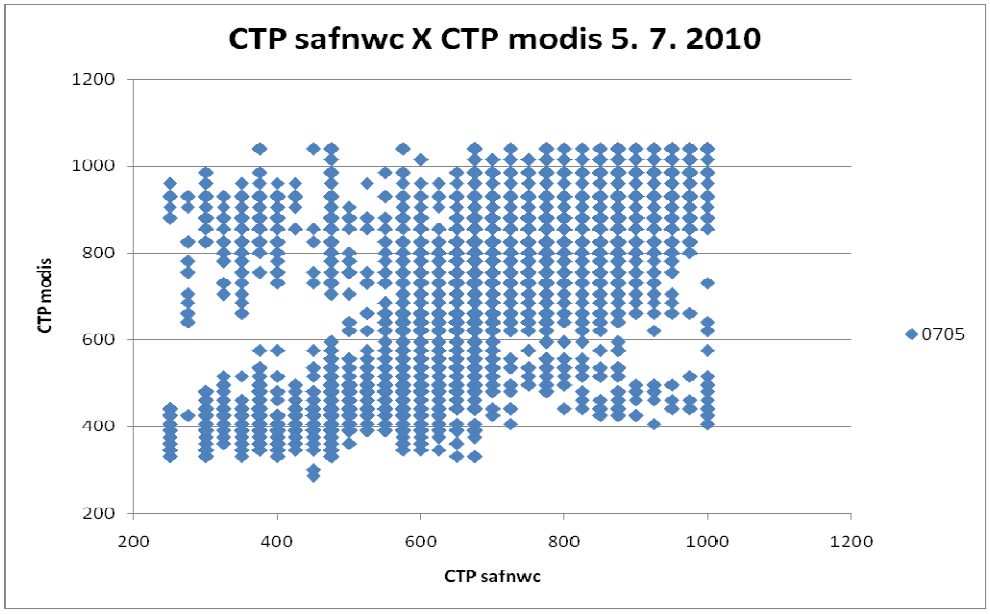
Zdroj: vlastní zpracování

diskuze korelace

Výsledky korelace dat SAFNWC a MODIS Atmosphere byly ovlivňovány dvěma faktory.

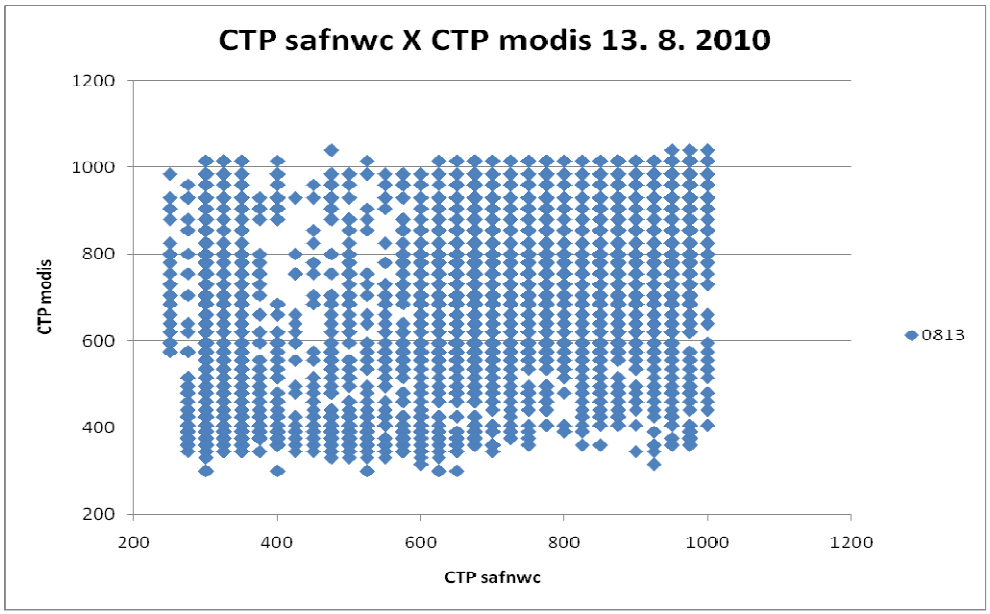
Prvním z nich byla přesnost prostorového ztotožnění dat SAFNWC a MODIS Atmosphere. Ve zpracovávaných dnech s nejvyšší celkovou chybou RMSE dne 5. 7. 2010 (0,81 pixelu) a dne 13. 8. 2010 (0,68 pixelu) tedy došlo k tomu, že po vykreslení závislostí hodnot produktů do XY bodového grafu, vznikl velký počet anomálií a bylo velice obtížné až téměř nemožné sledovat v těchto datech jakýkoliv trend (viz graf 5, 6).

Graf 5: Závislost produktů CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$ ovlivněný velkým počtem anomálií



Zdroj: vlastní zpracování

Graf 6: Závislost produktů CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$ ovlivněný velkým počtem anomálií



Zdroj: vlastní zpracování

Druhým faktorem byla zpracovávaná velikost rastru, která vstupovala do analýzy. Velikost rastru, nad kterým byly vypočítávány ukazatele korelace, byla z důvodu velikosti sešitu Microsoft Excel 2003 (65 536 řádků a 255 sloupců) omezena pouze na 100 x 100 buněk (tedy 100 x 100 pixelů rastru). Tento fakt mohl, ale nemusel určitým způsobem zkreslit výsledky jednotlivých ukazatelů a tedy i celkový výsledek korelace produktů SAFNWC a MODIS Atmosphere.

Pro zpřesnění výpočtu ukazatelů korelace nad celými rastry by mohl posloužit algoritmus, který by automaticky z dat odstraňoval vzniklé anomálie. Dále by k lepším výsledkům napomohl nový formátu sešitu Microsoft Excel 2007 (.*xlsx), který oproti formátu použitému sešitu Microsoft Excel 2003 (*.xls) navýšil počet sloupců na 16 384 a řádků na 1 048 576, popřípadě jiné programy pro výpočet statistických ukazatelů jako např. R, Statistika apod.

6.3 Klasifikace

Pro vytipování druhů oblačnosti a situací, u nichž dochází k selhání vybraných produktů, nebo kdy se výsledky vybraných produktů odvozených z přístrojů SEVIRI a MODIS výrazně liší, bylo využito klasifikátorů Decision Tree, K-means, Minimum Distance

a Mahalanobis Distance (viz kapitola 5.3.4), které byly aplikovány nad maskami zemského povrchu, oceánů a moří a pobřeží i nad celými scénami snímků.

a) Decision Tree

Metodou klasifikace Decision Tree na základě vytvořeného rozhodovacího prahovacího algoritmu, byla ve výsledku (viz tabulka 27) vykázána celková úspěšnost klasifikace (43,69%) a kappa indexu (0,37). Dobrých výsledků oproti ostatním dosahovala uživatelská přesnost tříd velmi nízké a nízké stratiformní oblačnosti s úspěšností výsledků (68,07% resp. 69,10%). Nejhůře pak byly klasifikovány třídy vysoká netransparentní stratiformní oblačnost a vysoká transparentní silná oblačnost (17,12% resp. 18,34%).

Tabulka 27: Hodnocené přesnosti klasifikátoru Decision Tree

		Celkem	
Decision Tree		Celková přesnost	43,69%
		Kappa koeficient	0,37
		Zpracovatelská Přesnost	Uživatelská Přesnost
Velmi nízká stratiformní oblačnost		74,75	68,07
Nízká stratiformní oblačnost		84,67	69,10
Střední stratiformní oblačnost		37,08	48,30
Vysoká netransparentní stratiformní oblačnost		13,92	17,12
Velmi vysoká netransparentní stratiformní oblačnost		27,33	31,46
Vysoká transparentní slabá oblačnost		0,00	0,00
Vysoká transparentní středně silná oblačnost		0,00	0,00
Vysoká transparentní silná oblačnost		72,42	18,34
Vysoká transparentní oblačnost nad nízkými nebo středními oblaky		16,89	33,97
Frakční oblačnost		53,67	63,01
	μ	38,07	34,94

Zdroj: vlastní zpracování

diskuze Decision Tree

Výsledek celkové přesnosti klasifikace metodou Decision Tree byl ovlivněn hlavně tím, že do výpočtu nevstupovaly klasifikační kategorie (vysoká transparentní slabá a vysoká transparentní středně silná oblačnost), které nebylo možné na základě analýzy spektrálních křivek chování druhů oblačnosti od ostatních pomocí vybraných charakteristik odlišit.

Faktorem, který negativně ovlivnil úspěšnost uživatelské přesnosti u tříd velmi vysoké a vysoké netransparentní stratiformní oblačnosti s vysokou transparentní silnou oblačností

bylo nastavení produktu CF (Cloud Fraction), který byl klíčovým příznakem pro jejich oddělení. Nebylo totiž možné najít vhodnou prahovou hodnotu v intervalu 0 – 1, kterých CF nabývá, právě pro odlišení mezi netransparentní a transparentní oblačností, což zapříčinilo časté zaměňování pixelů výše uvedených tříd (viz tabulka 28) a snížilo tak úspěšnost klasifikace.

Tabulka 28: Kontingenční tabulka klasifikátoru Decision Tree

Třída	VNS	NSO	SSO	VNS	VVNS	VTSl	VTSSi	VTSi	VTONS	FO
Velmi nízká stratiformní oblačnost	100	2	0	0	0	0	0	0	24	26
Nízká stratiformní oblačnost	0	98	0	0	0	0	0	0	0	2
Střední stratiformní oblačnost	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vysoká netransparentní stratiformní oblačnost	0	0	28	8	0	6	0	36	0	0
Velmi vysoká netransparentní stratiformní oblačnost	0	0	0	0	5	0	5	6	0	0
Vysoká transparentní slabá oblačnost	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vysoká transparentní středně silná oblačnost	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vysoká transparentní silná oblačnost	0	0	72	92	95	81	59	54	4	0
Vysoká transparentní nad nízkými nebo středními oblaky	0	0	0	0	0	6	5	2	0	0
Frakční oblačnost	0	0	0	0	0	6	32	2	72	72
Celkem	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Zdroj: vlastní zpracování

b) K-means

Aplikací klasifikátoru K-means bylo ve výsledku (viz tabulka 29) dosaženo celkové úspěšnosti klasifikace (35,78%) a kappa indexu (0,28). Dobrých výsledků oproti ostatním dosahovala uživatelská přesnost tříd nízké stratiformní oblačnosti a střední stratiformní oblačnosti, jejichž výsledky byly (67,98% resp. 65,32%). Nejhůře pak byly klasifikovány třídy vysoká transparentní slabá oblačnost a vysoká transparentní silná oblačnost (20,17% resp. 13,79%).

Tabulka 29: Hodnocené přesnosti klasifikátoru K-means

	Celkem	
K-Means	Celková přesnost	35,78%
	Kappa koeficient	0,28
	Zpracovatelská Přesnost	Uživatelská Přesnost
Velmi nízká stratiformní oblačnost	48,33	48,09
Nízká stratiformní oblačnost	84,25	67,98
Střední stratiformní oblačnost	47,00	65,32
Vysoká netransparentní stratiformní oblačnost	0,00	0,00

Velmi vysoká netransparentní stratiformní oblačnost		0,00	0,00
Vysoká transparentní slabá oblačnost		7,31	20,17
Vysoká transparentní středně silná oblačnost		0,00	0,00
Vysoká transparentní silná oblačnost		50,17	13,79
Vysoká transparentní oblačnost nad nízkými nebo středními oblaky		0,00	0,00
Frakční oblačnost		71,78	40,91
	μ	30,88	25,62

Zdroj: vlastní zpracování

diskuze K-means

Výsledek klasifikace metodou K-means ukazuje nemožnost rozpoznání tříd velmi vysoká netransparentní stratiformní oblačnost, vysoká transparentní slabá oblačnost a vysoká transparentní silná oblačnost (viz tabulka 30).

Tabulka 30: Kontingenční tabulka klasifikátoru K-means

Třída	VNS	NSO	SSO	VNS	VVNS	VTSl	VTSSi	VTSi	VTONS	FO
Velmi nízká stratiformní oblačnost	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28
Nízká stratiformní oblačnost	42	91	0	0	0	0	4	0	9	6
Střední stratiformní oblačnost	0	0	14	2	0	0	0	0	0	0
Vysoká netransparentní stratiformní oblačnost	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Velmi vysoká netransparentní stratiformní oblačnost	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vysoká transparentní slabá oblačnost	58	9	0	0	0	0	0	0	0	10
Vysoká transparentní středně silná oblačnost	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vysoká transparentní silná oblačnost	0	0	64	0	0	0	0	0	0	0
Vysoká transparentní nad nízkými nebo středními oblaky	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frakční oblačnost	0	0	22	98	100	100	96	100	91	56
Celkem	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Zdroj: vlastní zpracování

c) Minimum a Mahalanobis Distance

Klasifikátory Mahalanobis a Minimum Distance se ve výsledcích celkových přesností v řádech jednotek procenta mírně liší (69,71% resp. 61,50%). To samé platí u kappa indexu kde je jejich rozdíl v řádech několika setin (0,66 resp. 0,57). Nejlépe klasifikovanými třídami v rámci uživatelské přesnosti byly v případě Mahalanobis Distance velmi nízká a střední stratiformní oblačnost (82,90% resp. 84,48%) a nejhůře klasifikovanými vysoká transparentní slabá a vysoká transparentní silná oblačnost (39,93% resp. 42,71%). U Minimum Distance byly nejlépe klasifikovány třídy velmi nízká a nízká stratiformní oblačnost (82,09% resp.

84,20%) a nejhůře vysoká transparentní slabá a vysoká transparentní středně silná oblačnost (25,18% resp. 20,26%), jak je možné vidět v tabulce 31.

