

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

**FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ**

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A ENVIRONMENTÁLNÍHO  
MODELOVÁNÍ**



**Využití satelitních dat k mapování sněhové pokrývky**

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Roman Juras, Ph.D.

Konzultant: Ing. Filip Strnad

Diplomant: Bc. Nikola Šeborová

**2019**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Nikola Šeborová

Environmentální modelování

Název práce

**Využití satelitních dat k mapování sněhové pokrývky**

Název anglicky

**Snow cover mapping using satellite data**

---

### **Cíle práce**

Porovnání více produktů ze satelitních dat pro mapování sněhové pokrývky.  
Analýza využití těchto dat pro území České republiky.

### **Metodika**

Analýza dostupnosti satelitních dat obsahující informace o sněhové pokrývce na území České republiky.  
Vybraná satelitní data budou porovnána s daty z pozemního měření.

**Doporučený rozsah práce**

70 str.

**Klíčová slova**

sníh, MODIS, satelitní měření

---

**Doporučené zdroje informací**

Dietz et al. 2011, Remote sensing of snow – a review of available methods, International Journal of Remote Sensing

Huang et al. 2011, Validation of MODIS snow cover products using Landsat and ground measurements during the 2001–2005 snow seasons over northern Xinjiang, China, International Journal of Remote Sensing

Martínez and Seidel, 2004: Remote Sensing in Snow Hydrology : Runoff Modelling, Effect of Climate Change

---

**Předběžný termín obhajoby**

2018/19 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

Ing. Roman Juras, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

**Konzultant**

Ing. Filip Strnad

Elektronicky schváleno dne 5. 6. 2018

**doc. Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 24. 8. 2018

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 17. 04. 2019

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Romana Jurase, Ph.D. Uvedla jsem všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

Prohlašuji, že tištěná verze se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Praze 18.4. 2019

.....  
Bc. Nikola Šeborová

## **Prohlášení o využití dat**

Tímto prohlašuji, že poskytnutá data z ČHMÚ o výskytu sněhové pokrývky na území České republiky za roky 2016 – 2018 použiji výhradně pro účely vypracování diplomové práce na téma:

„Využití satelitních dat k mapování sněhové pokrývky „

Tato práce vznikla pod vedením Ing. Romana Jurase, Ph.D. na katedře vodního hospodářství a environmentálního modelování, fakulty životního prostředí, České zemědělské univerzity v Praze.

V Praze dne 12.4. 2019

.....  
Bc. Nikola Šeborová

## **Poděkování**

Ráda bych poděkovala panu Ing. Romanu Jurasovi, Ph.D. za odborné vedení, které mi při zpracovávání této diplomové práce poskytl. Největší poděkování patří Ing. Filipu Strnadovi, který mi nad rámec svých povinností poskytl cenné rady pro jazyk R a statistické metody. Zvláštní poděkování patří mojí mamince Ing. Zdeňce Holečkové, která mi v průběhu studií zajistila nadstandartní zázemí a je mi vzorem.

V Praze 18.4. 2019

.....  
Bc. Nikola Šeborová

## **Abstrakt**

Předkládaná práce se zabývá porovnáním satelitních produktů MODIS a H-SAF s fyzickými měřeními a odhady Českého hydrometeorologického ústavu. Sledovaným územím je celá rozloha České republiky. Studie validuje přesnost informací o sněhové pokrývce, kterou jsme schopni dostat díky družicovému snímání. Analýza vznikla pro zhodnocení, zda jsou družicové snímky v poskytování informací alespoň stejně přesné jako fyzická měření. Výsledky jsou cenným vodítkem pro budoucí analytiku zimních období sledovaného území, protože přináší i obecný přehled možností, jak chybějící data nahradit, popřípadě jak analýzu rozšířit.

Jako pozorované období byly vybrány zimy 2016 a 2017, konkrétně pak od začátku ledna do konce dubna. Tato časová perioda byla vybrána s ohledem na nejčastější výskyt souvislé sněhové pokrývky a s ohledem na počet obdržených dat od Českého hydrometeorologického ústavu. Pozemní monitoring byl proveden v týdenním kroku.

Výsledně nevyšel ani jeden produkt výrazně lepší oproti druhému. Oba dva produkty mají tendenci sněhovou pokrývku na studovaném území podhodnocovat, pouze MODIS nadhodnocoval v 6 případech ze 32 měření. H13 nadhodnocoval pouze dvakrát a jako jediný vykazoval dne 13.3.2017 shodu s pozemním měřením ČHMÚ. Výhodou MODIS oproti H-SAF je, že poskytuje komplexnější data, která jsou přínosnou doprovodnou informací pro zpracovatele. Na základě těchto doprovodných informací je pak analytik schopen zvolit vhodnou doplňující metodu / zdroj informací, jelikož satelitní data se ukázala jako vysoce citlivá na panující meteorologické podmínky.

Analýza ukázala, že jeden satelitní zdroj nelze použít jako doplňující zdroj informací o sněhové pokrývce v neměřených zbylých 6 dnech. Zároveň nelze spoléhat na jeden produkt a je potřeba zakomponovat doprovodné zdroje informací, které jsou schopny nahradit data, jež nebylo možno nasbírat vlivem nepříznivého podnebí. Dle již provedených studií se zdají jako nejvhodnější doplňující metody – kombinace Terra a Aqua, časová filtrace a metoda sousedních pixelů.

**Klíčová slova:** MODIS, H-SAF, sněhová hydrologie, dálkové snímání Země

## **Abstract**

The presented thesis compares two different satellite products - MODIS and H-SAF. It compares them with physical measurements and estimates of the Czech hydrometeorological institute. The monitored area is the whole area of the Czech Republic. The study validates the accuracy of snow cover information that we are able to get through satellite scanning. The analysis was made to assess whether satellite imagery in the provision of information is at least as accurate as the physical measurements. The results are a valuable guide for future winter analysts of the monitored area, as it also provides a general overview of how to replace missing data.

Winters 2016 and 2017 were selected as the observed period, specifically from the beginning of January to the end of April. This time period was chosen with regard to the most frequent occurrence of continuous snow cover and with regard to the number of received data from the Czech Hydrometeorological Institute. Ground monitoring was performed in a weekly step.

As a result, none of the products came out significantly better than the other. Both products tend to underestimate snow cover in the studied area. MODIS overestimated out of 32 measurements in 6 cases. H13 overestimated only twice and as the only one on 13.3.2017 showed compliance with the CHMU ground measurement. The advantage of MODIS over H-SAF is that it provides more comprehensive information that is beneficial to accompanying information to processors. Based on this accompanying information, the analyst is able to select an appropriate supplementary method / source of information as satellite data has proven to be highly sensitive to prevailing meteorological conditions.

The analysis showed that one satellite source cannot be used as a supplementary source of snow cover information in the unmeasured remaining 6 days. At the same time, it is not possible to rely on one product and it is necessary to incorporate accompanying engineering applications that are capable of replacing data that may not have been collected due to adverse climates. According to studies already carried out, additional methods seem to be the most suitable - the combination of Terra and Aqua, time filtering and the neighboring pixel method.

**Key word:** MODIS, H-SAF, snow hydrology, remote sensing of the Earth



## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
AM	Aritmetický průměr
BIAS	Systematická chyba
ČHMÚ	Český hydrometeorologický úřad
ČR	Česká republika
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation
MODIS	The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration of Meteorological Satellites
NDSI	The Normalized Difference Snow Index
NSIDC	National Snow & Ice Data Center
$R^2$	Koeficient Determinace
RMSE	Root Mean Square Error
SVH	Vodní hodnota sněhu
SWE	Snow Water Equivalent
SWIR	Krátkovlnné infračervené vlnění

# Obsah

1. Úvod .....	2
2. Cíle.....	4
3. Rešerše.....	5
3.1 Sníh.....	5
3.2 Sněhová distribuce.....	7
3.3 Sněhová hydrologie .....	8
3.4 Zimní období v České republice.....	11
3.5 Umělé Družice.....	12
3.6 Dálkový průzkum Země .....	13
3.7 Družicový monitoring Země .....	15
3.8 Validované satelitní produkty .....	17
4. Metodika .....	24
4.1 Studované území .....	25
4.2 Data .....	25
4.3 Míra variability .....	32
5. Výsledky .....	34
5.1 ČHMÚ DATA .....	34
5.2 MODIS - MYD10A1.....	39
5.3 H-SAF – H13.....	40
5.4 Průběh sněhové pokrývky na území ČR dle satelitů pro rok 2017 a 2018..	41
5.5 Porovnání MODIS, H-SAF s daty ČHMÚ .....	43
6 Diskuze .....	61
7 Závěr .....	64
8 Přehled literatury a použitých zdrojů.....	66

# 1. Úvod

Planeta Země, zatím jako jediná nám známá planeta naší sluneční soustavy, je schopna svým obyvatelům nabídnout životadárnou kapalinu ve třech skupenstvích. Desetinu zemského povrchu pokrývají ledovce, avšak ta část, kterou tvoří sníh a led, tzv. kryosféra je daleko větší. Odhadem je v oceánských ledovcích uloženo až 25 % pitné vody a ve skalních ledovcích až 64 % (Janke, Ng, a Bellisario 2017). Kryosféra je důležitým regulátorem globálního klimatu, jelikož její světlé albedo odráží sluneční záření zpět do kosmu. Z toho vyplývá, že má významný dopad na klimatické procesy (Huang et al. 2011).

Změny v kryosféře lze připisovat probíhající změně klimatu. Významným manipulátorem vývoje a změn kryosféry je vzrůstající průměrná teplota povrchu Země, která je mimo jiné způsobena zvyšující se koncentrací CO<sub>2</sub> v atmosféře (Huggel Ch., Carey M. 2015).

Změna klimatu se mezi veřejností, politiky a vědci stále častěji skloňuje. Její dopady jsou již dnes viditelné například v oblastech, kde se vyskytuje permafrost. Oteplování zvyšuje jeho nestabilitu a degradaci. Již dnes můžeme tvrdit, že probíhající změny budou mít významný dopad na hydrologii a ekologii (Ding et al. 2019).

Je zřejmé, že je pro nás jakožto obyvatele planety Země studium sněhu a ledu důležitým zdrojem informací o vývoji klimatu, na němž je veškerá biodiverzita bytostně závislá. Charakterizace sněhu je rozhodující pro pochopení vodních a energetických cyklů Země (Rittger, Painter, a Dozier 2013). Sníh a led se často vyskytují v těžko dosažitelných oblastech a jejich studium se nám pomocí moderních digitálních technologií zpřístupňuje, aniž bychom byli nuceni podnikat průzkumné výpravy.

K získání informací o kryosféře jako dynamickém celku se zatím nejlépe jeví dálkový průzkum zaledněných oblastí, který reprezentují například satelitní snímky získané z družic nebo průzkum drony (Dingman 2015). Ty se využívají při monitoringu horských oblastí, které jsou díky své topografii a heterogenním vlastnostem omezeně prozkoumatelné.