Tabulka 31: Hodnocené přesnosti klasifikátoru Mahalanobis a Minimum Distance

		Celkem	
Mahalobis Distance		Celková přesnost	69,71%
		Kappa koeficient	0,66
		Zpracovatelská Přesnost	Uživatelská Přesnost
Velmi nízká stratiformní oblačnost		90,83	82,90
Nízká stratiformní oblačnost		97,75	80,00
Střední stratiformní oblačnost		82,00	84,48
Vysoká netransparentní stratiformní oblačnost		66,48	62,97
Velmi vysoká netransparentní stratiformní oblačnost		78,07	64,26
Vysoká transparentní slabá oblačnost		38,90	39,93
Vysoká transparentní středně silná oblačnost		38,84	50,64
Vysoká transparentní silná oblačnost		55,35	42,71
Vysoká transparentní oblačnost nad nízkými nebo středními oblaky		52,68	63,36
Frakční oblačnost		39,75	66,34
	μ	64,06	63,76

		Celkem	
Minimum Distance		Celková přesnost	61,50%
		Kappa koeficient	0,57
		Zpracovatelská Přesnost	Uživatelská Přesnost
Velmi nízká stratiformní oblačnost		92,75	82,09
Nízká stratiformní oblačnost		78,42	84,20
Střední stratiformní oblačnost		68,12	80,60
Vysoká netransparentní stratiformní oblačnost		55,29	56,55
Velmi vysoká netransparentní stratiformní oblačnost		77,20	56,26
Vysoká transparentní slabá oblačnost		20,94	25,18
Vysoká transparentní středně silná oblačnost		19,17	20,26
Vysoká transparentní silná oblačnost		46,49	38,86
Vysoká transparentní oblačnost nad nízkými nebo středními oblaky		41,43	47,66
Frakční oblačnost		42,75	44,51
	μ	54,26	53,62

Zdroj: vlastní zpracování

diskuze Minimum a Mahalanobis Distance

Výsledky metod Mahalanobis a Minimum Distance dávají oproti ostatním metodám komplexní výsledky, kdy byly na snímcích klasifikovány všechny klasifikační třídy (druhy oblačnosti). Studiem kontingenčních tabulek u obou klasifikačních metod bylo zjištěno, že

dochází k časté záměně pixelů mezi třídami vysoké transparentní slabé, středně silné, silné nebo nad nízkými a středními oblaky, což zapříčiňuje jejich nižší procentuální uživatelskou přesnost (viz tabulka 33).

Tabulka 32: Kontingenční tabulka klasifikátoru Mahalanobis Distance

Třída	VNS	NSO	SSO	VNS	VVNS	VTSl	VTSSi	VTSi	VTONS	FO
Velmi nízká stratiformní oblačnost	99	0	0	0	0	2	0	0	16	0
Nízká stratiformní oblačnost	0	100	0	0	0	32	8	0	0	0
Střední stratiformní oblačnost	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
Vysoká netransparentní stratiformní oblačnost	0	0	0	100	0	0	4	21	0	0
Velmi vysoká netransparentní stratiformní oblačnost	0	0	0	0	100	0	24	23	0	0
Vysoká transparentní slabá oblačnost	0	0	0	0	0	20	4	0	32	0
Vysoká transparentní středně silná oblačnost	0	0	0	0	0	4	36	5	0	1
Vysoká transparentní silná oblačnost	0	0	0	0	0	0	22	51	0	0
Vysoká transparentní nad nízkými nebo středními oblaky	1	0	0	0	0	42	2	0	52	0
Frakční oblačnost	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99
Celkem	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Zdroj: vlastní zpracování

diskuze změny přesnosti klasifikace vlivem geografických podmínek

Přesnosti výše uvedených klasifikací druhů oblačnosti se aplikacemi jednotlivých masek (zemský povrch, oceány a moře, pobřeží) v závislosti na jejich geografické poloze nijak výrazně nelišily. Hodnoty celkové přesnosti a kappa indexu se z důvodu volby jiné metodiky při určování přesnosti (tj. překrytí s referenčním snímkem) pouze výrazně snížily. Tento fakt však byl zapříčiněn převážně nepřesným prostorovým ztotožněním dat SAFNWC a MODIS Atmosphere.

diskuze změny přesnosti klasifikace vlivem klimatických podmínek

Při zkoumání vlivu klimatických podmínek na přesnosti výše uvedených klasifikací druhů oblačnosti bylo zjištěno, že v rámci všech čtyř klasifikačních metod došlo k navýšení jejich celkové přesnosti v zimních měsících (leden, únor) v průměru o 9% oproti měsícům letním (červenec, srpen). Tento fakt lze přičítat skutečnosti, že oproti zimnímu období se v letních měsících se nad územím Evropy nevyskytovala v takové míře vysoká transparentní silná oblačnost, která byla na snímcích detekována pouze sporadicky, což zapříčinilo i pokles úspěšnosti její detekce z 64% (zimní období) na pouhých 21% (letní období).

diskuze celkové klasifikace

Vyhodnocení úspěšnosti použitých klasifikačních metod nad daty MODIS Atmosphere bylo založeno na porovnání kategorií (nízká, střední, transparentní a vysoká oblačnost), do kterých byly, podle pravidla aplikovaného při validaci produktu CT projektu SAFNWC (viz tabulka 11), nejprve jednotlivé klasifikované třídy rozřazeny. Výsledné vyhodnocení úspěšnosti klasifikátorů pak bylo prováděno právě nad těmito čtyřmi kategorizovanými skupinami oblačnosti (viz tabulka 33).

Tabulka 33: Vyhodnocení úspěšnosti jednotlivých klasifikátorů

	Nízká oblačnost	***Střední oblačnost***	***Transparentní oblačnost***	***Vysoká oblačnost***
Decision Tree	68,58%	48,30%	13,08%	24,29%
K-means	58,03%	65,32%	8,49%	0,00%
Mahalanobis Distance	81,45%	84,48%	49,16%	63,62%
Minimum Distance	83,14%	80,60%	32,99%	56,41%

Zdroj: vlastní zpracování

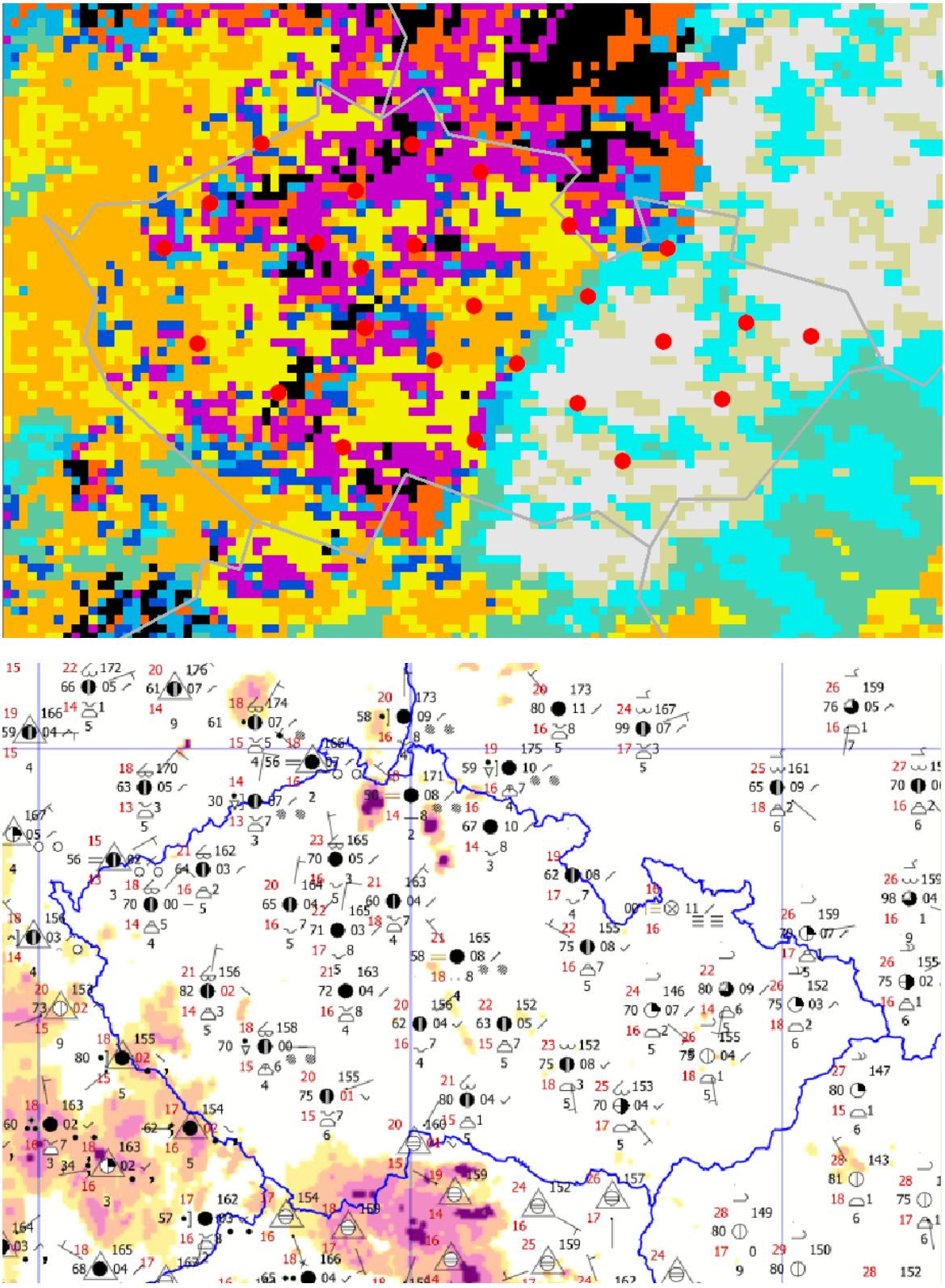
Nejvhodnějším klasifikátorem pro určování druhů oblačnosti z dat MODIS Atmosphere byl Mahalanobis Distance, který u tří ze čtyř kategorizovaných skupin dosáhl nejlepších výsledků, avšak i u nízké oblačnosti dosahoval výborných výsledků. Nejúspěšněji klasifikovanou třídou (druhem oblačnosti) byla střední oblačnost (84,48%) a nejhůře klasifikovanou byla oblačnost transparentní (49,16%).

Příčiny, které ovlivnily nízkou úspěšnost klasifikace transparentní oblačnosti, byly častá zaměnitelnost druhů slabá, středně silná, silná a oblačnost nad nízkými nebo středními oblaky. Tato skutečnost tedy padá na vrub použitému kanálu optické tloušťky (COT), pomocí kterého by měly být tyto druhy oblačnosti na základě této charakteristiky odlišitelné a špatnému nastavení kanálu propustnosti neboli frakce (CF), který byl jedním z klíčových kanálů pro rozpoznání netransparentní a transparentní oblačnosti.

6.4 Validace s pozemními měřeními

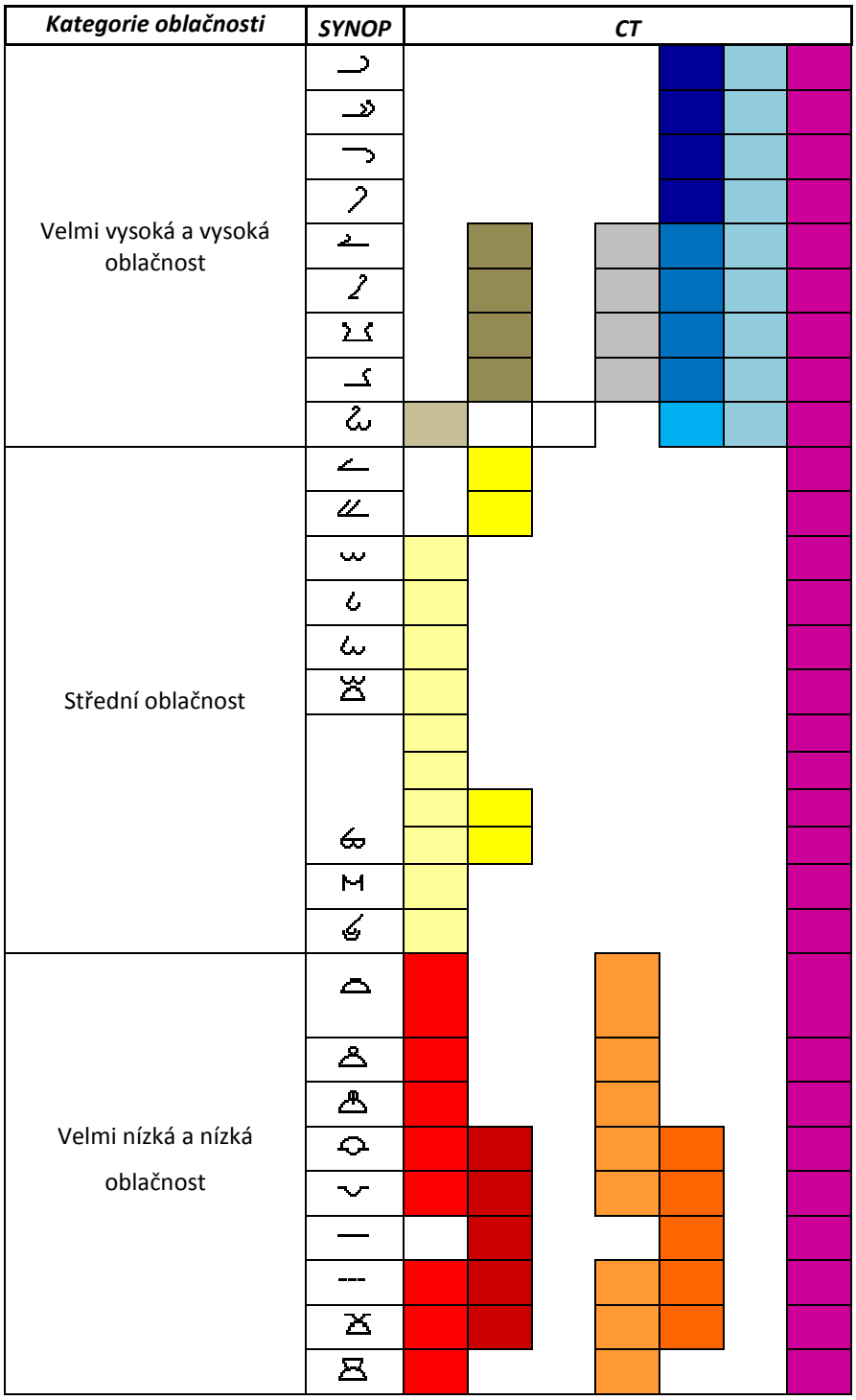
Vizuální validací nejúspěšnější klasifikační metody Mahalanobis Distance se SYNOP mapou na území České republiky ze dne 13. 8. 2010 (10 hodin UTC), byla zjištěna shoda na 3/4 z celkem 26 meteorologických stanic (viz obrázek 14).

Obrázek 14: Vizuální porovnání klasifikace dat MODIS Atmosphere a SYNOP mapy



Zdroj: vlastní zpracování

Tabulka 34: Legenda pro porovnání druhů oblačnosti z dat SYNOP a CT



Zdroj: vlastní zpracování

Podle stanovené legendy (viz tabulka 34) byla validace vyhodnocována jako správná v případě, kdy druhy oblačnosti z obou typů dat byly na jednotlivých stanicích zařazeny do stejné kategorie velmi vysoké a vysoké, střední, velmi nízké a nízké oblačnosti. Shody bylo

dosaženo ve východní části České republiky, kde uvádí SYNOP mapa i klasifikace Mahalanobis Distance výskyt vysoké a velmi vysoké oblačnosti. Stejně tak došlo ke shodě v jižní a jihozápadní části, kde byla na obou typech dat detekována střední, nízká a frakční oblačnost. Nejmenší shody bylo dosaženo ve střední a severní části republiky, kde klasifikace uvádí frakční, nízkou a střední oblačnost, kdežto SYNOP mapa ukazuje spíše bezoblačnost popř. nízkou oblačnost.

diskuze validace s pozemními měřeními

Validace klasifikací druhů oblačnosti z dat MODIS Atmosphere s druhy oblačnosti z dat SYNOP je velice závislá na subjektivním spojení klasifikovaných tříd z obou typů dat, zvolené metodice a úrovni kategorií oblačnosti od druhů oblačnosti (např. vysoká, střední, nízká, atd.) až po druhy oblačnosti (např. Ci, St, Cu, apod.).

Dále je důležité si uvědomit negativum porovnávání těchto dvou typů dat, kdy z družicových snímků je možné detekovat pouze vrchní vrstvu oblačnosti (tedy v případě netransparentní oblačnosti nevíme, zda se pod daným druhem oblačnosti nenachází ještě jiný), kdežto z pozemních měření je možné detekovat za ideálních podmínek druhy oblačnosti všech možných pater. Pozemní měření jsou však ovlivněny negativem lidského faktoru, který může hrát v některých případech negativní roli a je nutné brát jeho vliv také při práci těmito daty v potaz.

7 ZÁVĚR

Hodnocením základních produktů projektů SAFNWC a MODIS Atmosphere bylo v diplomové práci zjištěno, že organizace EUMETSAT v rámci svého projektu SAFNWC produkt pro klasifikaci druhů oblačnosti vytvořila (Cloud Type, CT), zatímco organizace NASA v rámci projektu MODIS Atmosphere nikoliv a naopak se snaží ve vytvořeném produktu (Cloud Product, CP) nabídnout širokou škálu dílčích charakteristik oblačnosti. Tohoto zjištění bylo využito při sestavování cílů diplomové práce, které se v první části týkaly především popisu všech základních produktů a vzájemného porovnání shodných produktů v rámci obou projektů. Ve druhé části pak byla provedena analýza vybraných charakteristik (kanálů) produktu CP důležitých pro určování druhů oblačnosti, na jejímž základě byl vytvořen vlastní prahovací algoritmus, který společně s dále využitými metodami řízené a neřízené klasifikace určoval různé druhy oblačnosti z dat MODIS Atmosphere. Výsledky a výstupy tohoto zkoumání byly poté porovnávány s výsledky a výstupy produktu CT pro určování druhů oblačnosti z dat SAFNWC. Třetí a poslední část pak byla věnována nastínění možnosti porovnání výsledků a výstupů s daty pozemních měření, které byly získány v mapové podobě.

Vzájemným porovnáváním shodných produktů v rámci obou projektů (CTP_{SAFNWC} x $CTP_{MODIS\ Atmosphere}$ a CTT_{SAFNWC} x $CTT_{MODIS\ Atmosphere}$) byla dokázána velká shoda mezi oběma typy produktů. U produktů CTP dosahovala korelace vysokých a u produktu CTT velmi vysokých hodnot. Po zjištění jejich lineární závislosti a proložení jimi vhodné trendové křivky (lineární), byl následně nalezen předpis v podobě rovnice lineární regrese, pomocí níž je možné s danou mírou spolehlivosti provádět převod hodnot mezi typy dat SAFNWC a MODIS Atmosphere pro produkty CTP a CTT.

Analýzou vybraných charakteristik (kanálů) produktu CP byly popsány spektrální průběhy hodnot pro jednotlivé druhy oblačnosti a nalezeny prahové hodnoty pro vytvoření vlastního prahovacího algoritmu (Decision Tree). Klasifikací a vzájemným porovnáním výsledků a výstupů s produktem CT projektu SAFNWC bylo zjištěno, že nejpřesnější a nejkomplexnější klasifikační metodou pro určování druhů oblačnosti z dat MODIS Atmosphere je klasifikátor Mahalanobis Distance, který dosahoval při porovnání nejlepších

výsledků. Druhým nejpřesnějším klasifikátorem byl Minimum Distance, což se vzhledem ke stejnému principu s metodou Mahalanobis Distance, dalo předpokládat. K selhání algoritmů naopak docházelo u klasifikátorů Decision Tree a K-means, kde klasifikátor Decision Tree nedokázal klasifikovat vysokou transparentní slabou oblačnost a vysokou transparentní středně silnou oblačnost a klasifikátor K-means měl problémy s určováním vysoké netransparentní stratiformní oblačnosti, velmi vysoké netransparentní stratiformní oblačnosti a vysoké transparentní středně silné oblačnosti. Nejúspěšněji klasifikovanými třídami v rámci všech klasifikačních metod pak byly druhy oblačnosti velmi nízká, nízká a střední stratiformní oblačnost. Nejhůře naopak byly klasifikovány všechny čtyři třídy vysoké transparentní oblačnosti.

Využitím masek zemského povrchu, oceánů a moří a pobřeží aplikovaných na klasifikované snímky jednotlivých zpracovávaných dní nebyl zjištěn žádný vliv geografických podmínek, které by jakýmkoliv způsobem ovlivňovaly přesnost jednotlivých klasifikací. Naopak vliv klimatických podmínek byl při zpracování dat patrný, kdy se celková úspěšnost klasifikace v zimních měsících oproti měsícům letním zvýšila.

Porovnání výsledků a výstupů z dat MODIS Atmosphere s daty pozemních měření v mapové podobě bylo založeno na prostorovém překrytí obou typů dat. Tato nastíněná možnost porovnání byla podložena i poměrně kvalitní shodou, která vycházela z vizuální validace výsledků. Z důvodu subjektivního spojení tříd druhů oblačnosti z dat SYNOP a produktu CT do společné legendy, je však nutné brát výsledky validace víceméně pouze jako orientační.

Zpracovávané téma, týkající se určování druhů oblačnosti, bylo zatím mimo okruh zájmu družicové meteorologie na území České republiky, která se spíše zaměřovala na detekci oblačnosti pomocí optických i radarových dat. Praktické využití dat (produktů) pro tento účel v komerčních programech (např. ENVI, ArcGIS, PCI Geomatica apod.), které nejsou na práci s nimi zcela uzpůsobené, ale obsahují nepřeberné množství nástrojů pro jejich analýzy, nebylo nastíněno téměř v žádných studiích. Z tohoto důvodu by měla tato diplomová práce sloužit jako příklad, teoreticko-praktický návod práce s těmito typy dat pro další a častější využívání základních produktů odvozených ze senzorů SEVIRI a MODIS pro určování druhů oblačnosti.

Uvedené výsledky mohou posloužit k posouzení reprezentativnosti údajů při určování druhů oblačnosti a jejich použitelnosti v rámci krátkodobých předpovědí. Pro zvýšení přesnosti určování by bylo určitě vhodné, aby bylo téma zpracováno více do hloubky a posouzeno větší množství ostatních charakteristik a možných faktorů. Toto však není možné uskutečnit bez detailní analýzy celkového chování a vývoje jednotlivých druhů oblačnosti a zahrnutí dalších typů dat (např. pozemní radarová měření, data z radarů a lidarů na oběžné dráze a případně experimentálních leteckých měření, apod.).

Další možnosti výzkumu bych viděl ve dvou směrech. Prvním z nich je pokračování v klasifikaci z produktů projektu MODIS Atmosphere. Zajímavým by zajisté bylo využití statistické metody řízené klasifikace Maximal Likelihood, pro kterou by bylo nejdříve nutné zjištění vhodných vstupních charakteristik (kanálů) z produktu CP, k čemuž by mohlo být například využito metody hlavních komponent (Principal Component, PC). Dále se nabízí i možnost využití objektové klasifikace, do které by bylo možné zapojit vedle spektrálních i texturální či tvarové příznaky, jejichž hodnoty je možné zjistit z různých odborných publikací zabývajících se klasifikací druhů oblačnosti.

Druhou z možností je klasifikace druhů oblačnosti přímo z družicových snímků pořízených senzorem MODIS doplněných radarovými daty například z nosičů CloudSat či CALIPSO. Na tato data by bylo opět možné aplikovat různé řízené, neřízené, objektové klasifikace či nějaký vlastními silami vytvořený algoritmus. Právě kombinaci optických a radarových dat popř. pouze radarovým datům využitým pro klasifikaci druhů oblačnosti bude totiž nejspíše patřit blízká budoucnost.

SEZNAM POUŽITÝCH PRAMENŮ A LITERATURY

ACKERMAN, S., FREY, R., STRABALA, K., LIU, Y., GUMLEY, L., BAUM B., MENZEL, P. 2010: *Discriminating Clear-Sky From Cloud With Modis Algorithm Theoretical Basis Document (MOD35).* 6th Version, Cooperative Institute for Meteorological Sattelite Studies, University of Wisconsin – Madison.

ATLAS OBLAKŮ: *Atlas oblaků* [online], poslední aktualizace 2005, [cit. 2011-03-06]. Dostupné z URL: <http://mraky.astronomie.cz>.

DALMACIA: *Meteorologie* [on-line], poslední aktualizace 2011, [cit. 2011-04-18]. Dostupné z URL: <http://www.dalmacia.org/ucebnitext/meteorologie.htm>.

DERRIEN, M. 2010: *Georeferencing information in SAFNWC/MSG raster products.* Météo - France/Centre de Météorologie Spatiale.

DERRIEN, M., GLÉAU, H., FERNANDEZ, P. 2010: *Algorithm Theoretical Basis Document for "Cloud Products".* 3th Version, Météo - France/Centre de Météorologie Spatiale.

EUMETSAT: *Atmosphere* [on-line], poslední aktualizace 2011, [cit. 2011-02-18]. Dostupné z URL: <http://www.eumetsat.int/Home/Main/DataProducts/Atmosphere/index.htm?l=en>.

EUMETSAT: *Meteosat Second Generation (MSG)* [on-line], poslední aktualizace 2011, [cit. 2011-02-13]. Dostupné z URL: <http://www.eumetsat.int/Home/Main/Satellites/MeteosatSecondGeneration/index.htm?l=en>.

EUMETSAT: *Meteosat Second Generation Instrument (SEVIRI)* [on-line], poslední aktualizace 2011, [cit. 2011-02-13]. Dostupné z URL: <http://www.eumetsat.int/Home/Main/Satellites/MeteosatSecondGeneration/Instruments/index.htm?l=en>.

EUMETSAT: *News* [on-line], poslední aktualizace 2011, [cit. 2011-02-18]. Dostupné z URL: <http://www.eumetsat.int/Home/index.htm>.

EUMETSAT: *Satellite Applications Facility in Nowcasting (NWC SAF)* [on-line], poslední aktualizace 2010, [cit. 2011-02-18]. Dostupné z URL <https://www.nwcsaf.org/HD/Main.jsp>.

EUMETSAT: *Validation Report for Cloud Products.* 2010. Météo - France/Centre de Météorologie Spatiale.

HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. 2005: Dálkový průzkum Země. Vydavatelství ČVUT v Praze, 192 s.

HDF: The HDF Group [on-line], poslední aktualizace 2011 [cit. 2011-08-02]. Dostupné z URL <http://www.hdfgroup.org/>.

CHEN, T, ROSSOW, W. B., ZHANG, Y. 2000: *Radiative Effects of Cloud-Type Variations.* J. Climate, 13, 264–286.

ISCCP: *International Satellite Cloud Climatology Project* [on-line], poslední aktualizace 2011 [cit. 2011-08-18]. Dostupné z URL <http://isccp.giss.nasa.gov/>.