Tyto digitální technologie mohou představovat média, která dokáží poskytnout lepší zdroje dat, a to jak z hlediska kvantity, tak i kvality, jelikož při jejich pořizování lze

spoléhat na jejich pravidelnost a zachování stejné informační hodnoty (nepočítaje meteorologických událostí, které mohou snímkování dané oblasti omezit). Důvodem vzniku této práce je porovnání jednotlivých produktů mezi sebou, jelikož satelitní snímky zatím nejsou schopny poskytovat konzistentní výstupy za jakýchkoliv podmínek, myšleno meteorologických. Výstupy jsou vysoce závislé na procentu oblačnosti, která zahaluje snímanou oblast, na fyzikálních vlastnostech sněhu jako takového a mimo jiné i velikosti pozorované domény (Dong a Menzel 2016b).

Z těchto důvodů vznikla tato diplomová práce, která analyzuje výsledky družicového snímání satelitu Aqua MODIS a výsledky produktu H13 od společnosti H-SAF.

## 2. Cíle

Zpracovávané téma si klade za cíl provést základní a objektivní zhodnocení validovaných produktů MODIS a H-SAF. K validaci správnosti dat, která byla získána z dálkového snímání Země, byla použita data z pozemního měření na síti pozorovacích stanic Českého hydrometeorologického ústavu, který pouze pro účely této práce zmiňovaný materiál poskytl. Hlavním cílem bylo provést:

- Analýzu dostupnosti jednotlivých satelitních produktů
- Zhodnocení kvality obdržených dat a jejich porovnání s fyzickými měřeními, které provedl Český hydrometeorologický ústav
- Zhodnocení náročnosti zpracování jednotlivých produktů

Jako doplňkový cíl bylo stanoveno vytvořit práci, která uvede každého čtenáře do problematiky sněhové hydrologie a družicového snímání Země. Seznámí ho s možnostmi zkoumaných satelitních produktů, popřípadě navede k dalšímu vhodnému zpracování tématu v jeho budoucí práci.

## 3. Rešerše

### 3.1 Sníh

Sníh je zjednodušeně řečeno forma ledu, ale jeho struktura není vždy stejná. Stejně tak se jedná o porézní prostředí (Libbrecht 2003). Pokud se sníh na zemském povrchu začne hromadit, nazýváme jej sněhová pokrývka. Sněhová pokrývka je součástí kryosféry. Sníh vzniká v mracích při srážení ledových krystalů, za teplot od  $-40\text{ °C}$  až  $-10\text{ °C}$  (Libbrecht 2003). Pokud má dojít ke vzniku sněhu musí pára v atmosféře desublimovat přímo na ledu. Na zemský povrch pak dopadá v několika možných variantách (formách):

- Sněhové vločky
- Sněhové pelety (anglicky snow pellets), které se formují jako neprůhledné ledové krystaly. Jedná se o kapky vody, které jsou prudce podchlazeny, ale stále zůstaly tekuté. Tyto kapky pak zmrznou na krystaly a vytvoří hrudkovitou hmotu. Peleta je měkká a drobná (NSIDC ©2018).
- Zmrzlý déšť (anglicky sleet) se formuje při pádu dešťové kapky, která zmrzne a přemění své skupenství na pevné v průběhu dopadu. Jedná se o směs deště a sněhu. Obvykle nedosahují větší velikosti než 0,76 cm (NSIDC ©2018).
- Krupobití. Formálně se nepovažuje za sníh. Je nejčastěji generován při bouřkách. Kroupy se tvoří za situace vzhůru se pohybujícího vzduchu, které zabraňuje, aby sněhové pelety dopadly k zemskému povrchu. Kapka podchlazené vody narazí na peletu, která postupně narůstá. Po překonání určité váhy pelety, převládá gravitace a ona dopadne na zem ve formě, kterou nazýváme kroupy (NSIDC ©2018).

V oblastech, kde je výrazná sezónní sněhová pokrývka, představuje sníh důležitý vstup do regionální hydrologické bilance. Mnohdy významnější než dešťové srážky. V oblastech například jako Aljaška, Sibiř, Skandinávie, tvoří voda získaná z tání sněhové pokrývky více než polovinu ročního odtoku (Dingman 2015).

#### 3.1.1 Vlastnosti sněhu

Sníh je tvořen z vody a je tedy logické, že jeho fyzikální a chemické vlastnosti úzce souvisejí i s vlastnostmi vody (Dingman 2015). Popisovány jsou vlastnosti jako hustota, bod tání adhezi, soudržnost, viskozitu, rozpustnost a mnohé další.

K pochopení fázové přeměny, je nutné se přesunout na molekulární úroveň (Libbrecht 2003).

Sníh je tvořen ledem, vzduchem, vodou a dalšími příměsi za situace, kdy je teplota rovna nule °C. Díky tomu jej lze klasifikovat i jako minerál (minerál je přirozeně se vyskytující látka, která je anorganicky tvořená, má specifické chemické složení i atomové uspořádání) (Dingman 2015). U sněhu se pozorují tyto základní veličiny:

- Hloubku sněhu, která se měří jako vertikální vzdálenost od povrchu země až po povrch sněhu.
- Porozitu, která udává poměr objemu pórů k celkovému objemu vzorku.

Řečeno vzorcem:

$$\phi = \frac{V_w + V_a}{V_s} \quad (1)$$

Kde:  $V_w$  = objem vody,  $V_a$  = objem vzduchu,  $V_s$  = celkový objem masy

- Hustotu sněhu, která udává hmotnost na jednotku objemu sněhu. Řečeno vzorcem:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

Kde:  $M_s$  = hmotnost sněhu,  $V_s$  = objem sněhu

- Obsah tekuté vody, který udává poměr objemu tekuté vody k celkovému objemu sněhu. Řečeno vzorcem:

$$\theta_w = \frac{V_w}{V_s} \quad (3)$$

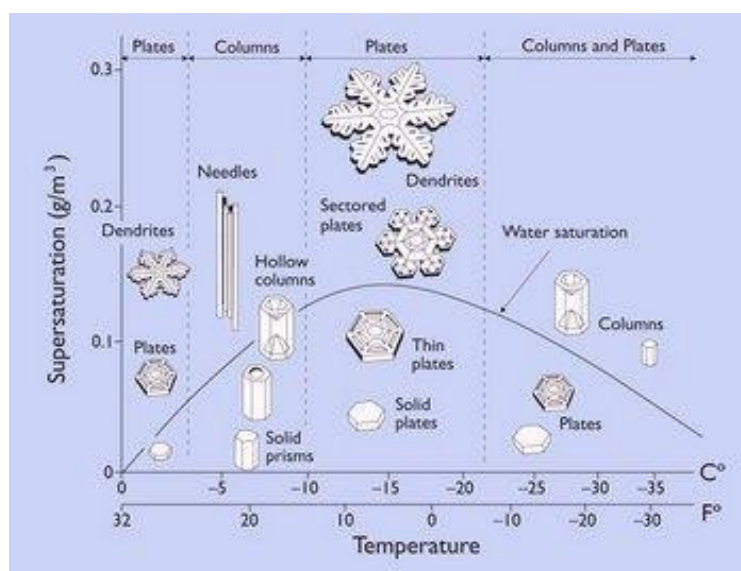
Tabulka níže interpretuje hodnoty získané výpočtem  $\theta_w$ .

Hodnocení	Popis	Rozsah $\theta_w$
Suchý	Teplota sněhu je rovna nebo pod 0°C. Sněhová zrna mají tendenci se agregovat pod tlakem.	0
Vlhký	Teplota sněhu = 0°C. Sněhová zrna mají tendenci se shlukovat i pod lehkým tlakem.	< 0,03
Mokrý	Teplota sněhu = 0°C. Voda je viditelná mezi zrny při 10x zvětšení, ale nelze vytlačit.	0,03 - 0,08
Velmi mokrý	Vodu lze vytlačit pod lehkým tlakem. Sníh má vysoký počet pórů vyplněných vzduchem.	0,08 - 0,15
Rozbředlý	Sníh je zaplaven vodou a má nízký počet pórů vyplněných vzduchem.	> 0,15

Tab. 1 – Interpretace výsledků hodnoty  $\theta_w$

### 3.1.2 Sněhová vločka obecně

Sněhová vločka se může vyskytovat jako samotný krystal nebo jako shluk sněhových krystalů spojených dohromady. Mají systematické vzory a hexagonální symetrický vzor (Fesenmaier 2011). Tvarem připomínají hranoly. Obecně mají tendenci se rozvětvovat a vytvářet složitější struktury. Hlavním důvodem, proč tyto struktury může sněhová vločka tvořit, je specifický typ intermolekulárních vazeb. Vlivem různých podmínek jinde v oblacích, se kterými se vločka v průběhu své „cesty“ setkává, se mění její struktura (Fesenmaier 2011). Nejtenčí a zároveň největší vločky se tvoří okolo  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Současná věda stále není schopna plně vysvětlit základní molekulární mechanismy, které vedou k různým tvarům rostoucích sněhových krystalů (Fesenmaier 2011).



Obr. 1 – Sněhové krystaly měnící svůj tvar v závislosti na teplotě (K. Fesenmaier 2011, dostupné z: <<https://1url.cz/tM2Zz>>)

## 3.2 Sněhová distribuce

Výskyt sněhu je obvykle vázán na několik faktorů:

- Zeměpisná šířka, výška
- Vzdálenost od velkých vodních ploch
- Povaha oběhu vzduchu v pozorovaném regionu

První bod – zeměpisná šířka/výška určuje, kde je dostatečně studené podnebí, které je nutné k vytvoření a udržení sněhové pokrývky. Výskyt vodních ploch ovlivňuje míru vlhkosti vzduchu, která formuje sněhové srážky. Cirkulace atmosféry pak určuje, kam



se vlhkost přemístí. Povaha srážek závisí na stupni nasycení vlhkostí (Dingman 2015). Stoupání vzduchu způsobují hory či jiné vyšší terénní rysy, čelní aktivita, konvekce a konvergence v atmosféře. Zjednodušeně lze konstatovat, že po určitém bodu nasycení vzduchu vodou a vhodnými terénními podmínkami, je možná tvorba sněhových vloček (DeWalle, David R. and Rango 2008).

Faktory ovlivňující sněhovou intercepci:

1. Meteorologické
2. Vegetativní

#### Meteorologické faktory

Už samotné podmínky při sněžení, ovlivňují následující zachycení na vegetaci. Teploty blízké se 0 °C, zapříčiňují zvýšení soudržnosti sněhových částic, které pak lépe drží pospolu. Srážky, které napadaly při teplotách významně nižších, nejsou schopné držet pospolu tak pevně jako v předchozím případě (Dingman 2015).

Tání sněhu při vyšších teplotách pak přispívá k posunu sněhové masy, stejně jako k opadávání z vegetace. Také vysoké rychlosti větru uvolňují zachycený sníh, a tím je přímo ovlivněna sněhová distribuce. Celkově je ovlivněna spíše v lokálním / regionálním měřítku (Dingman 2015).

#### Vegetativní faktory

Lze je rozdělit na faktory:

- Druhově specifické
- Rostlinné

Specifické faktory v sobě nesou informaci o jednotlivých druzích vegetace, např. přetrvávání listů (opadavé / neopadavé), charakter jehličí, úhlu větví, pružnost větví atd. Listnaté stromy jsou schopné zachytávat větší objem sněhu vzhledem k větší ploše (DeWalle, David R. and Rango 2008). Zajímavý faktor je také flexibilita větví, protože určují, při jakém objemu sněhové pokrývky se větve ohýbají (Schmidt a Gluns 1991). Schmidt a Gluns dokázali, že při teplotě -12 °C až 0 °C, se větve stávají pružnější.

### **3.3 Sněhová hydrologie**

Hydrologie sněhu, nebo jinak sněhová hydrologie, je úzce profilované odvětví hydrologie, které se zaměřuje na pozorování sněhové pokrývky. Zvláštní význam má

pro vyšší zeměpisné šířky a hornatý terén (DeWalle, David R. and Rango 2008). Horské oblasti pokrývají zhruba 25 % povrchu půdy a často se označují jako „přírodní vodní nádrže“. Přebytek vody je z nich obvykle přepravován do přilehlých nížin. Horské oblasti pokrývají 52 % Asie, 36 % Severní Ameriky, 25 % Evropy, 22 % Jižní Afriky, 17 % Austrálie a 3 % Afriky (Stoffel a Marston 2016).

Historie této disciplíny naznačuje, že sníh byl sledován už v době starověkého Řecka. Z této doby máme zachované záznamy, které dávají do souvislosti sněhovou pokrývku se stavem hladiny řek v období tání (DeWalle, David R. and Rango 2008).

Na severní polokouli hraje zásadní roli jak v hydrologii, tak v rovnováze povrchové energie Země. Objem a načasování přítoků ovlivňují biologické a termodynamické procesy v oceánech. Odtoková oblast do Arktického oceánu je přibližně 1,5 násobku plochy Arktického oceánu. Tento potenciál je celosvětový. Akumulace sněhu a jeho následné tání je nejdramatičtější sezónní změna životního prostředí (Frei et al. 2012).

#### Konkrétní metody pro získání informací o sněhové pokrývce

##### a) Měření srážkoměrem

Poskytuje informace o čtyřech základních hodnotách, které u sněhu pozorujeme. Získávání dat pomocí srážkoměru vyžaduje konzistentnost v měření, a proto by samotný srážkoměr měl být připraven na začátku sledovaného období. Měření by mělo být přesné alespoň na jednu desetinu. Pozorování sněhové hloubky se provádí tak dlouho, dokud je země pokrytá sněhem (U.S. National Weather Service ©2013).

Celý tento proces je zatížen chybou, jelikož mění se meteorologické podmínky zapříčiňují možnost nekonzistentních podmínek při měření. Mimo to je důležité zmínit i lidský faktor, jelikož kvalita měření může být závislá i na zkušenostech pozorovatele (U.S. National Weather Service ©2013).

Vhodné umístění je v blízkosti stanoviště, kde pozorovatel nejčastěji přebývá, a to nejlépe v otevřeném terénu. Nejlepší oblast pro měření je taková, která není vystavována silnému nárazovému větru, který má schopnost napadený sníh odnést mimo pozorovanou oblast. Měření v místě, kde se sníh hromadí rovnoměrně zjednodušuje všechny ostatní aspekty pozorování a snižuje možnost chyb (U.S. National Weather Service ©2013).

Jakmile sníh dopadne do srážkoměru a změní skupenství, je následně obsah kapaliny změřen a tím je získána informace o obsahu vody v pozorovaném vzorku sněhu. Pozorovatel mimo jiné pracuje i se sněhovou měřicí holí, která je přenosná a může s ní měřit hloubku v libovolných bodech, nejlépe alespoň 100 metrů od srážkoměru, protože sněhová hloubka se může v jeho blízkosti značně lišit (U.S. National Weather Service ©2013).

Při správném pozorování by měli být měřeny 4 základní hodnoty:

- Maximální množství nově napadnutého sněhu
- Hloubka sněhu včetně jakéhokoliv ledu
- Obsah vody ve sněhu známý jako vodní ekvivalent
- Hloubka sněhu s obsahem vody, tedy obsah vody nového a staršího napadaného sněhu na zemi

b) Ultrazvukové senzory

Měří hloubku sněhové pokrývky na základě změřeného času, který urazí vysoko-frekvenční (50 kHz) zvuková vlna. K přesnému měření je potřeba sledovat teplotu vzduchu, která ovlivňuje rychlost přenosu zvukové vlny. Testy ukázaly, že tato technika je praktická a spolehlivá k získávání informací o sněhu. Jedná se o měření ex-situ (Dingman 2015).

c) Sněhová laťka / hole

Hloubka sněhu může být jednoduše změřena již zmíněno sněhovou latí / holí. Její nejspodnější bod se umístí na povrchu terénu a na ní vyznačené škále uvidíme ihned, jak vysoká je měřená vrstva sněhu (Dingman 2015).

d) Sněhové polštáře

Hodnota SVH může být měřena i pomocí sněhového polštáře. Obvykle má kruhový nebo osmihranný tvar membrány, která je ve většině případů vyrobena z kaučuku nebo jiného ohebného kovu. Tyto membrány obsahují nemrznoucí kapalinu. Váha sněhu na polštáři řídí tlak kapaliny, který je zaznamenáván pomocí manometru nebo snímače tlaku. Průměr polštáře je obvykle od 1 - 4

metrů, větší se doporučují pro výrazně hluboké sněhové vrstvy (Dingman 2015).

e) Airborne Microwave a Radar

Mikrovlnné záření (vlnová délka 0,1 cm až 50 cm), lze využít k dálkovému snímání hodnot pozorovaných u sněhové pokrývky – SVH, rozsah sněhu atd. Tok mikrovlnného záření závisí na hustotě sněhu, jeho teplotě, velikosti zrn aj. (Dingman 2015).

f) Satelitní pozorování

Využívají viditelné, infračervené a mikrovlnné vlnové délky. Poskytují informace o plošném rozsahu sněhové pokrývky, zvláště pro velké oblasti (Dingman 2015). Satelitní snímání nám umožňuje sněhové albedo. *Pozn.: Albedo je bezrozměrné, bez jednotkové množství, které udává informaci, jak dobře povrchu odraží sluneční energii. Jeho hodnota se mění +/- v intervalu <0-1>* (Qin et al. 2018). Na úrovni barev patří hodnota 0 černé, a naopak hodnota 1 bílé barvě. Hodnota 1 dělá z povrchu „dokonalý“ reflektor, odraží veškerou příchozí energii. Sníh dosahuje hodnot albeda nad 0,7, v případě procesu tání klesá přibližně ke 0,2 (NSIDC ©2016). Odlišnost albeda ovlivňuje i tloušťka vrstvy sněhu a její fyzikální vlastnosti. Odražená vlnová délka se zvyšuje s růstem velikosti sněhových krystalů (Mentaschi et al. 2013).

### 3.4 Zimní období v České republice

Evropské klima je z větší části regulováno severním Atlantickým oceánem a oteplováním nebo ochlazováním samotného evropského kontinentu. Díky vlivu moře a převažujícím západním větrům jsou zimy v České republice nejčastěji mírné (Huggel Ch., Carey M. 2015).

#### 3.4.1 Měření sněhové pokrývky na území ČR

Měření výšky sněhu je méně náročné než měření jeho vodní hodnoty. Jeho výška je měřena, pokud možno, v denním kroku a slouží mimo jiné k přepočtu zmíněné vodní hodnoty. Vodní hodnota je pro hydrology významnější než samotná výška sněhové pokrývky (ČHMÚ ©2006).

Celá síť, kterou ČHMÚ spravuje, je tvořena 800 měřicími stanicemi. Důležitou vodní hodnotu sněhu měří jedenkrát týdně na úrovni krajů. Informace o průměrné hodnotě

SVH a objemu vody uloženém ve sněhu, je oficiálně vydána pro každý ze 14 krajů. Mimo staniční sítě jsou v nepravidelných intervalech podnikány expediční měření, které si kladou za cíl zaznamenávat a určit průměrné výšky sněhu na volném prostranství i v lesích. Měřené profily jsou většinou 100 metrů dlouhé úseky, které jsou ve stejné nadmořské výšce, aby zprůměrování reflektovalo co nejvěrněji skutečný stav. Ve výpočtu jsou zahrnuty i body o různých náklonech svahu s různými vegetačními pokryvy. Tento druh měření je časově ale i fyzicky velmi náročný, a proto je uskutečňováno v nepravidelném intervalu, který zohledňuje i aktuální klimatické podmínky a dostupnost jednotlivých sledovaných profilů (ČHMÚ ©2006).

Vodní hodnota sněhu (dále jen SVH) slouží k vyhodnocování vodních zásob ve sněhové pokrývce. SVH je důležitá informace pro správu vodohospodářských děl, které jsou schopny svoji činnost přizpůsobit aktuálnímu stavu. Dále jsou na základě těchto hodnot schopni predikovat budoucí vývoj na větších vodních tocích. Výsledky jsou důležité i pro všechny státní podniky Povodí a.s., které shromažďují a hodnotí tyto informace. Následně pak rozhodují o preventivních upouštění nádrží (ČHMÚ ©2006).

K samotnému měření je používán srážkoměr, váhový sněhoměr nebo sněhový polštář pro lokality ve vyšších nadmořských výškách (ČHMÚ ©2006).

### **3.5 Umělé Družice**

První umělá družice byla na oběžnou dráhu Země vypuštěna 4. října roku 1957 a nesla jméno Sputnik. Její vypuštění předcházelo „Vesmírný závod“ mezi Spojenými státy a Sovětským svazem. Studená válka hnala Sovětský svaz kupředu, a proto aby je Američané nepředběhli, rozhodli se vypustit jednoduchý satelit. Sputnik byla kulová konstrukce se zdrojem energie, systémem řízení tepla, dvěma rádiovými vysílači a anténami (Siddiqi 2008). Po úspěchu Sputniku následovala mise Sputnik 2, která vynesla do vesmíru psa Laiku. Její start proběhl 3. listopadu 1957. První satelit Spojených států byl Explorer 1, který odstartoval 31. ledna 1958. S jeho vahou 13 kg, byl o celých 98 % lehčí než sonda Sovětského svazu (Howell 2017).

Zprvu sloužily družice pouze k experimentálním účelům, v šedesátých letech se začaly cíle jednotlivých velmocí lišit. Spojené státy začaly v roce 1961 posílat do vesmíru rakety s lidskou posádkou, zatímco Sovětský svaz vybudoval první vesmírnou stanici Salyut 1. Její provoz byl zahájen v roce 1971 (Howell 2017). Ostatní země začaly

vysílat meteorologické satelity pro přesnější předpověď počasí, telekomunikační a později i ty, které zprostředkovali internetové připojení (Howell 2017).

První průzkumná družice, kterou sestrojili Američané v roce 1959, byla označena jako KH-1 Corona. Corona byla schopná poskytovat snímky s rozlišením 7,5–12 metrů. Komplikovanější bylo doručení snímků zpět. Využívalo se standardní fotografické metody pomocí filmu, které přistávaly na povrchu Země (Day 1998).