ITT: *Code Library* [on-line], poslední aktualizace 2011 [cit. 2011-07-25]. Dostupné z URL <http://www.ittvis.com/UserCommunity/CodeLibrary.aspx>.

KARLSSON, K.-G., LILJAS, E. 1990: *The SMHI model for cloud and precipitation analysis from multispectral AVHRR data*. Swedish Meteorological and Hydrological Institute PROMIS Rep. 10, 74 pp.

KING, M., KAUFMAN, Y., MENZEL, P., TANRÉ, D. 1992: *Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS)*. IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, 30, 1-27pp.

KNIHOVNA AV ČR: *SPACE 40: Velká encyklopedie družic a kosmických sond* [on-line], © 2011, [cit. 2011-02-16]. Dostupné z URL: <http://www.lib.cas.cz/space.40>.

KOLÁŘ, J., HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. 1997: *Dálkový průzkum 10.* Vydavatelství ČVUT v Praze, 164 s.

LILJAS, E. 1981: *Analysis Of Clouds And Precipitation Through Automated Classification Of AVHRR Data*. SHMI Reports, RMK nr 32.

LUO, G., DAVIS P. A., STOWE L. L., MCCLAIN E. P. 1995: *A pixel-scale algorithm of cloud type, layer, and amount for AVHRR data.* Part I: Nighttime. J. Atmos. Oceanic. Technol., 12, 1013–1037.

MENZEL, P., FREY, R., BAUM, B. 2010: Cloud Top Properties And Cloud Phase Algorithm Theoretical Basis Document. 8th Version, Cooperative Institute for Meteorological Sattelite Studies, University of Wisconsin – Madison.

NASA: Images [on-line], poslední aktualizace 2011, [cit. 2011-08-02]. Dostupné z URL: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/IMAGES/index.html>.

NASA: *LAADS Web* [on-line], poslední aktualizace 2011, [cit. 2011-07-18]. Dostupné z URL: < http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>.

NASA: *MODIS Atmosphere* [on-line], poslední aktualizace 2011, [cit. 2011-02-18]. Dostupné z URL: <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/>.

NASA: *MODIS WEB* [on-line], poslední aktualizace 2011, [cit. 2011-02-23]. Dostupné z URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov/>.

PLATNICK, S., KING, M., ACKERMAN, S., MENZEL, P., BAUM, B., RIÉDI, J., FREY, R. (2003). *The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Aqua Special Issue (41), 459-473.

ROSSOW, W. B., SCHIFFER R. A., 1991: *ISCCP cloud data products*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 72, 2–20.

ROSSOW, W. B., SCHIFFER R. A. 1999: *Advances in understanding clouds from ISCCP*. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80, 2261–2286.

ŘEZÁČOVÁ, D., NOVÁK, P., KAŠPAR, M., SETVÁK, M. 2007: *Fyzika oblaků a srážek*. Praha: Academia, 576 s. ISBN 978-80-200-1505-1.

SCHMETZ, J., PILI, P., TJEMKES, S., JUST, D., KERMANN, J., ROTA, S., RATIER, A. 2002: *An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG).* American Meteorological Society, 16pp.

SASSEN, K., WANG, Z. 2008: *Classifying clouds aroung the globe with the CloudSat radar: 1-year of results*. Geophys. Res. Lett., 35, L04805, doi: 10.1029/2007GL032591.

SETVÁK M., 2004: *MSG – Meteosat druhé generace*. Meteorologické zprávy, 57, 15-20.

SETVÁK M., HLAVATÝ K., LAŠTOVIČKA J. 2002: *Meteorologické družice na počátku 21. století a jejich využití v České republice.* Československý časopis pro fyziku, 52, 240-249.

SKŘEHOT, P. 2004: *Klasifikace oblaků.* Meteorologická Operativní Rada (M.O.R.), sekce odborných studií a popularizace meteorologie (SOSPM), Praha.

SKŘEHOT, P. 2008: *Velký atlas oblaků.* Brno: Computer Press, 368 s. ISBN 978-80-251-2015-6.

WANG, Z., 2000: *Cloud property retrieval using combined groundbased remote sensors.* Ph.D. dissertation, University of Utah, 191 pp.

WANG, Z. SASSEN, K. 2001: *Cloud type and macrophysical property retrieval using multiple remote sensors*. J. Appl. Meteor., 40, 1665–1682.

WANG, Z. SASSEN, K. 2004: *An improved cloud classification algorithm based on the SGP CART site observations*. Proceedings of the ARM Science Team Meeting, 2004, New Mexico.

WANG, Z. SASSEN, K. 2007: *Level 2 Cloud Scenario Classification Product Process Description and Interface Control Document*. Ver. 5.0, Algorithm Process Description Documents, Colorado State Univ., Fort Collins, CO.

WILLIAMS, C. R., ECKLUND, W. L., GAGE, K. S. 1995: *Classification of precipitating clouds in the Tropics using 915-MHz wind profilers.* J. Atmos. Oceanic Technol., 12, 996–1012.

YANG, P. 2002: *Parameterization of cloud optical properties for a mixture of ice particles*, 11th confence on Atmospheric Radiation, June 3-7, 2002, Ogden, Utah.

ZELENKOVÁ, K. 2009: *Využití družicových dat pro určení rozsahu sněhové pokrývky*. Diplomová práce. PřF UK v Praze. 69 s.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Zpracovatelský postup korelace dat pomocí ModelBuilder v ArcGIS

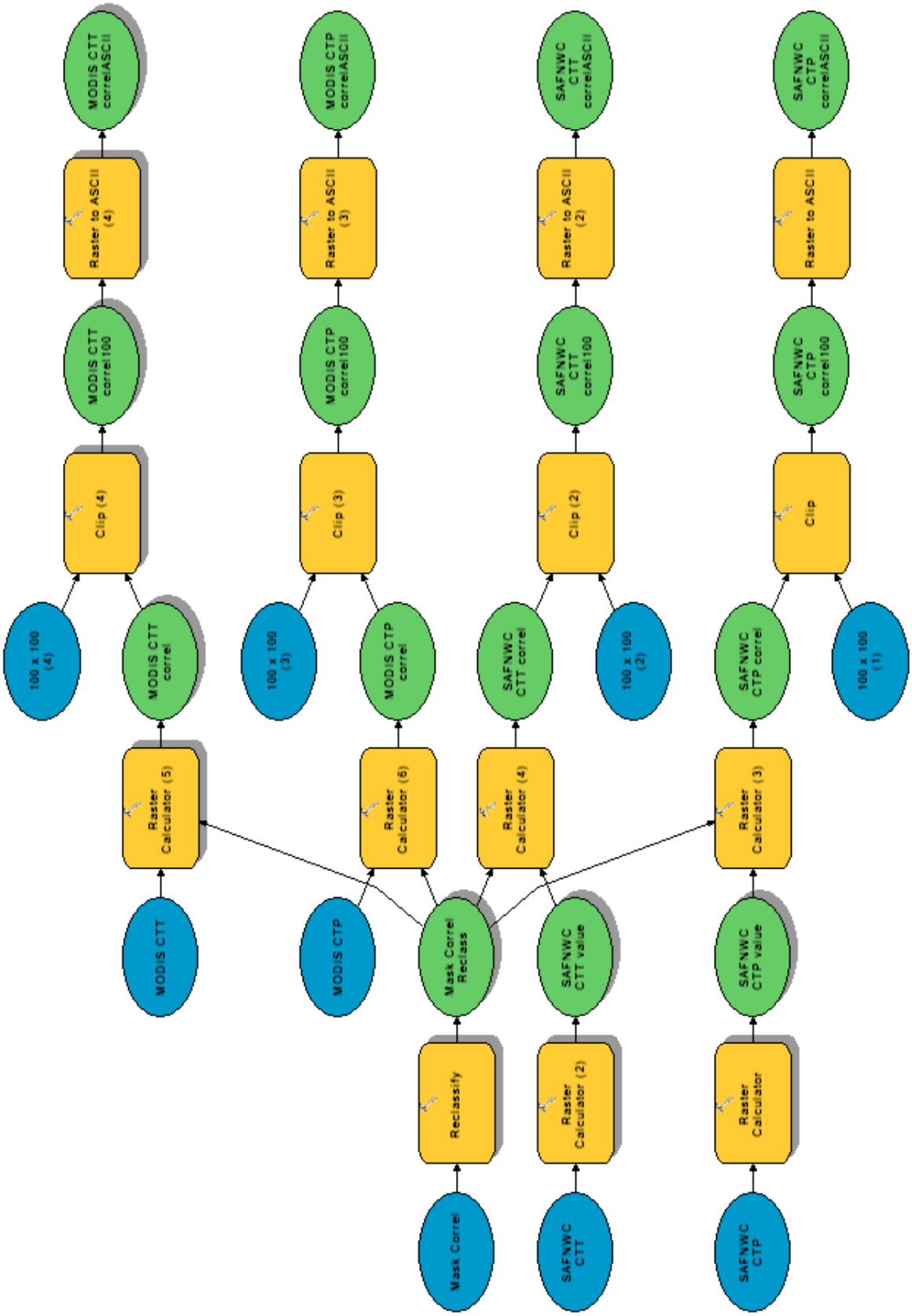
Příloha 2: Visual Basic skript pro převod čtvercové matice do sloupcové podoby v Microsoft Excel

Příloha 3: Sjednocení druhů oblačnosti definovanými produktem CT a znakovým klíčem SYNOP map

Příloha 4: Histogramy průběhů hodnot klasifikačních příznaků jednotlivých druhů oblačnosti

Příloha 5: Porovnání použitých klasifikačních metod ze dne 3. 1. 2010

Příloha 1: Zpracovatelský postup korelace dat pomocí ModelBuilder v ArcGIS



Příloha 2: Visual Basic skript pro převod čtvercové matice do sloupcové podoby v Microsoft Excel

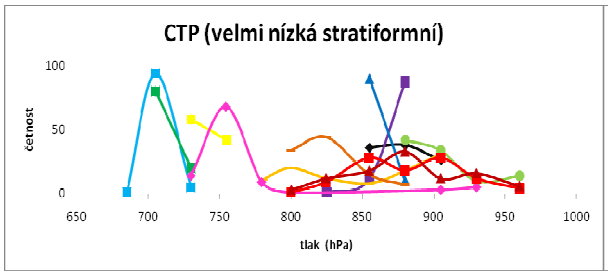
```
Sub matrixToColumn()
    Dim v       As Variant
    Dim nCol    As Long
    Dim nRow    As Long
    Dim rOut    As Range
    Dim iCol    As Long

    On Error Resume Next
    v = Application.InputBox("Select range to copy",  Type:=8).Value
    If IsEmpty(v) Then Exit Sub
    nRow = UBound(v, 1)
    nCol = UBound(v, 2)

    Set rOut = Application.InputBox("Select destination",
Type:=8).Resize(nRow, 1)
    If rOut Is Nothing Then Exit Sub

    For iCol = 1 To nCol
        rOut.Value = WorksheetFunction.Index(v, 0, iCol)
        Set rOut = rOut.Offset(nRow)
    Next iCol
End Sub
```

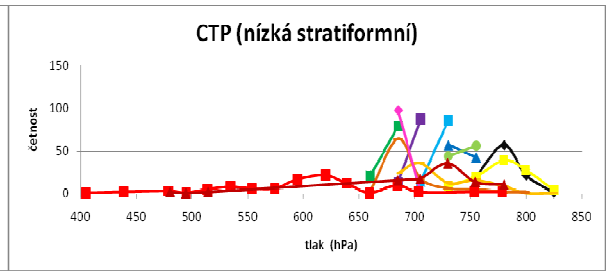
Příloha 3: Sjednocení druhů oblačnosti definovanými produktem CT a znakovým klíčem SYNOP map

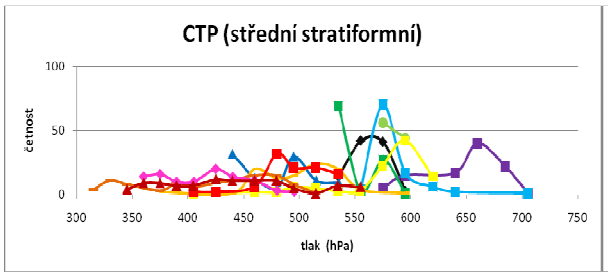
	SYNOP znakový klíč
	Ci fib, Ci unc - převládají, nepřibývají
	Ci spi, Ci cas, Ci flo - převládají
	Ci spi cbgen
	Ci unc, Ci fib - postupně zatahují oblohu
	Ci + Cs, nebo jen Cs - oblaků přibývá, nedosahují 45^0 nad obzor
	Ci + Cs, nebo jen Cs - oblaků přibývá, přesahují 45^0 nad obzor
	Cs - úplně pokrývá celou oblohu
	Cs - nepřibývá, nepokrývá celou oblohu
	Cc - převládá
	As tr
	As op, nebo Ns
	Ac tr - v jedné hladině
	Ac (len) - měnící vzhled
	Ac postupně zatahující oblohu
	Ac cugen, nebo Ac cbgen
	Ac op v jedné vrstvě - nepřibývá, nebo
	Ac ve více vrstvách - nepřibývá, nebo
	Ac + As současně, nebo
	Ac + Ns současně
	Ac cas, Ac flo
	Ac ve více hladinách - chaotický vzhled
	Cu hum, nebo Cu fra
	Cu med, nebo Cu con
	Cb cal
	Sc cugen
	Sc (nikoliv Sc cugen)
	St neb, St fra
	St fra, Cu fra - „ špatného počasí“,
	Cu + Sc v různých hladinách (nikoliv Sc cugen)
	Cb cap