Moderní vývoj se soustřeďuje na minimalizaci družic. Aktuální vývoj se soustředí na CubeSaty, které mají rozměry pouze 10 x 10 x 11 cm a váží pouze 1,3 kg. Jeho nespornou výhodou, díky své velikosti, nemusí být vynášen raketou, ale může být vypuštěn z komické stanice. S tím jsou spojené nižší náklady na výrobu a provoz. Lze jich do provozu nasadit více a tím budou schopni vytvořit hustější síť pro monitoring Země (Lem 2017).

### **3.6 Dálkový průzkum Země**

Technologický pokrok se rozšířil i do komerční sféry, kde snímky byly poskytovány soukromému sektoru nebo k vědeckým účelům. Snímky umožnily pozorovat Zemi z ideální perspektivy ke zkoumání klimatických a geologických procesů. Pozorovací technologie se zdokonalily, časové řady pozorování se prodloužily a samotný počet monitorovacích misí se zvýšil. Pro nedostupné oblasti jako Himaláje jsou pak družicové snímky jediným kvalitním zdrojem dat, jelikož data z fyzického měření jsou poměrně vzácná (Huggel Ch., Carey M. 2015).

Monitoring životního prostředí byl hlavním úkolem družice společnost Envisat. Její mise byla zahájena roku 2002 a byla vybavena pokročilým radarovým výškoměrem, radiometrem, přístrojem na měření teploty, dva atmosférické senzory a mnoho dalšího. Na oběžné dráze dosahovala rychlosti 7 km/s a obíhala Zemi ve výšce 800 km nad zemským povrchem. Náklady na její konstrukci se vyšplhaly na 2.9 miliardy amerických dolarů. Její mise skončila 8.dubna 2012 kdy Evropská kosmická agentura (dále jen ESA) ztratila s družicí kontakt (ESA ©2012).

#### **3.6.1 Aktuální družice na orbitě**

Dříve byli hlavními producenty družic instituce jako NASA, ESA a Roskosmos. Aktuálně se do popředí dostává společnost SpaceX, které se podařilo snížit náklady díky znovupoužitelným boosterům, které jsou součástí rakety Falcon 9. Dále stojí za

zmínku RocketLab, která se soustředí na dopravu malých satelitů, již zmíněných CubeSat

Většina družic obíhá za Karmánskou linkou, která je definována jako hranice mezi zemskou atmosférou a vnějším prostorem vesmíru. Je situována v nadmořské výšce 100 km nad mořem. Na družici působí v průběhu její mise pouze jedna síla, a to gravitace. Satelit se musí pohybovat rychlostí 8 km/s, aby se vyvaroval pádu zpět na Zemi. (Córdoba 2004)

Aktuálně podle úřadu OSN pro vesmírné záležitosti (United Nations Office for Outer Space Affairs) obíhá kolem Země 4 857 satelitů. Oproti roku 2017 se jedná o nárůst 4,79 % pro rok 2018. Z toho:

- 792 telekomunikačních s nárůstem o 6,7 %
- 661 monitoring Země s nárůstem o 10,9 %
- 213 pro technologický vývoj s nárůstem o 10,4 %
- 121 satelitů pro navigaci s nárůstem o 12 %
- 76 vědeckých satelitů
- 23 družic pro vědecké pozorování Země

Některé satelity mají více využití, celkem 278 z nich. Majoritní většina satelitů je pro komerční využití, celkem 826. Druhou největší skupinu tvoří satelity pro vládní využití, celkem 523. Nejméně jich je civilních, zhruba 138 (UNOOSA ©2018).

### 3.6.2 Dráhy družic

Jsou dvě:

- Geostacionární
- Polární

Geostacionární dráha vede ze západu na východ přes rovník. Družice se pohybují stejným směrem a stejnou rychlostí jako rotace Země. Rychlost rotace je 23 hodin, 56 minut a 4.09 sekundy. V literatuře tuto dobu nalezneme pod názvem hvězdný nebo také siderický den. Díky tomu se družice zdá oku pozorovatele jako nehybná, protože je vždy nad stejným místem (May 2017). Pro sledování počasí, je geostacionární dráha

nejvhodnější, jelikož umožňuje nepřetržitě sledovat celou polokouli. Pro mise tohoto typu není nutné dosahovat vysokého rozlišení, tedy vzdálenost 36 000 km nad zemí, není pro splnění mise problematická (May 2017).

Dráha družice s polární drahou vede od severu na jih, tedy od pole k poli. Rotující Země pod nimi jim umožňuje skenovat celou planetu po jednotlivých pruzích. (S. May 2017)

### **3.7 Družicový monitoring Země**

Při monitoringu životního prostředí jsou nutné výstupy ve vysokém rozlišení. Obvykle jsou tyto družice umístěny na nízké orbitě, která bývá zhruba 600 km nad zemským povrchem. Limitující je skutečnost, že takto nízko umístěné družice nejsou schopny snímat celou oblast nepřetržitě a poskytují snímky pouze dané oblasti, přes kterou přechází (ESA ©2012).

Samotný monitoring kryosféry je důležitý nejen pro výzkum, ale někteří obyvatelé v centrální Asii či na jihozápadě Spojených států, jsou na sezónních táních bytostně závislí, jelikož pro ně představuje důležitý zdroj vody (Huggel Ch., Carey M. 2015).

#### **3.7.1 Dálkové snímání kryosféry**

Umožňuje shromažďování dat o objektu měření ex-situ. Tato výhoda je obzvláště přínosná pro snímání a následnou analýzu kryosféry, která se často nachází v obtížně dosažitelných oblastech (ESA 2012). Další nespornou výhodou je, že družice jsou nám schopny poskytovat širší spektrum vlnových délek, než je lidské oko schopné zaznamenat. Při pozorování, lidské oko zaznamenává pouze elektromagnetické záření z povrchu objektu (ESA ©2012).

Sněhová pokrývka byla poprvé pořízena na snímku TIROS-1, který sloužil jako televizní a infračervený pozorovací satelit (Singer 1963). V polovině 60. let byl sníh úspěšně mapován každý týden po uvedení družice ESSA-3 (zkratka pro Environmental Science Service Administration), který pracoval s prostorovým rozlišením na minimum 3,7 km (NASA ©2016).

Pokud se snímání přesune na mikrovlnné, je snímání schopné nejen rozpoznat sněhovou pokrývku, ale je schopné do ní proniknout. Sněhová pokrývka však není vždy uniformní a její vlastnosti mění odrazené nebo emitované elektromagnetické záření. Teplota sněhu závisí na několika jeho parametrech, tj. velikost zrna, hustota,



hloubka, drsnost atd. (ESA ©2012). I přesto je sněhová pokrývka výborně měřitelná pomocí satelitů. Díky vysokému albedu, vytváří dobře odlišitelný kontrast od jiných přírodních povrchů (Singer 1963).

Sněhový signál mohou narušit vegetativní kryty jako stromy a keře (Jiang et al. 2012). Reflexe je ovlivněna i meteorologickými podmínkami, které omezují rozsah optického snímání. Dnes jsme schopni tyto limity překonat za pomoci vzdálených mikrovlnných snímačů, např. SAR. Umožňuje pronikat oblačností a vlhkými srážkami, čímž zajišťuje komplexnost pozorovací kapacity pro všechny druhy počasí. Polarimetrický systém SAR měří plochu elektrického proudu a zpětně odráží terénní vlastnosti spolu s polarizačním stavem. Zároveň je schopen rozpoznávat různé typy rozptylu, a proto jeho zavedení vede ke zkvalitnění výsledků (Snehmani et al. 2015).

I přes všechny technologické pomůcky bylo zapotřebí zavést modely pro popis vztahu mezi emisemi sněhové pokrývky a jejích fyzikálních vlastností, aby výsledky snímání z družic byly správně interpretovány (Jiang et al. 2012). Tato interpretace viditelných i infračervených mikrovlnných obrazů je o to složitější, pokud má terén značné prostorové rozdíly, které zapříčiňují i různé sněhové hloubky a povrchové charakteristiky sněhu. Výsledek takového pozorování je ovlivněn i úhlem snímání (Frei et al. 2012).

Mikrovlnná data můžeme rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní data jsou využitelná v poměrně velkém prostorovém měřítku, avšak jsou k dispozici pouze informace od roku 1999 do roku 2009 (Frei et al. 2012). Naproti tomu pasivní data jsou k dispozici od 70. let a jejich provoz zůstal nepřerušen. Pasivně získaná data nelze použít pro celosvětové studie. (Frei et al. 2012)

Mimo monitoring sněhové pokrývky byla studována i využitelnost satelitních snímků při pozorování aktuálního stavu povodí. Vzhledem k tomu, že multispektrální optické satelitní snímače mají vysoký oblačový efekt, není příliš užitečné je použít k mapování povodní a povodí v reálném čase (Zhang 2019).

### 3.7.2 Viditelné a infračervené záření

Zjištění, zda ve sledované oblasti je či není sněhová pokrývka, je poměrně jednoduchá mise. Díky vysokému albedu, které je až z 80 % ve viditelné části elektromagnetického spektra. Omezení existují, například absence slunečního světla a vysoká oblačnost. Mraky odrážejí významný podíl viditelného záření a tím zabraňují

satelitu zachycení radiačních informací. Ke všemu mraky a sníh mají velmi podobné albedo, což může vést k chybné interpretaci (Frei et al. 2012).

K nadhodnocení nebo podhodnocení výsledků mohou vést i vegetativní prvky. Typicky k nadhodnocení vede existence zamrzlého jezera. Některé satelity již používají filtr, které jsou schopny tyto signály rozlišit (Frei et al. 2012).

### 3.7.3 Pasivní mikrovlnné záření

Kvalita dat z pasivního mikrovlnného záření nezávisí na slunečním svitu. Za ideálních podmínek je rozptyl úměrný počtu sněhových zrn a satelity jsou pak schopny odhadnout i hmotnost sněhové pokrývky, která se často měří jako ekvivalent sněhové pokrývky (dále jen SWE). V praxi je využíváno skutečnosti, že mikrovlnný rozptyl ledových krystalů závisí na kmitočtu (Frei et al. 2012).

Omezení:

- Kapalná voda ve sněhu zabraňuje detekci, jelikož kapalná voda vydává záření pod 90 GHz, sníh je detekován nad 100 GHz (Levizzani, Laviola, a Cattani 2011)
- Nejistoty v odhadu hloubky jsou zapříčiněny fyzickou strukturou sněhu
- Metamorfóza sněhu vede k vyššímu mikrovlnnému rozptylu, a to vede ke změně SVH
- Vegetace
- Pokud SVH překročí emisi o zhruba 150 mm/m<sup>2</sup>, záření se stává větší, než rozptyl

## 3.8 Validované satelitní produkty

Existuje několik satelitních produktů, které jsou schopny dálkově snímat povrch Země a poskytovat vysoké časové, prostorové a spektrální rozlišení. Týdenní satelitní produkty jsou produkovány od roku 1966 pro severní polokouli s rozlišením 1,2 km<sup>2</sup> (Dingman 2015). Mezi produkty existuje obecně shoda. Rozdíly ve výsledných datech jsou pozorovány ve složitějších reliéfech a u různých druhů sněhu (Frei et al. 2012).

### 3.8.1. Formáty dat

Satelitní data jsou nejčastěji distribuována v multidimenzionálních formátech jako NetCDF, GRIB a HDF. Formálně jsou data uložena jako proměnné, kde každý proměnná je vícerozměrné pole, které reprezentuje data zachycená ve více časech nebo v rozdílných výškách (ESRI ©2016). Analyzované produkty dorazili ve dvou zmiňovaných formátech – GRIB2 a HDF.

- General Regularly Distributed Information, zkráceně GRIB je datový formát používaný v meteorologii pro ukládání historických a predikovaných dat o počasí
- Hierarchical Data Format, zkráceně HDF, je formát navržený Národním Centrem pro superpočítačové aplikace (NCSA), který slouží k ukládání vědeckých dat.

### 3.8.2. EUMETSAT – H SAF a H13

H-SAF je satelitní aplikace, vedená italskou meteorologickou službou (ITAF USAM). Spadá pod Evropskou organizaci pro využívání meteorologických družic (dále jen EUMETSAT). Na tomto projektu se podílí 21 členů z 11 zemí (Francie, Španělsko, Německo, Velká Británie, Portugalsko, Finsko a Dánsko). Každá jednotlivá země má pro tento projekt vyhraněný institut, přičemž právě italský H-SAF poskytuje satelitní hydrologická data (EUMETSAT ©2018).

Snímky umožňují sledovat srážky, vlhkost půdy a sněhové pokrývky napříč celou zeměkoulí. Mimo účely výzkumu si klade za cíl včasnější předpovědi přírodních katastrof jako jsou bleskové povodně a sesuvy půdy. Všechny produkty EUMETSAT jsou dostupné online (EUMETSAT 2018).



Obr. 2– Síť satelitních produktů EUMETSAT, (H-SAF ©2016, dostupné z: <<http://hsaf.meteoam.it/overview.php>>)

Produkty se zaměřením na monitoring sněhové pokrývky jsou v provozu od roku 2008. Využívány jsou dva druhy algoritmů pro:

- sních v horských oblastech
- sních na lokalitách bez výraznějších pahorkatin

Družice H-SAF využívá kombinaci mikrovlnného a infračerveného záření (HSAF ©2014).

První je produkt s označením H10, který slouží k rozpoznávání sněhové pokrývky. Je převeden z METEOSAT-SEVIRI. Seviri je přístroj na palubě družic MSG a jeho účel je monitoring Země v co nejvyšší kvalitě rozlišení. Princip jeho fungování je založen na shromažďování radiace z pozorované oblasti. Jeho detektory jsou citlivé na 12 různých pásech elektromagnetického spektra. Poskytuje nepřetržitý přenos dat na Zemi rychlostí 3,2 Mb/s. H10 má prostorové rozlišení  $0.05^\circ$  a při skenování využívá vysokou odrazivost sněhu ve viditelném spektru a nízkou odrazivost na kratších vlnových délkách (HSAF ©2014).

Produkt H12 je generován společností METOPAVHRR. AVHRR je multifunkční přístroj pro globální monitoring oblačnosti, teploty, povrchu moře, ledu, sněhu a vegetačního krytu. Poskytuje snímky dvakrát denně v rozlišení 1 km ve viditelných a infračervených pásmech elektromagnetického spektra. AVHRR snímá výstupní záření Země od horizontu k horizontu v šesti kanálech (EUMETSAT ©2018).

Produkt H11 monitoruje stav sněhové pokrývky a H13 obsah vody ve sněhu, více známý pod zkratkou SWE. Oba dva jsou produkty z mikrovlnných senzorů a mají prostorové rozlišení 0.25° (HSAF ©2014). Produkt H13, byl touto prací podroben analýze.

Obecně lze tvrdit, že algoritmy na detekci sněhové pokrývky (produkty H10 – H12) jsou složitější než algoritmy, které detekují pouze dešťové srážky. Obtíže monitoringu sněhu vyplývají z nedostatečné znalosti vertikálního složení mraků, která znesnadňuje správnou interpretaci (Levizzani et al. 2011). Organizace EUMETSAT připravuje ještě dva sněhové produkty, které budou prezentovány pod zkratkou H31 a H32. Důvody rozšíření produktového portfolia jsou především kvůli důležitosti detekce sněhu a jeho specifických vlastností. Přítomnost sněhu má vliv na vodní bilanci nižší atmosféry, a proto je ambice produktu H31 a H32, stát se mimo jiné vstupem například pro numerické modely předpovědi počasí (HSAF ©2016).

### H13

Produkt je získáván díky provozu družicové mise Aqua NASA Earth Science, která shromažďuje data o koloběhu vody na Zemi. Hlavním komponentem družice je mikrovlnný radiometr AMSR-E, který je v případě poruchy nahrazen méně kvalitním SSM/I, který je součástí satelitů DMSP. Skenery poskytují výstupy s konstantním zenitovým úhlem, který znamená konstantní optickou dráhu v atmosféře a homogenní vliv polarizačních efektů. Snímaný pás je vždy 10 km, což je dáno rychlostí družice (HSAF ©2014). Data dorazila ve formátu GRIB2.

### 3.8.3. Satelitní mise Aqua

Družicová mise Aqua je hlavní satelitní mise EOS (Earth Observing System), spravovanou společností NASA (Parkinson 2003). V rámci mise je sledováno například odpařování z oceánů, vodní páry v atmosféře, srážky, mraky, mořský led, vlhkost půdy, sněhová pokrývka na zemi a ledu. Dále sleduje i radiační toky energie, aerosoly, vegetační pokryv aj. (NASA ©2019).

Aqua je v podstatě sestra pro satelit Terra, který zahájil svoji misi v prosinci 1999. Lze je dohledat pod starším názvem EOS AM pro Aqua, EOS PM pro Terra. Obě dvě mají za úkol monitorovat „zdraví Země“. Terra je zaměřena na půdu, Aqua na vodu

(Parkinson 2003). Data získána ze satelitu Aqua poskytují informace o vodě ve všech formách.

Mise je součástí mezinárodního systému pozorování Země (EOS). Svůj provoz zahájila 4. května 2002 se stopou na sever přes rovník ve 13:30 a na jih přes rovník 1:30 v noci. Oproti tomu Terra se pohybuje přes rovník na jih v 10:30-10:45 místního času. Byla dopravena na palubě rakety Delta II 7920-10L, která odstartovala z letecká základny Vandenberg v Kalifornii. Byla dopravena do výšky 685 km a po 44 dnech vystoupala do výšky 705 km nad zemí (Parkinson 2003). Původně byla vyvinuta pro šestiletou životnost, ale vzhledem ke své kvalitě, pokračuje její provoz dále. Přenáší data ze svých čtyř nejkvalitnějších nástrojů – AIRS, AMSU, CERES a MODIS. Dále má na své palubě méně kvalitní AMSR-E a HSB, který fungoval přibližně devět měsíců, ale v roce 2003 selhal. Aktuálně se odhaduje šance na úspěšný provoz do začátku roku 2020 (NASA ©2019).



Obr .3 – Nákres orbity Aqua pro devět po sobě jdoucích přejezdů (J. Allen 2003, dostupné z: <https://1url.cz/EMk4I>)

Aqua obíhá kolem Země každý 98,8 min a pokaždé kříží rovník ve směru na sever ve zmiňovaných 13:30 místního času. Pro póly jsou sbírána data v rámci každé dráhy, a to ve výsledku dělá 14–15 snímaní denně, v závislosti na dni (Parkinson 2003).

#### 3.8.4. MODIS

MODIS je nástrojem na palubě družic Terra a Aqua. Je jediným nástrojem satelitu Aqua, který je zaměřený jak na biologické, tak na fyzikální měření systému země – atmosféra (Parkinson 2003). Od roku 2000 produkuje MODIS denní mapy (Hall 2007). Data, která jsou z tohoto snímání získávána, zlepšují porozumění globální

dynamiky a procesů, např. v oceánech a ve spodní atmosféře. MODIS je schopen vyhodnocovat změny a pomocí interaktivních modelů je schopen předpovědět globální změny. Díky tomu je schopný pomáhat tvůrcům politiky životního prostředí (NASA ©2014). Všechny jeho produkty mají prostorové rozlišení 250-1000 m na škále 0,4 až 14,4  $\mu\text{m}$  (Arslan 2016). Toto prostorové rozlišení je nejlepší ze všech přístrojů Aqua (Parkinson 2003).

Jak již bylo zmíněno, první model MODIS je součástí kosmické lodi Terra, která svoji misi zahájila 18. prosince 1999. Druhý model je integrován do kosmické sondy Aqua, která svoji činnosti úspěšně zahájila 4. května 2002. Nástroje MODIS nabízejí zkoumání atmosféry, oceánu a zemského povrchu různorodé komunitě uživatelů na celém světě (NASA ©2014).

Senzory měří záření ve 36 spektrálních pásmech. Snímají infračervené a viditelná elektromagnetická spektra. Je schopen poskytovat snímky s rozlišením 500 m, detekovat mraky i částečné pokrytí ve vysokých a středních zeměpisných šířkách. Navíc poskytuje informace o vytrvalosti mraků a využívá pozorování z minulých dnů. Družice MODIS spoléhají především na družice blízké polární oběžné dráze, ze kterých jsou dostupné denní snímky s vysokým rozlišením. Jiné algoritmy se opírají o geostacionární satelity, které mají výhodu vyššího časového rozlišení na úkor prostorovému rozlišení (Frei et al. 2012).

Jak již bylo zmíněno v oblastech se složitějším terénem může kvalitu snímků ovlivnit i momentální sklon družice. Různé úhly mohou chybně interpretovat sledované odrazy. Proto byl vyvinut model MODSCAG, který odhaduje velikost zrna a sněhový pokryv. Je toho schopen díky produktům MODIS a za pomoci lineární spektrální analýzy (Frei et al. 2012).

Projekt MODIS nabízí celkem deset druhů dat, které souvisejí s pozorováním kryosféry na Zemi. Pro účely této práce je popsáno pouze šest z nich, které se týkají pouze sněhu na pevnině. Zbylé čtyři poskytují informace o oceánském ledu.

Seznam produktů:

- MOD10\_L2 / MYD10\_L2
- MOD10A1
- MOD10A2

- MOD10C1
- MOD10C2
- MOD10CM

### MOD10\_L2 / MYD10\_L2

Jsou výsledkem MODIS radiačních kalibračních dat, geolokačních produktů MOD03 a MYD03, produktů MOD35\_L2, které snímají oblačnost. Výstup sněhového algoritmu MOD10\_L2 je datová sada s informací o sněhové pokrývce, zeměpisných souřadnicích, lokálních a globálních attributech. Algoritmus je schopen identifikovat jak sněhovou pokrývku na zemské povrchu, tak sníh na ledovcích.