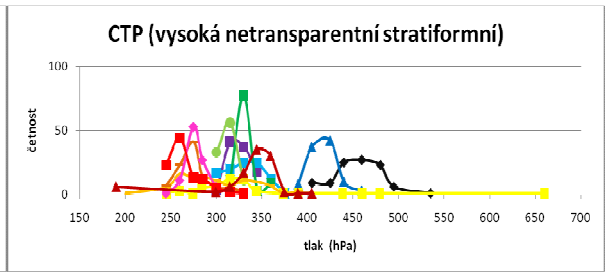
	CT znakový klíč
	velmi nízká kumuliformní
	velmi nízká stratiformní
	nízká kumuliformní
	nízká stratiformní
	střední kumuliformní
	střední stratiformní
	vysoká netransparentní kumuliformní
	vysoká netransparentní stratiformní
	velmi vysoká netransparentní kumuliformní
	velmi vysoká netransparentní stratiformní
	vysoká transparentní slabá
	vysoká transparentní středně silná
	vysoká transparentní silná
	vysoká transparentní nad nízkými a středními oblaky
	frakční

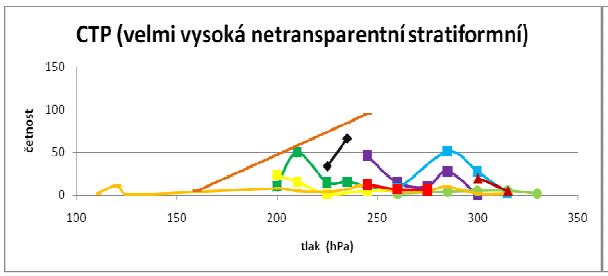
Příloha 4: Histogramy průběhů hodnot klasifikačních příznaků jednotlivých druhů oblačnosti

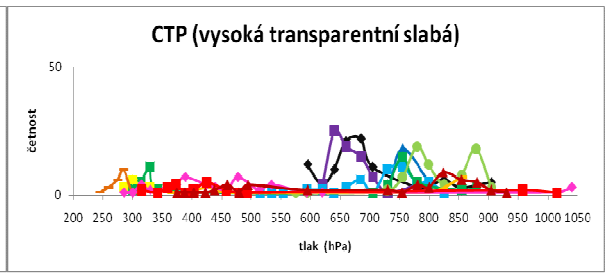


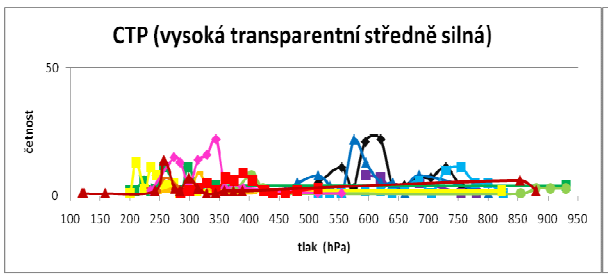


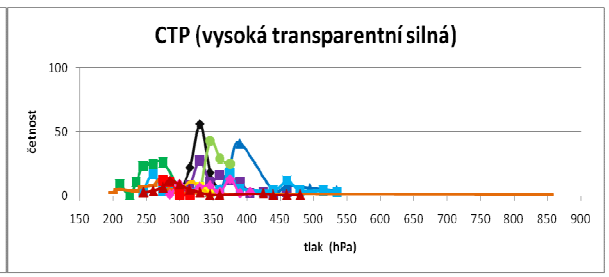


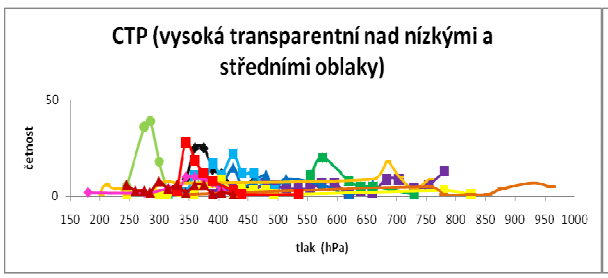


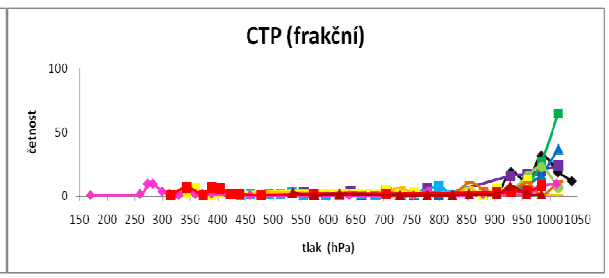


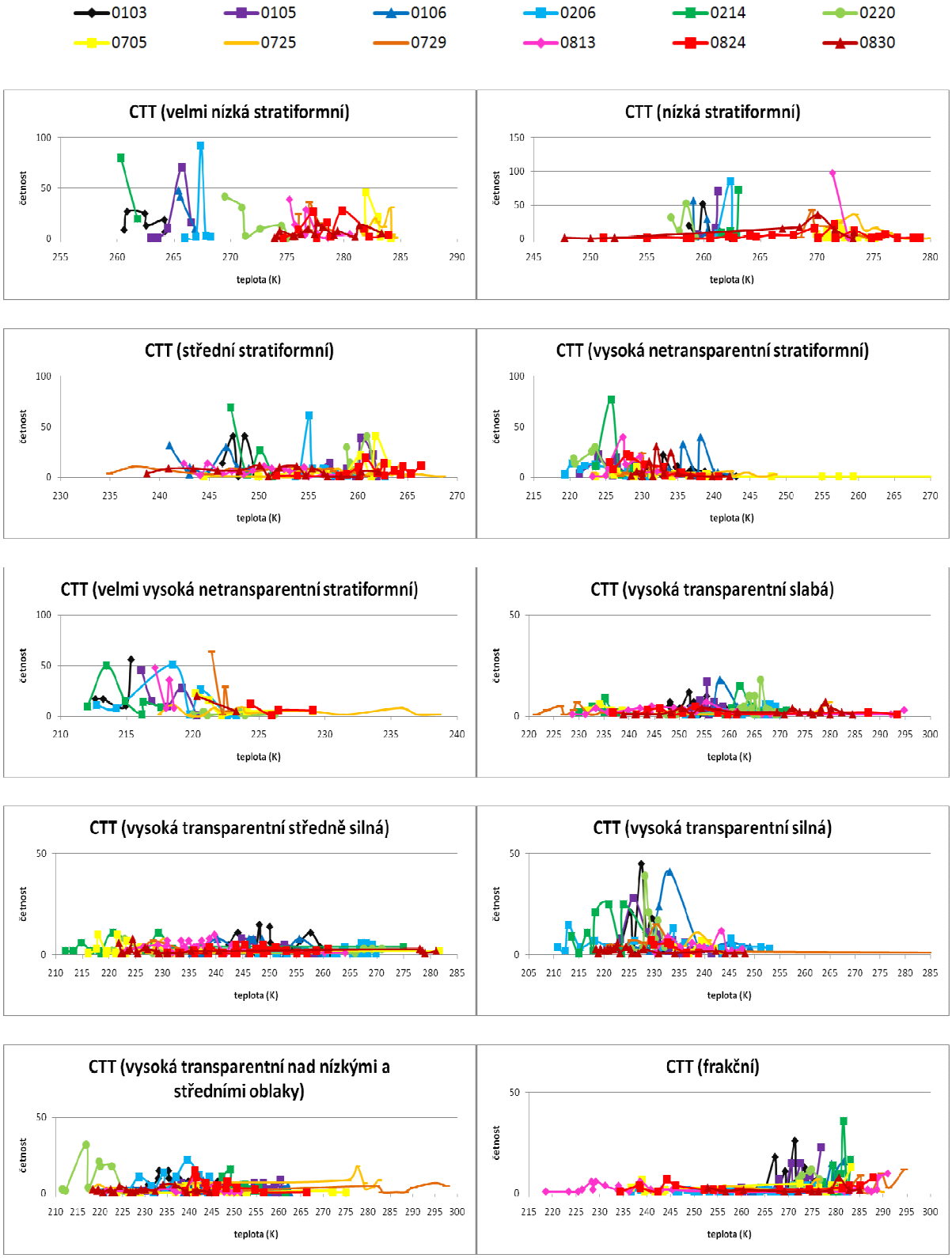


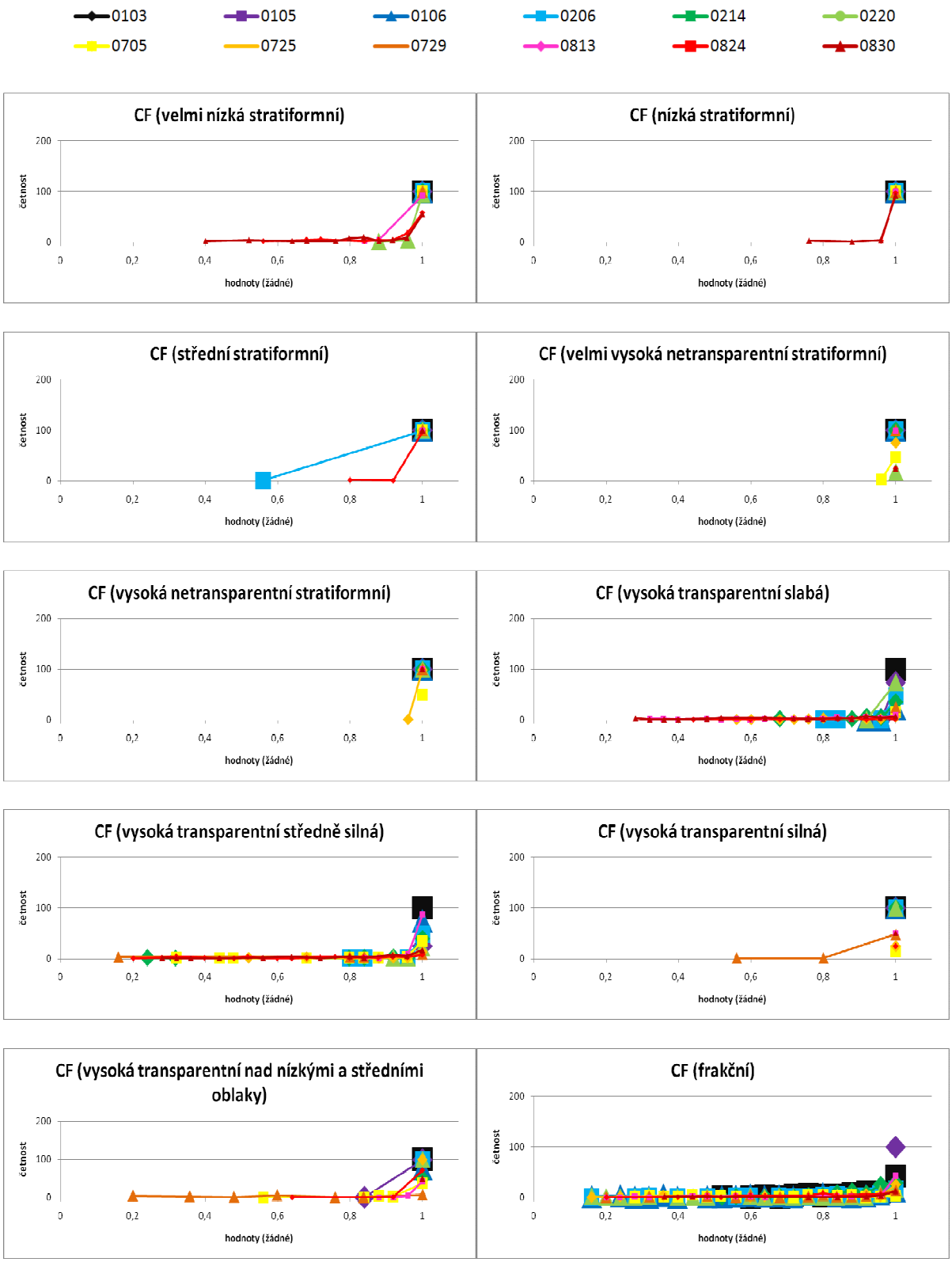




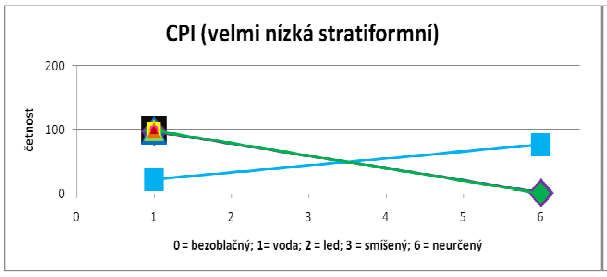


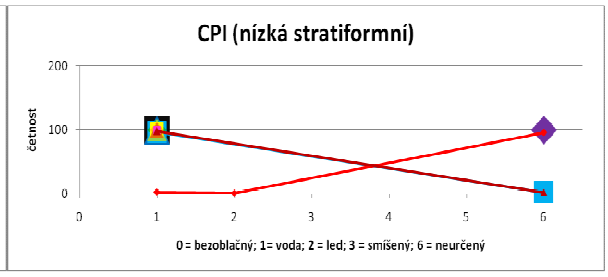


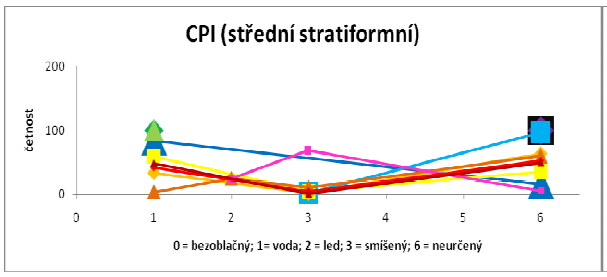

0103
0105
0106
0206
0214
0220
0705
0725
0729
0813
0824
0830
CTT (velmi nízká stratiformní)
CTT (nízká stratiformní)
CTT (střední stratiformní)
CTT (vysoká netransparentní stratiformní)
CTT (velmi vysoká netransparentní stratiformní)
CTT (vysoká transparentní slabá)
CTT (vysoká transparentní středně silná)
CTT (vysoká transparentní silná)
CTT (vysoká transparentní nad nízkými a středními oblaky)
CTT (frakční)
četnost
teplota (K)

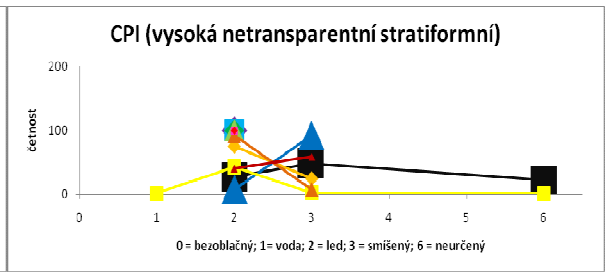

0103
0105
0106
0206
0214
0220
0705
0725
0729
0813
0824
0830
CF (velmi nízká stratiformní)
CF (nízká stratiformní)
CF (střední stratiformní)
CF (velmi vysoká netransparentní stratiformní)
CF (vysoká netransparentní stratiformní)
CF (vysoká transparentní slabá)
CF (vysoká transparentní středně silná)
CF (vysoká transparentní silná)
CF (vysoká transparentní nad nízkými a středními oblaky)
CF (frakční)
četnost
hodnoty (žádné)

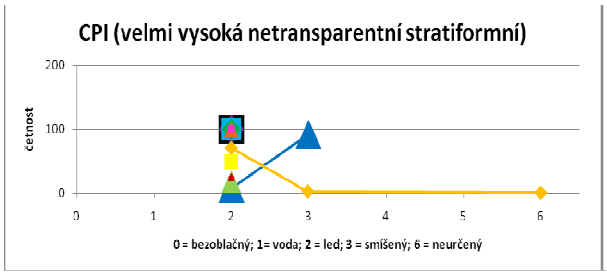
0103
0105
0106
0206
0214
0220
0705
0725
0729
0813
0824
0830

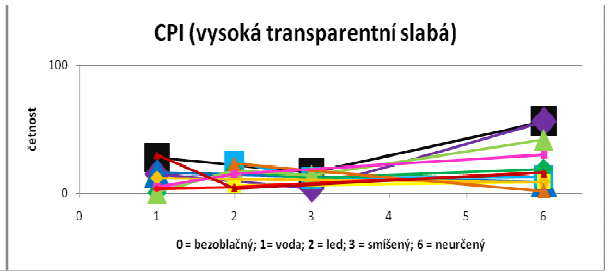

CPI (velmi nízká stratiformní)
četnost
0 = bezoblačný; 1= voda; 2 = led; 3 = smíšený; 6 = neurčený

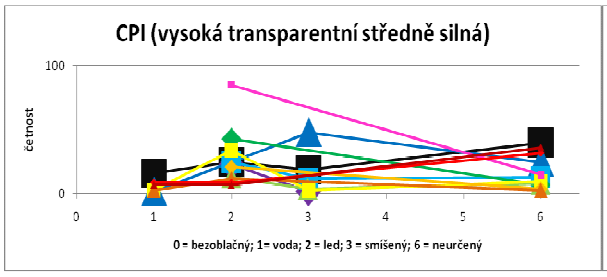

CPI (nízká stratiformní)
četnost
0 = bezoblačný; 1= voda; 2 = led; 3 = smíšený; 6 = neurčený

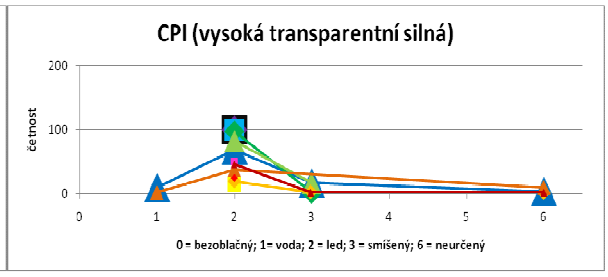

CPI (střední stratiformní)
četnost
0 = bezoblačný; 1= voda; 2 = led; 3 = smíšený; 6 = neurčený

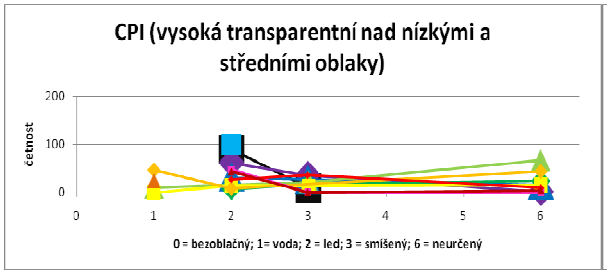

CPI (vysoká netransparentní stratiformní)
četnost
0 = bezoblačný; 1= voda; 2 = led; 3 = smíšený; 6 = neurčený

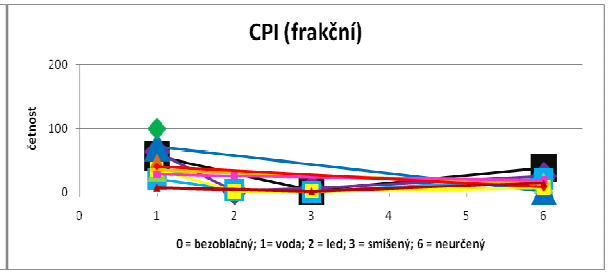

CPI (velmi vysoká netransparentní stratiformní)
četnost
0 = bezoblačný; 1= voda; 2 = led; 3 = smíšený; 6 = neurčený

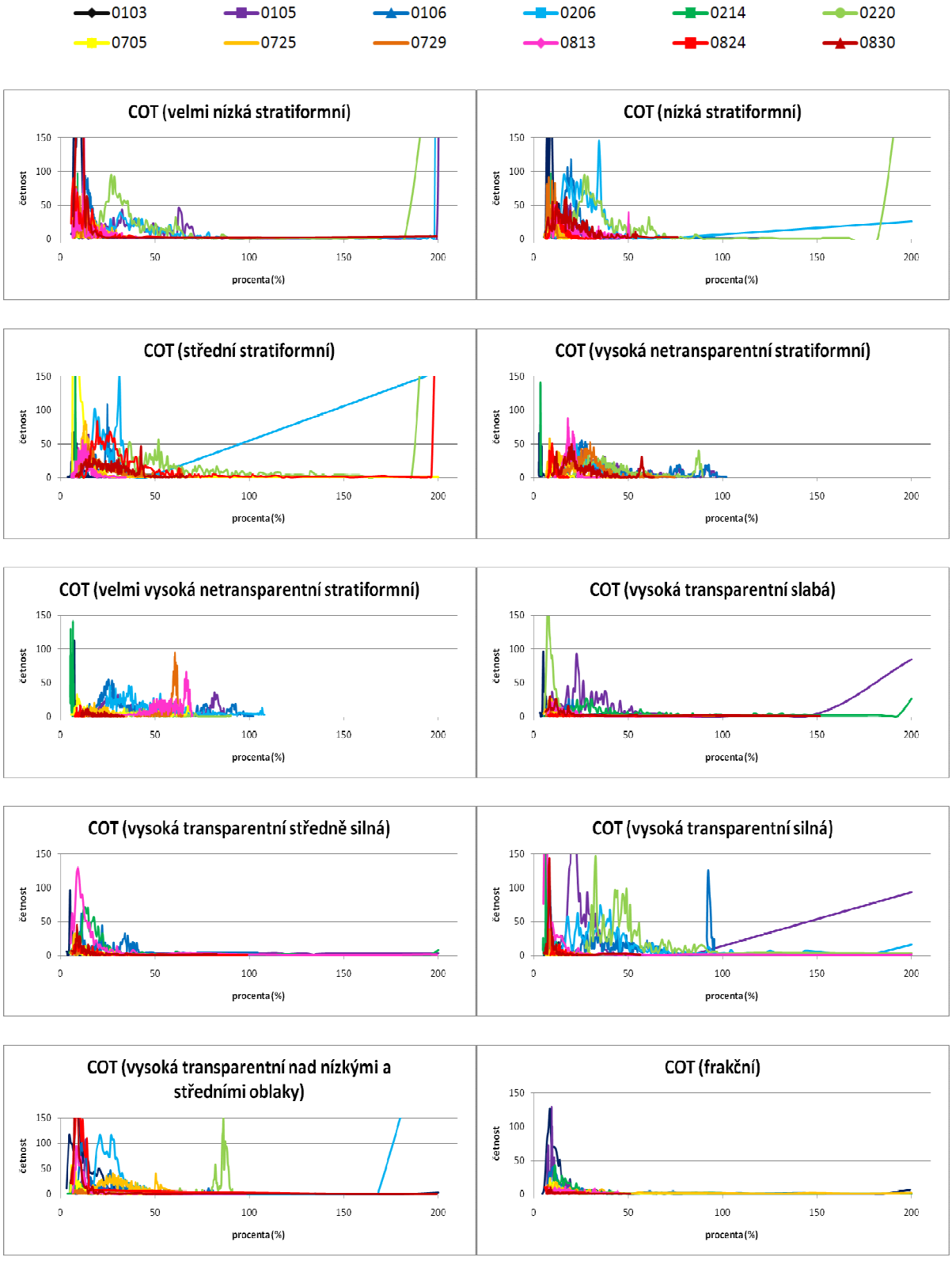

CPI (vysoká transparentní slabá)
četnost
0 = bezoblačný; 1= voda; 2 = led; 3 = smíšený; 6 = neurčený

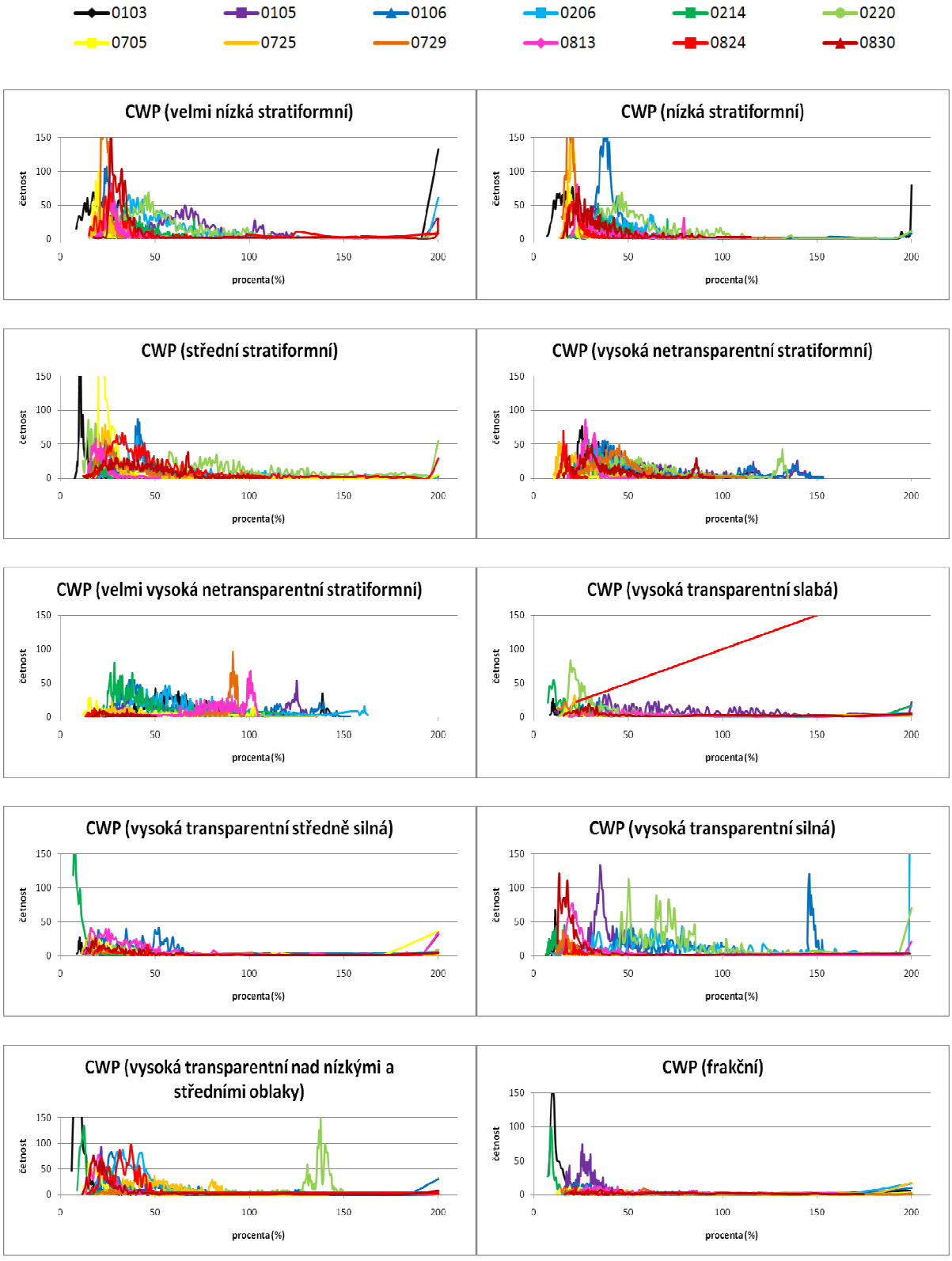

CPI (vysoká transparentní středně silná)
četnost
0 = bezoblačný; 1= voda; 2 = led; 3 = smíšený; 6 = neurčený