### MOD10A1/MYD10A1

Poskytuje informace o denní sněhové pokrývce při rozlišení 500 m. Denní pozorování je získáváno na nejbližším nadiru, a díky tomu je dosaženo největšího pokrytí. *Pozn.: Nadir (též podnožník) je termín z astronomie, který leží přesně naproti zenitu. Zjednodušeně představuje bod na obloze, který leží přímo pod pozorovatelem (M.Ray 2018).*

MOD10A1 je vykreslován pomocí dlaždic v sinusovém průmětu. Průměrně jsou o velikosti 1200 x 1200 km. Pro oblasti, které nejsou alespoň z 10 % pokryty lesním porostem, jsou anizotropní rozptylové efekty upravovány pomocí modelu DIScrete a sněhových optických vlastností (Klein a Nolin 2000). Kompletní produkt je dostupný od února 2000 (NASA ©2016). Tato data byla zvolena pro bližší zpracování a jsou distribuovány ve formátu HDF.

### MOD10A2 / MYD10A2

Poskytují kompozity osmidenních sněhových map. Zobrazení je také v sinusové mřížce. Perioda 8 dní byla vybrána z důvodu přesně opakované pozemní stopy Terra a Aqua platformy. Osmidenní periodicitu začíná vždy první den v roce. Ne vždy se podaří získat pravidelné osmidenní vstupy, a proto dle doporučení provozovatele MODIS, by si měl uživatel vždy zkontrolovat jednotlivé atributy. Toto ověření slouží k přesnému zjištění o čase, kdy byly zkoumaná data získána (NASA ©2016).

### MOD10C1 / MYD10C1

Jsou výsledkem globálního klimatického modelování (dále jen CMG) a poskytují celkový pohled na sněhovou pokrývku při rozlišení 0,05°. Rozsah sněhu je



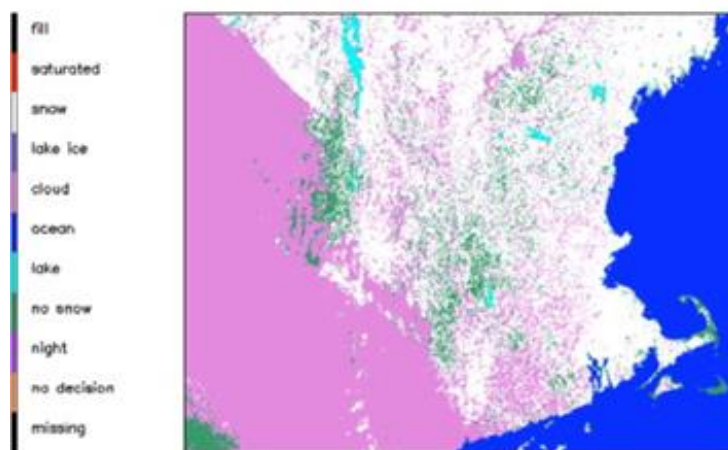
zpracováním produktu MOD10A1 a MYD10A1. Sníh je vyjádřen jako procento pokrytí vstupních dat při rozlišení 500 m v jedné buňce CMG (NASA ©2016).

### MOD10C2

Opět se jedná o klimatický model CMG, který má ale osmidenní periodu. Je generován sloučením MOD10A2 a binováním dat o rychlosti 500 m až 1/2° nebo s rozlišením 5,6 km. Pro globální mapu je tvořen ze 3600 řádků po 7200 sloupcích. Obsahuje informace o sněhové pokrývce, oblačnosti a kvalitě informací (NASA ©2016).

### MOD10CM

Produkt, který poskytuje informace o sněhové pokrývce v měsíčním kroku (NASA ©2016).



Obr. 4 – MODIS produkt ze dne 28.10. 2017, obraz zpracoval J.Miller a NASA,(zdroj online: <https://1url.cz/IMG80>)

## **4. Metodika**

Srovnání byl podroben produkt H13 od společnosti H-SAF a MYD10A1 z družice MODIS Aqua. Jak již bylo zmíněno výše, produkt H13 je získáván také díky družici Aqua, a proto byla zvolena tato kombinace. K analýze a základnímu zpracování bylo použito jazyka R verze 3.5.2, k dostání na odkaze: < <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/> > . K prvotnímu náhledu na obdržena data byla využita aplikace Panoply verze 4.10.4. Veškeré analýzy byly provedeny na operačním systému Windows 10 Pro 64bit a práce zmiňuje možnosti, které jsou na tomto systému použitelné. V případě jiných systémů existují i odlišné nástroje ke stahování, zpracování a extrakci výsledných souborů. K obecné informaci a sumarizaci

jednotlivých sledovaných období byl použit program Excel. Je nutné zmínit, že kvalita výsledných dat závisí na meteorologických podmínkách, které panovaly v době snímání, a proto nelze sledované produkty hodnotit pouze na základě této práce, která sledovala a analyzovala pouze dvě zimní období 2017 a 2018 na relativně malé doméně České republiky. Ke všemu v rámci této práce nebyly analyzovány doprovodné inženýrské aplikace, jako například zahrnutí výsledků ze senzoru SAR, který umožňuje monitoring za každého počasí.

V rámci této práce se detailněji neanalyzuje prostorová distribuce pixelů obsahující sníh, pouze jejich četnost.

## **4.1 Studované území**

Česká republika je vnitrozemský stát střední Evropy. Má rozlohu 78 866 km<sup>2</sup>. Nad 67 % území leží v nadmořské výšce do 500 m.n.m., 32 % je v rozmezí od 500-1000 m.n.m. a pouze 1 % dosahuje >1000 m.n.m. Její území má přechodný typ klimatu. Klima je popsáno jako částečně oceánské a částečně kontinentální. Dominuje západní proudění vzduchu od Atlantského oceánu, tedy oceánské klima se mění na kontinentální ve směru do západu na východ. Důsledkem toho je pravidelné střídání čtyř ročních období (T. Pánek, J. Hradecký (Department of Physical Geography and Geoecology 2016)).

Nejchladnějším měsíce jsou sestupně – leden, prosinec, únor. Nejnížší průměrná roční teplota je 0,2 °C. Relativní vlhkost vzduchu je řádově 60–80 %. Nejrozlehlejší hornatinou je Šumavská se 4549 km<sup>2</sup>, jejíž nejvyšší bod Plechý leží v nadmořské výšce 1378 m.n.m. Nejvyšší hornatinou jsou Krkonoše s rozlohou 454 km<sup>2</sup> a nejvyšším bodem Sněžkou ve 1602 m.n.m (CZRegion ©2019).

## **4.2 Data**

### **4.2.1. MODIS - MYD10A1**

Modis, spektro-radiometr se středním rozlišením poskytuje data ze dvou satelitů – Terra a Aqua. Jediný rozdíl mezi nimi je v době snímání a orbita. (Dong a Menzel 2016b). Družice MODIS jsou vybaveny 36 spektrálními pásmy (od viditelného spektra do infračerveného) (Dong a Menzel 2016a).

Pro práci byl použit produkt MYD10A1 z družice Aqua. Poskytuje data o detekci sněhu s prostorovým rozlišením 500 m, pokud jsou podmínky osvětlení blízko

ideálního stavu, tzn. je slabá oblačnost a je přítomna alespoň 3 centimetrová souvislá vrstva sněhu. Rozmanitost zemského povrchu ztěžovala vývoj celosvětově použitelné detekce sněhu. Jako nejpřesnější byla producentem zvolena technika indexu rozdílu normalizovaného sněhu, dále jen NDSI, u které statistika uvádí přesnost 88–93 %. Byl vytvořen za účelem rozeznání povrchu bez sněhu od povrchu pokrytého sněhem, popřípadě od dalších jiných možností (Dong a Menzel 2016a). Algoritmu NDSI detekuje sněhovou pokrývku v rozsahu hodnot  $\langle 0,0-100,0 \rangle$ , který umožňuje mapovat sníh i v případě nízkého albeda a nízké vrstvy sněhu (Riggs a Hall 2015). NDSI je míra relativní velikosti rozdílu odrazivosti mezi viditelným (zeleným) a krátkovlnným infračerveným (SWIR). V detekci sněhu je algoritmus NDSI úspěšný právě proto, že sníh velmi dobře absorbuje obě dvě zmiňovaná spektra. Hodnoty narůstají od 0 do 100 podle rozsahu albeda sněhu monitorované oblasti. Algoritmus je založen na reflexním charakteru sněhu. Sníh má vysokou odrazivost ve viditelném pásmu (0,545–0,565  $\mu\text{m}$ ) a nízkou odrazivost v blízkém infračerveném pásmu (1,628–1,652  $\mu\text{m}$ ) (Dong a Menzel 2016a).

$$NDSI = \frac{b_4 - b_7}{b_4 + b_7} \quad (4)$$

Kde:

- $b_4$  = viditelné zelené pásmo
- $b_7$  = krátkovlnné infračervené (SWIR)

*Pozn.: V případě analýzy dat ze satelitu Terra by bylo pásmo 7 nahrazeno pásmem 6. Jelikož satelit Aqua v pásmu 6 vykazuje většinou nefunkční detektory (Dong a Menzel 2016a).*

NDSI klasifikuje pixel jako pokrytý sněhem pokud splňuje:  $NDSI \geq 0,4$ , odrazivost v pásmu MODIS 2 (0.841–0.876  $\mu\text{m}$ )  $> 11\%$  a odrazivost v pásmu 4  $> 10\%$  (Hall et al. 2002).

### Přístup k datům

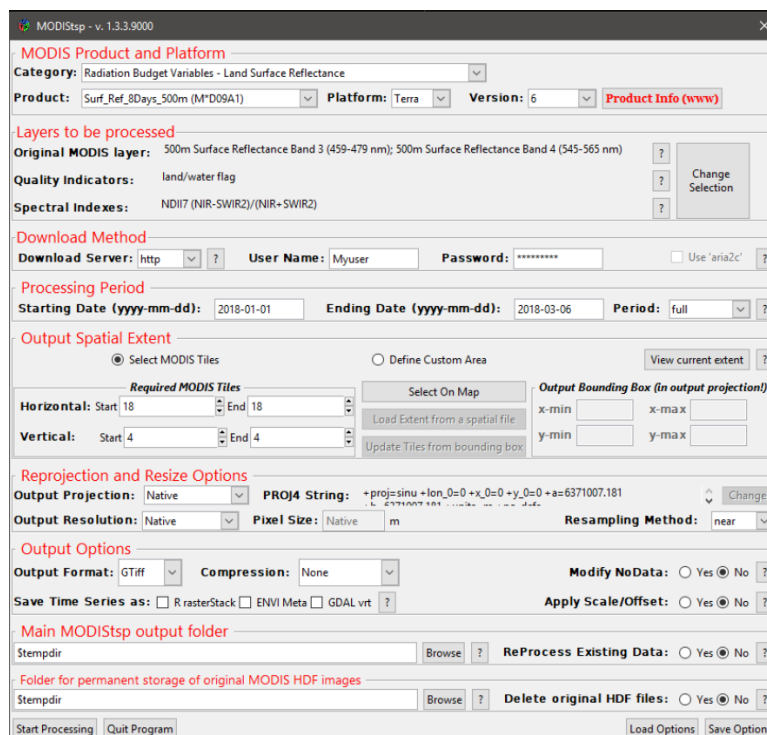
K datům je umožněn přístup skrze webové stránky National Snow & Ice Data Center (dále jen NSIDC) na odkazu: <https://nsidc.org/data/MYD10A1> a nebo knihovny jazyka R které jsou vytvořené pro účely stahování a následné zpracovávání vybraných dat. V případě stahování skrze web, si po zvolení preferovaného produktu uživatel zvolí na projektovaném glóbu oblast zájmu, pokud tak neučiní, je defaultně nastaveno

stahování dat pro celou planetu. *Pozn.: Pro zajímavost, byl tento postup vyzkoušen. Perioda snímků byla určena jako denní a zvolené období mělo 302 dní. Celkové počet souborů činil přes 30.000, konkrétně se jednalo o soubory .xml, .hdf a .jpg. Připojení na běžné síti vypočítalo dobu stahování na +15 hodin.* Dále je možno stahování skrze script či objednání zazipovaného souboru. Tato práce doporučuje jako nejlepší a zároveň uživatelsky nejpřívětivější způsob skrze balíček MODISsp. Důležité je zmínit, že k samotnému používání nestačí nainstalovat pouze MODISsp, ale také GTK+ knihovnu. Bez funkčně nainstalované GTK+ knihovny nebude možná následná instalace MODISsp, při spuštění instalace bez GTK+ prostředí RStudia upozorní na absenci požadovaného programu a nabídne jeho okamžitou instalaci. Všechny potřebné balíčky v doporučeném pořadí instalace:

Název	Účel
devtools	tvorba R knihoven
RGtk2	grafické rozhraní Gtk, Gimp Tool Kit.
gWidgetsRGTK2	port ke knihovně RGtk2
mapedit	výběr a editace geoprostorových dat
raster	práce s rastery
MODISsp	aplikace k přímému stažení archivovaných MODIS dat

Tab. 2 – Přehled nutných knihoven ke spuštění knihovny MODISsp

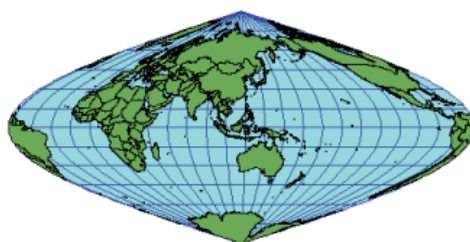
Po úspěšné instalaci se spustí program voláním funkce #MODISsp(), která otevře v jiném okně následující tabulku (obrázek číslo 5), ve které lze velmi přehledným způsobem zvolit požadovaný produkt, rozlišení snímků, platformu, požadovanou periodu, metodu stahování a další.



Obr. 5 – Tabulka z funkce MODISStp ze stejnojmenné knihovny

Jako největší plus této aplikace je ve formě zvolení studované oblasti. V případě znalosti přesných souřadnic, je možnost zadání ručně. V opačném případě lze ručně vybrat preferovanou oblast skrze interaktivní mapu, která se po volbě „Select On Map“ otevře v novém dialogovém okně domovského prohlížeče. Další nesporné plus je okamžité stahování, uživatel nemusí čekat na objednaný zazipovaný soubor.

Projekce na mapu zpracovávaných produktů je sinusoidní. Je známá také pod názvem Sanson-Flamsteed. Jedná se o pseudo-válcovou projekci, kde jsou všechny rovnoběžky a centrální poledník rovný. Meridiány jsou křivky založené na sinusových funkcích. Amplitudy se zvyšují s odstupem od středového poledníku. Všechny oblasti jsou vyobrazeny poměrově přesně (ESRI ©2016).



Obr. 6 – Sinusoidová projekce (ESRI ©2016, dostupné z: <<https://1url.cz/PMFwR>>)

I když byla zájmová oblast vykreslena na mapu, program stejně stáhne všechny 4 dlaždice, ve kterých se nachází Česká republika. Snímky jsou staženy v hierarchickém datovém formátu (dále jen .hdf). Metadata byla zobrazena pomocí aplikace Panoply, která umožňuje jednoduše zkontrolovat obsah (viz. obrázek 7), na kterém jsou vyobrazeny informace o metadatech studovaného satelitního výstupu.



Obr. 7 – Snímek obrazovky z aplikace Panoply verze 4.10.4.

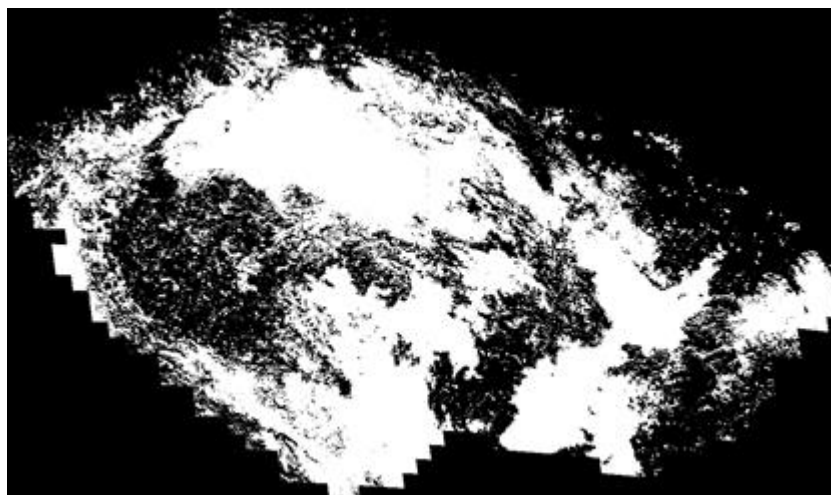
Informace o defaultně nastavených hodnotách rasterů, jsou vyhledatelné v aplikaci Panoply pod označením „Key index“. Hodnoty jsou prezentovány v tabulce 3 a nejsou formátovány podle žádných jednotek. Snímky jsou distribuovány ve 2D dimenzi.

Označení	Hodnota
Sníh	0 - 100
Chybějící data	200
Žádné zařazení	201
Noc	211
Vnitrozemní vody	237
Oceán	239
Mrak	250
Nasycený detektor	254
Vyplněno	255

Tab. 3 – Tabulka sledovaných hodnot algoritmem NDSI u produktu MYD10A1

Snímky je potřeba složit dohromady. Celá doména pro jeden den pozorování se skládá ze čtyřech dlaždic. Jejich spojení bylo vytvořeno pomocí funkcí raster() a merge(), které jsou součástí knihovny raster. Dále bylo nutné napasovat raster ČR na složený satelitní snímek. Aby byla zaručená stejná projekce, byla použita funkce spTransform(), která je součástí knihovny Rgdal. Následně byl satelitní snímek oříznut podle požadované domény funkcí crop() z knihovny raster.

Rasterová data bylo nutné převést do matice. Její hodnoty byly pro přehlednost redefinovány. Cílem bylo nadefinovat všechny tři produkty stejně. Na obrázku níže je vyobrazen raster, který uživatel získá z výsledků jako první.



Obr. 8– Vizualizace rasteru produktu MODIS pro den 1.1. 2017 (NASA ©2018, dostupné z: <  
<https://nsidc.org/data/MYD10A1>>)

*Pozn.: Pomocí knihovny ggplot2 lze velmi přehledně nadefinovat barvy rasteru tak, aby byla možná prvotní interpretace výsledků pouze z vizuálu studované domény.*

Interval	Označení	Interpretace
0 - 100	1	Sníh
100 - 255	0	Žádný sníh

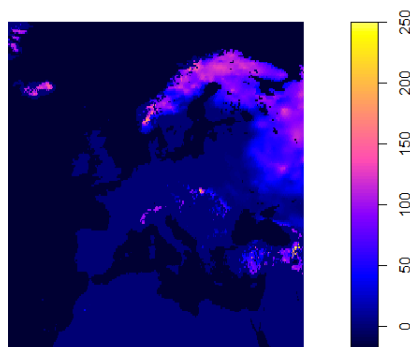
Tab. 4– Redefinované hodnoty matice u produktu MODIS

Tabulka 4 zobrazuje redefinované a sledované hodnoty pro produkt MODIS. Uvedené intervaly jsou defaultně uzavřeny zprava.

Z nově vytvořené a předefinované matice byly hodnoty vytaženy pro každý jednotlivý den a uloženy ve formu CSV, se kterým se dále pracovalo při výpočtu variability v jazyce R, míry nadhodnocení a podhodnocení.

#### 4.2.2. H-SAF – H13

Aktuálně nabízí produkty H-SAF pouze jednu cestu k souborům. Data získaná v předchozích 60 dnech je možné stáhnout ihned skrze webové stránky <<http://hsaf.meteoam.it/snow.php>>. O data, která byla naměřena v pozdější době bylo nutné si skrze jejich stránky zažádat. Pro účely této práce bylo nutné zažádat o archivované soubory. Průměrně byl přístup k datům získán do třech pracovních dnů od podání žádosti. Každý den byl uložen ve formátu .grib2, který distribuuje data (nejčastěji vědecká) v binární formě.



Obr. 9 – První výstup produktu H-13 od společnosti H-SAF pro den 1.1. 2017

Produkt byl opět zpracováván jazykem R verze 3.5.2. Otevření a vizualizace rasteru byla oproti MODIS velmi snadná a pro každý den je obdržen jeden soubor. Není tedy nutné zájmovou oblast „skládat“ s funkcí merge() jako to bylo u produktu MODIS. K otevření a vizualizaci byla použita funkce readGDAL() z knihovny rgdal a základní funkce plot. Matice bylo opět nutné reklasifikovat. Celkový postup základního zpracování byl shodný jako u MODIS.

<b>Interval</b>	<b>Označení</b>	<b>Interpretace</b>
0 - 10	0	Bez sněhu
10 - x	1	Sníh

Tab. 5 – Redefinované hodnoty matice u produktu ČHMÚ

Produkt H13 s detekcí sněhu zároveň měří i hodnotu SVH, a proto je spodní interval zprava uzavřen proměnnou x. U jednotlivých dnů se konečná hodnota měnila dle hodnot SVH, které zároveň určovala i interpretaci sněhu.

#### 4.2.3. ČHMÚ DATA

Poskytnutá data pokrývají období listopad až duben pro zimy 2016 / 2017 a 2017 / 2018. Pro účely této práce bylo pracováno a zanalyzováno pouze období od ledna do dubna roku 2017 a 2018. Datová sada nepokrývá každý den, ale obsahuje pouze měření v periodě jedenkrát za týden. Především z tohoto důvodu se uvažuje o satelitních snímcích jako o doplňkovém zdroji dat, který by byl schopen alespoň v částečném režimu poskytovat denní periodu informací. Pro každou zimu je naměřeno celkově 17 dnů, dohromady je zpracováno 34 měření, z toho čtyři dny neposkytují žádné informace kvůli celkově slabé sněhové pokrývce na území České republiky. Výsledně je zpracováno pouze 30 měření.



Prvotně byla provedena základní analýza sledovaného období. K úvodní a analýze byly použity data, která byla distribuována ve formátu .xls. Zbylá data byla obdržena ve formátu ArcGRID, který je starý a je nutná velmi opatrná manipulace. K poškození dat může dojít i při běžné manipulaci se správcem souboru. *Pozn.: Při prvotním zpracování této úlohy k poškození došlo, a to pouze při přesunu jednoho souboru do nově vytvořené složky.* Jazykem R verze 3.5.2 byla zpracována data ve formátu .adf, za pomoci knihovny raster. Stejně jako v předchozích případech byla matice překlasifikována na požadované hodnoty. Viz. tabulka níže.