CPI (vysoká transparentní silná)
četnost
0 = bezoblačný; 1= voda; 2 = led; 3 = smíšený; 6 = neurčený

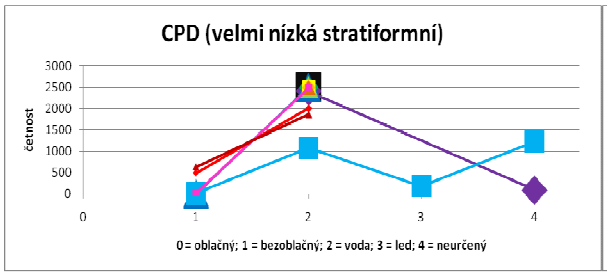

CPI (vysoká transparentní nad nízkými a středními oblaky)
četnost
0 = bezoblačný; 1= voda; 2 = led; 3 = smíšený; 6 = neurčený

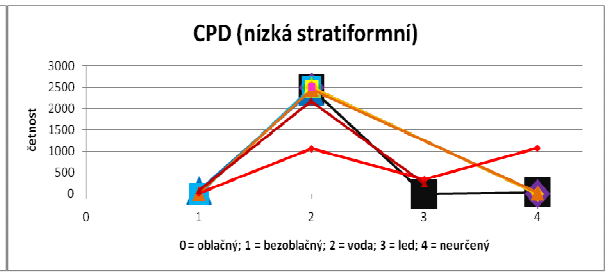

CPI (frakční)
četnost
0 = bezoblačný; 1= voda; 2 = led; 3 = smíšený; 6 = neurčený

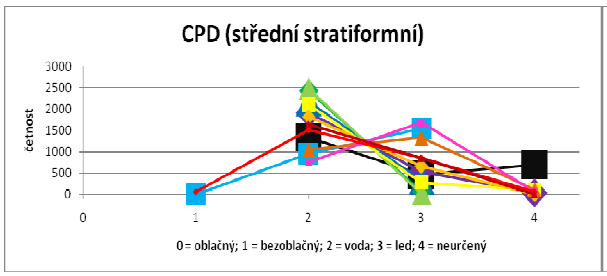

0103
0105
0106
0206
0214
0220
0705
0725
0729
0813
0824
0830
COT (velmi nízká stratiformní)
COT (nízká stratiformní)
COT (střední stratiformní)
COT (vysoká netransparentní stratiformní)
COT (velmi vysoká netransparentní stratiformní)
COT (vysoká transparentní slabá)
COT (vysoká transparentní středně silná)
COT (vysoká transparentní silná)
COT (vysoká transparentní nad nízkými a středními oblaky)
COT (frakční)
četnost
procenta (%)

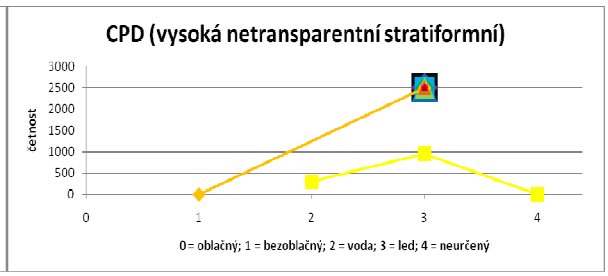

0103
0105
0106
0206
0214
0220
0705
0725
0729
0813
0824
0830
CWP (velmi nízká stratiformní)
CWP (nízká stratiformní)
CWP (střední stratiformní)
CWP (vysoká netransparentní stratiformní)
CWP (velmi vysoká netransparentní stratiformní)
CWP (vysoká transparentní slabá)
CWP (vysoká transparentní středně silná)
CWP (vysoká transparentní silná)
CWP (vysoká transparentní nad nízkými a středními oblaky)
CWP (frakční)
četnost
procenta (%)

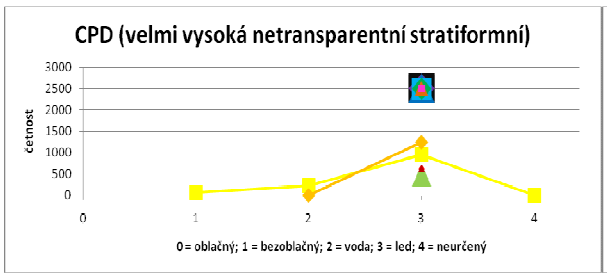
0103
0105
0106
0206
0214
0220
0705
0725
0729
0813
0824
0830

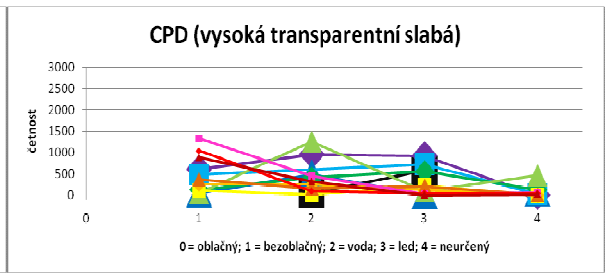

CPD (velmi nízká stratiformní)
četnost
0= oblačný; 1 = bezoblačný; 2 = voda; 3 = led; 4 = neurčený

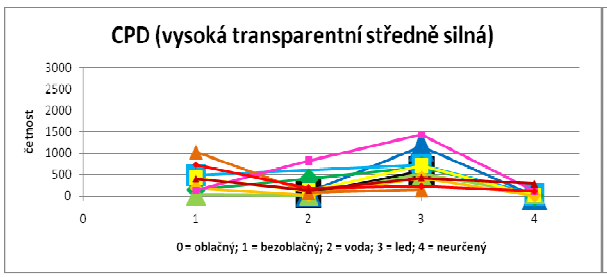

CPD (nízká stratiformní)
četnost
0= oblačný; 1 = bezoblačný; 2 = voda; 3 = led; 4 = neurčený

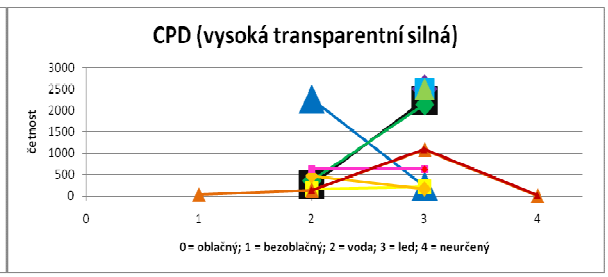

CPD (střední stratiformní)
četnost
0= oblačný; 1 = bezoblačný; 2 = voda; 3 = led; 4 = neurčený

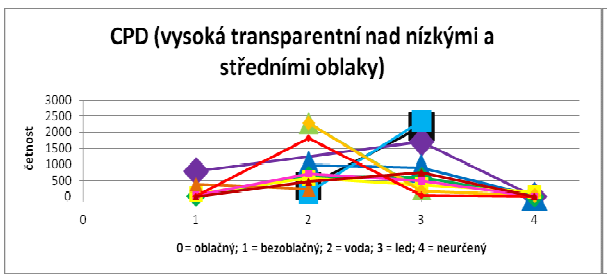

CPD (vysoká netransparentní stratiformní)
četnost
0= oblačný; 1 = bezoblačný; 2 = voda; 3 = led; 4 = neurčený

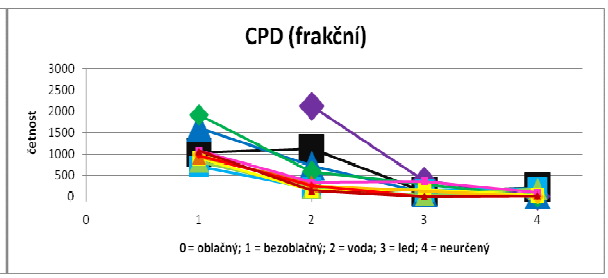

CPD (velmi vysoká netransparentní stratiformní)
četnost
0= oblačný; 1 = bezoblačný; 2 = voda; 3 = led; 4 = neurčený

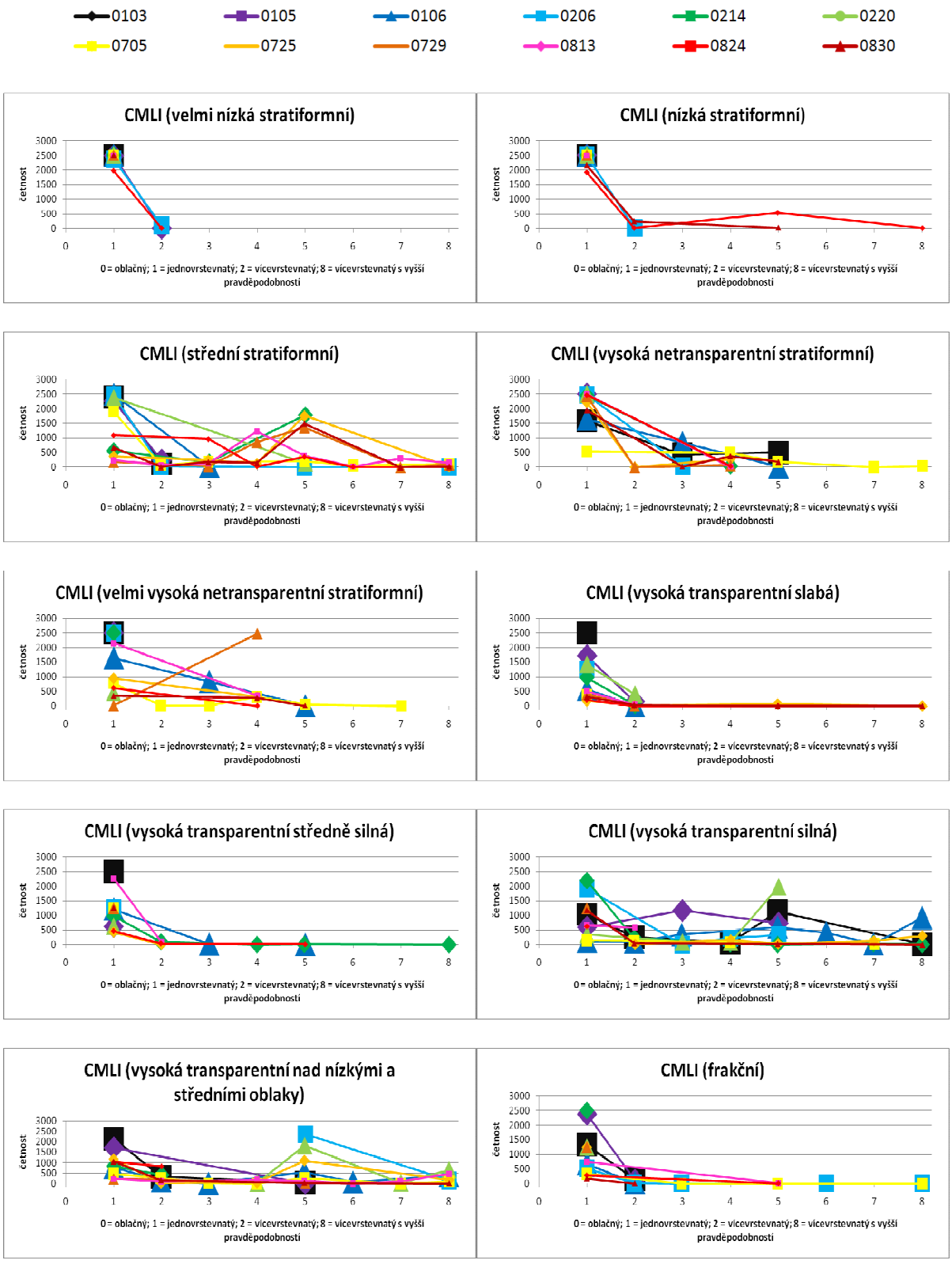

CPD (vysoká transparentní slabá)
četnost
0= oblačný; 1 = bezoblačný; 2 = voda; 3 = led; 4 = neurčený


CPD (vysoká transparentní středně silná)
četnost
0= oblačný; 1 = bezoblačný; 2 = voda; 3 = led; 4 = neurčený

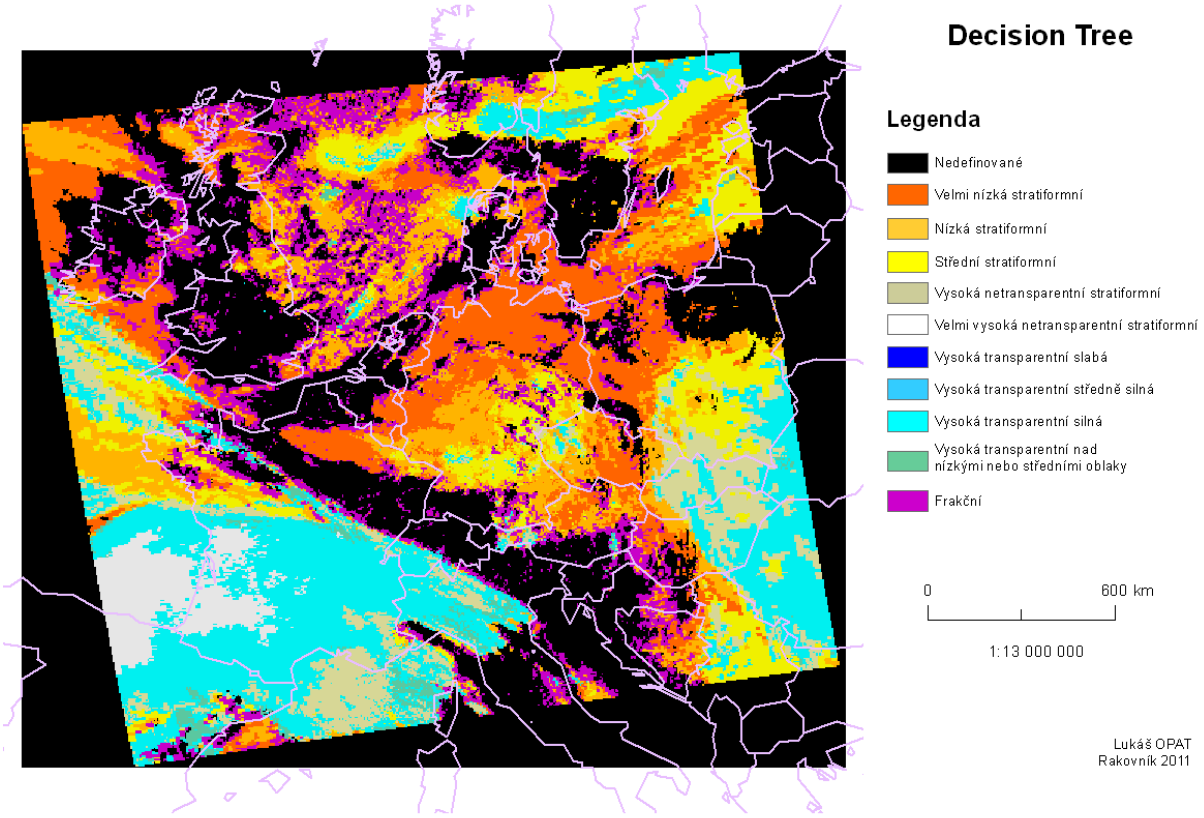

CPD (vysoká transparentní silná)
četnost
0= oblačný; 1 = bezoblačný; 2 = voda; 3 = led; 4 = neurčený

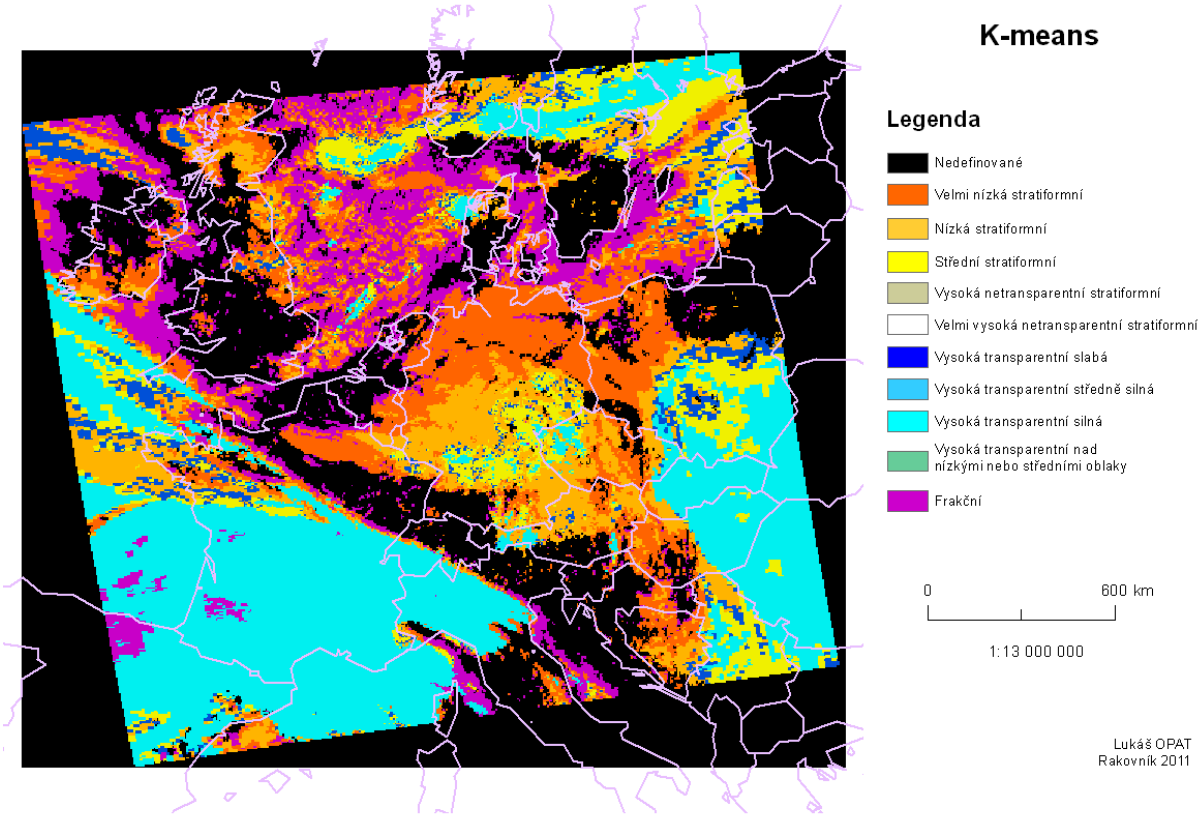

CPD (vysoká transparentní nad nízkými a středními oblaky)
četnost
0= oblačný; 1 = bezoblačný; 2 = voda; 3 = led; 4 = neurčený

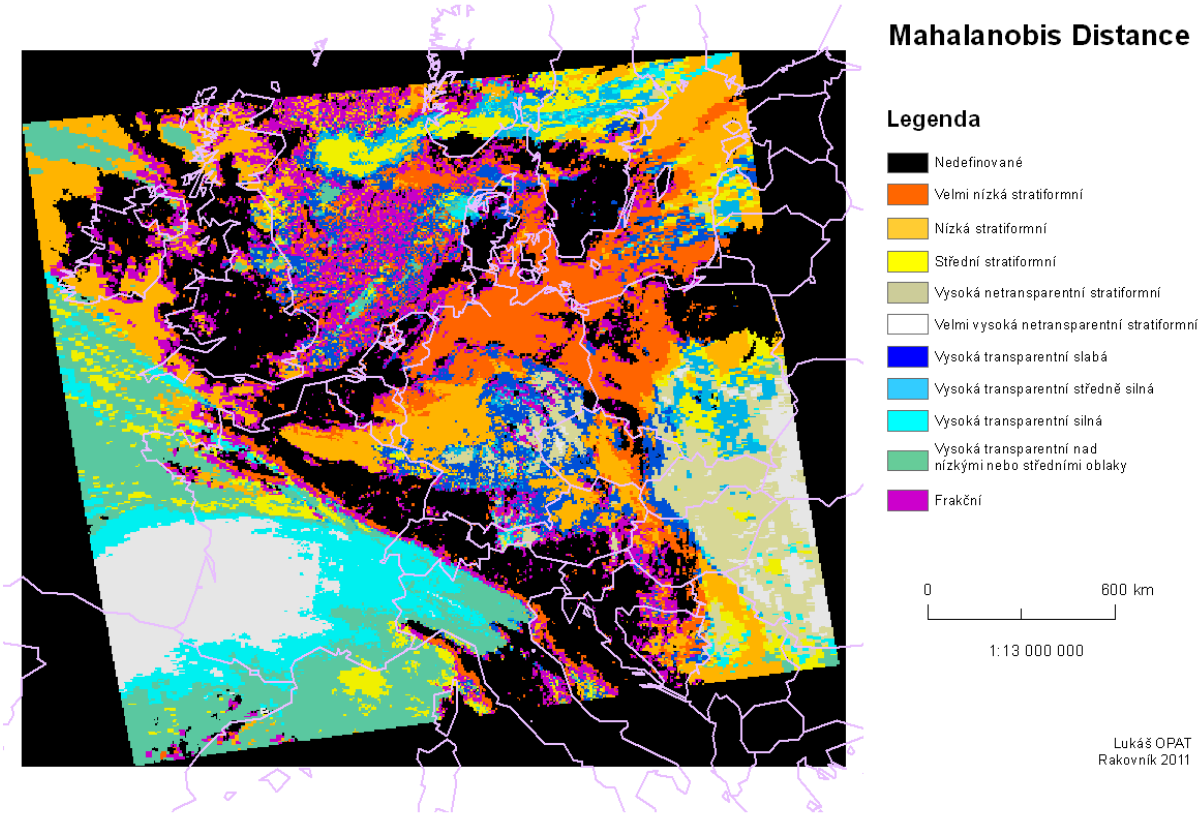

CPD (frakční)
četnost
0= oblačný; 1 = bezoblačný; 2 = voda; 3 = led; 4 = neurčený

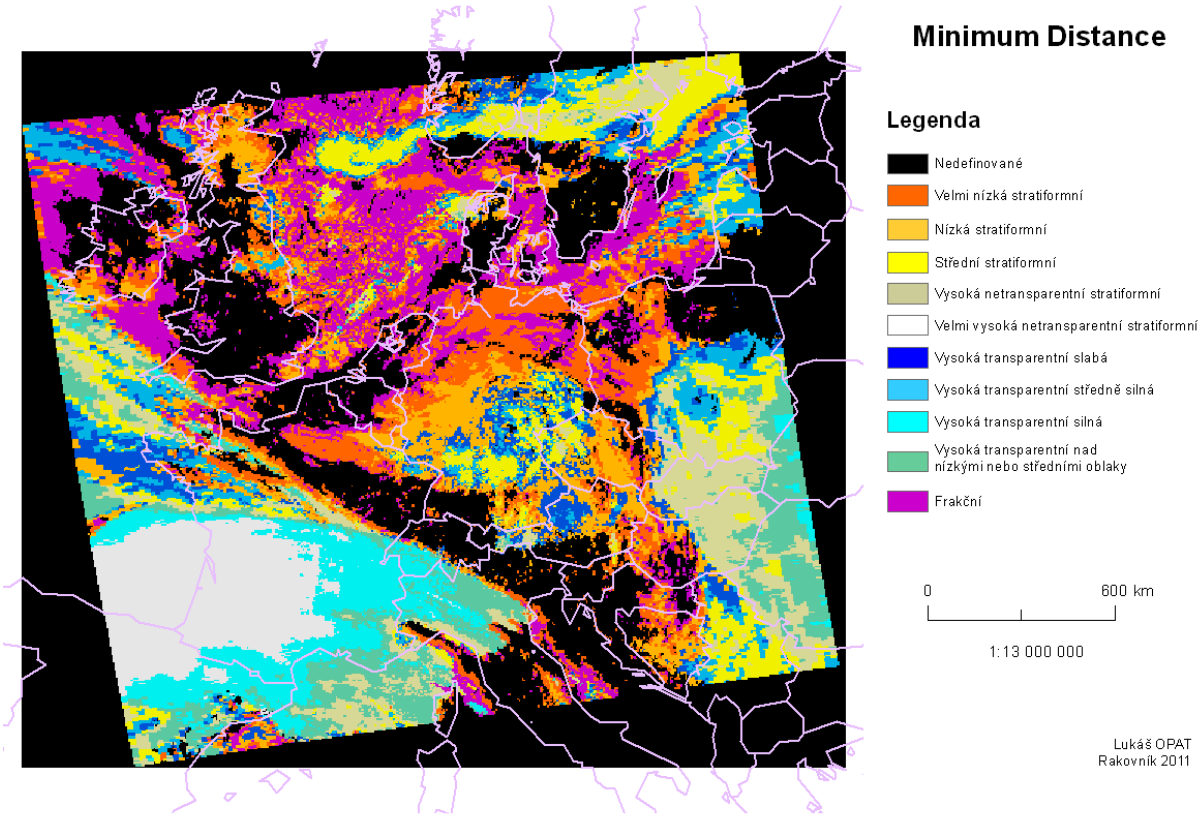

0103
0105
0106
0206
0214
0220
0705
0725
0729
0813
0824
0830
CMLI (velmi nízká stratiformní)
CMLI (nízká stratiformní)
CMLI (střední stratiformní)
CMLI (vysoká netransparentní stratiformní)
CMLI (velmi vysoká netransparentní stratiformní)
CMLI (vysoká transparentní slabá)
CMLI (vysoká transparentní středně silná)
CMLI (vysoká transparentní silná)
CMLI (vysoká transparentní nad nízkými a středními oblaky)
CMLI (frakční)
četnost
0 = oblačný; 1 = jednovrstevnatý; 2 = vícevrstevnatý; 8 = vícevrstevnatý s vyšší pravděpodobnosti

Příloha 5: Porovnání použitých klasifikačních metod ze dne 3. 1. 2010




K-means
Legenda
Nedefinované
Velmi nízká stratiformní
Nízká stratiformní
Střední stratiformní
Vysoká netransparentní stratiformní
Velmi vysoká netransparentní stratiformní
Vysoká transparentní slabá
Vysoká transparentní středně silná
Vysoká transparentní silná
Vysoká transparentní nad nízkými nebo středními oblaky
Frakční
0
600 km
1:13 000 000
Lukáš OPAT
Rakovník 2011


Mahalanobis Distance
Legenda
Nedefinované
Velmi nízká stratiformní
Nízká stratiformní
Střední stratiformní
Vysoká netransparentní stratiformní
Velmi vysoká netransparentní stratiformní
Vysoká transparentní slabá
Vysoká transparentní středně silná
Vysoká transparentní silná
Vysoká transparentní nad nízkými nebo středními oblaky
Frakční
0
600 km
1:13 000 000
Lukáš OPAT
Rakovník 2011


Minimum Distance
Legenda
Nedefinované
Velmi nízká stratiformní
Nízká stratiformní
Střední stratiformní
Vysoká netransparentní stratiformní
Velmi vysoká netransparentní stratiformní
Vysoká transparentní slabá
Vysoká transparentní středně silná
Vysoká transparentní silná
Vysoká transparentní nad nízkými nebo středními oblaky
Frakční
0
600 km
1:13 000 000
Lukáš OPAT
Rakovník 2011