Interval	Označení	Interpretace
0 - 10	0	Bez sněhu
10 - x	1	Sněh

Tab. 6 – Redefinované hodnoty matice u produktu ČHMÚ

### 4.3 Míra variability

K porovnání míry variability byly použity čtyři metody: BIAS, RMSE, AM a  $R^2$  jinak označovaný koeficient determinace. Výpočty byly provedeny v jazyce R verze 3.5.2. za pomoci funkcí knihovny hydroGOF. Podkapitoly níže v krátkosti představují jednotlivé metody.

#### 4.3.1. AM

Aritmetický průměr, jako ukazatel centrální hodnoty diskrétního souboru čísel. Obecný vzorec je uveden pod rovnicí číslo 5.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{x_n} \quad (5)$$

#### 4.3.2. RMSE

Zkratka pro Root Mean Square Error, v češtině jinak jako standartní odchylka reziduí. Ukazuje, které data nejlépe odpovídají skutečným, naměřeným hodnotám (Barnston 1992). RMSE je nejčastěji používaná míra neurčitosti (Ondráčková 2012). Obecný vzorec je uveden níže.

$$\text{RMSE}_{fo} = \left[ \sum_{i=1}^N (z_{fi} - z_{oi})^2 / N \right]^{1/2} \quad (6)$$

Kde:

- $\Sigma$  = suma

- $(z_{fi} - z_{oi})^2 =$  rozdíly, čtverce
- $N =$  velikost vzorku

RMSE udává, do jaké míry se odhadovaná data liší od naměřených (Tricia Lobo 2017). Čím je hodnota RMSE menší, tím lepšího výsledku dosahují analyzovaná data, tzn. je grid podobný referenčním bodům (Ondráčková 2012). Jeho hodnoty rostou od 0 do nekonečna, přičemž nejlepší výsledek je 0.

Pro výpočet byla z knihovny hydroGOS zvolena funkce `rmse()`, jejíž výsledné hodnoty jsou udávány v % (M. Bigiarini 2017).

#### 4.3.3. Koeficient determinace – $R^2$

Udává, jaký podíl rozptylu v pozorování závislé proměnné se podařilo regresí vysvětlit. Větší hodnoty znamenají větší úspěšnost regrese.“ Koeficient determinace jde od nekonečna do 1. Hodnota 1 znamená nejlepší výsledek, tj. přesnou predikci (Friesl 2014). Zjednodušeně nám poskytuje informaci, jak dobře regresní rovnice zapadá k analyzovaným datům (Krause a Boyle 2005). V knihovně hydroGOF se funkce nachází pod zkratkou `br2()`.

Obecně lze vzorec zapsat jako:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (7)$$

Kde:

- $SS_{res}$  = reziduální součet čtverců
- $SS_{tot}$  = celkový součet čtverců

Reziduální součet je minimální součet čtverců  $S$ , který získáme odhadem parametru regresního modelu. Nejběžněji je získán pomocí metody nejmenších čtverců. Celkový součet čtverců pak analogicky udává celkový součet čtverců (Friesl 2014).

#### Procentuální BIAS

BIAS poskytuje informaci o systematické chybě, který může nastat ve všech fázích analýzy. Chyba se může vyskytnout při sběru, analýze i samotné interpretaci. Tento odhad nám umožňuje se vyhnout systematickým chybám, které mohou vést ke konzistentně vysokým nebo nízkým hodnotám, ve srovnání se skutečnými (Bert Markgraf 2018). Zjednodušeně lze říci, že BIAS je rozdíl mezi průměrem odhadů a

skutečnou hodnotou (Madsen 2000). Typy BIAS se rozdělují podle toho, kde byla sledována – při měření, selekci, publikační a analytická (Neyman J. 1936).

V knihovně hydroGOF se funkce pbias() řídí následujícím vzorcem:

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (8)$$

Kde:

- $S_i$  = hodnoty dané jednotlivými satelitními produkty
- $O_i$  = hodnoty získané pozemním měřením

## 5. Výsledky

### 5.1 ČHMÚ DATA

Kapitola přináší podrobnější popis jednotlivých zim na studovaném území. Data celkově měla velikost 2,41 GB. Tabulky přinášejí důkladnější popis jednotlivých dnů, které pro účely této práce poskytl ČHMÚ. Pro obecné seznáení čtenáře se studovanými obdobími jsou interpretovány průměrné hodnoty.

Použité zkratky: SP = sněhová pokrývka

m.n.m. = metrů nad mořem

#### 5.1.1. Období leden až duben 2017

„Rok 2017 byl v ČR teplotně nadprůměrný, kdy průměrná roční teplota 8,6 °C byla o 0,7 °C vyšší. Zima 2016 / 2017 byla jako celek teplotně normální. Sněhové zásoby vody se začaly tvořit v druhé polovině listopadu 2016. Nejvyšší zásoby vykazovalo povodí Labe po Přelouč (45 mil. m<sup>3</sup>; 7,0 mm).“ (R. Čekal a kol. 2017)

Datum	Odhad celkového množství vody ČR [10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> ]	Objem vody průměr [mm/m <sup>2</sup> ]	Dodatečné informace
2.1. 2017	0,221	2,8	SP nad 600 m.n.m.
9.1. 2017	1,688	21,4	
16.1. 2017	2,63	33,4	SP i do 600 m.n.m.
23.1. 2017	2,72	34,5	
30.1. 2017	2,69	34,1	Zvýšená inverze
6.2. 2017	3,04	38,5	

13.2. 2017	2,58	32,7	
20.2. 2017	1,72	21,88	
27.2. 2017	0,65	8,3	Tání SP pod 600 m.n.m.
6.3. 2017	0,43	5,5	Příbytek SP nad 600 m.n.m.
13.3. 2017	0,41	5,3	SP nad 600 m.n.m.
20.3. 2017	0,33	4,2	SP nad 800 m.n.m.
27.3. 2017	0,25	3,2	SP nad 850 m.n.m.
3.4. 2017	0,1	1,1	SP nad 1000 m.n.m.
10.4. 2017	0,03	0,5	
17.4. 2017	0,01	0,2	SP nad 1200 m.n.m.
24.4. 2017	0,06	0,8	SP nad 1200 m.n.m.

Tab. 7 – Průměrné vodní hodnoty sněhu v ČR pro zimu 2017 (zdroj dat: ČHMÚ)

Na úrovni krajů zobrazuje stav tabulka níže, která přináší porovnání mezi kraji, které po sledované období dosahovali nejvyšší vodní hodnoty sněhu (dále jen SVH) a nejmenší. Podmíněné formátování zobrazuje vývoj SVH v jednotlivých dnech.

Datum	Kraj max.	SVH (mm)	Kraj min.	SVH (mm)
2.1.	Liberecký	11,3	Praha	0
9.1.	Liberecký	58,3	Praha	8,1
16.1.	Liberecký	92,9	Praha	6,9
23.1.	Liberecký	91,9	Praha	8,2
30.1.	Liberecký	88,3	Praha	7,3
6.2.	Liberecký	95,6	Praha	7,2
13.2.	Liberecký	85,3	Praha	3,2
20.2.	Liberecký	66,9	Praha	0
27.2.	Liberecký	44,5	Praha, Středo.	0
6.3.	Liberecký	29,1	IV. Kraje	0
13.3.	Liberecký	28,7	IV. Kraje	0
20.3.	Liberecký	28,7	IV. Kraje	0
27.3.	Liberecký	21,7	IV. Kraje	0
3.4.	Liberecký	10,1	IV. Kraje	0
10.4.	Liberecký	2,9	VIII. Krajů	0
17.4.	Liberecký	2,1	VIII. Krajů	0
24.4.	Olomoucký	4,6	VI. Krajů	0

Tab. 8 – Porovnání hodnot SVH na úrovni krajů v ČR pro rok 2017 (zdroj dat: ČHMÚ)

Na druhé a třetí příčce se ze začátku měsíce leden držel Moravskoslezský kraj, ale s postupujícím časem se na druhé místo vždy zařadil Královehradecký kraj v závěsu

s Karlovarským. Výraznější změny přišli s březnem, kdy se o třetí místo dělil Karlovarsky kraj opět s Moravskoslezským. Po 20.3. dosahoval hodnot nad 10 mm/m<sup>2</sup> SVH pouze jediné dva kraje – Liberecký, Královehradecký. Koncem dubna na většině hřebenech hor sněhová pokrývka přibyla a nejvýraznější nárůst byl naměřen v Olomouckém kraji, který byl následován krajem Moravskoslezským. Zároveň pozorujeme od data 27.2. přírůst regionů, ve kterých byla sněhová pokrývka nulová až do konce sledovaného období. V žádném sledovaných krajů opětovně SP nepřibyla. Jakmile hodnota SVH dosáhla nuly, nezvedla se v žádném z případů již do kladných hodnot.

#### 5.1.2. Období leden až duben 2018

Celé tato perioda byla doprovázena velmi vysokými teplotami. Ke konci dubna se převážně vyskytovala nesouvislá sněhová pokrývka, s výjimkou na hřebenech Krkonoš a Šumavy. Od 16.4. díky této skutečnosti nebylo možné i díky omezenému počtu stanic stanovit vhodný odhad celkového množství vody ve sněhové pokrývce. (ČHMÚ ©2018)

<b>Datum</b>	<b>Odhad celkového množství vody ČR [10<sup>9</sup>m<sup>3</sup>]</b>	<b>Objem vody průměr [mm/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Dodatečné informace</b>
1.1.2018	0,42	5,3	
8.1.2018	0,43	5,5	
15.1.2018	0,44	5,6	
22.1.2018	1,6	20,4	Nová SP každý den
29.1.2018	0,91	11,6	Snížení SP pod 800 m.n.m.
5.2.2018	0,75	9,6	Zvýšení SP nad 1000 m.n.m.
12.2.2018	0,92	11,7	
19.2.2018	1,19	15,1	
26.2.2018	1,18	14,9	
5.3.2018	1,19	15,1	
12.3.2018	0,63	8,1	
19.3.2018	0,75	9,6	
26.3.2017	0,53	6,8	

2.4. 2018	0,45	5,8	
9.4. 2018	0,26	3,3	Tání SP
16.4. 2018	x	x	Nebylo možné měření
23. 4. 2018	x	x	Nebylo možné měření

Tab. 9 - Průměrné vodní hodnoty sněhu v ČR pro zimu 2018 (zdroj dat: ČHMÚ)

Oproti roku 2017 je znatelné snížení průměrných hodnot SVH na územích České republiky. Zatímco v předchozím roce přesahovala hodnota 90 mm/m<sup>2</sup> dokonce ve třech naměřených dnech, v roce 2018 nedosáhla hodnota SVH ani v jednom případě hodnoty nad 50 mm. Maximální SVH byla dosažena dne 22.1. v Libereckém kraji s hodnotou 41,6 mm/m<sup>2</sup>.

Datum	Kraj max.	SVH (mm)	Kraj min.	SVH (mm)
1.1.	Liberecký	18,1	Praha	0
8.1.	Liberecký	22,2	IV. Kraje	0
15.1.	Liberecký	18,7	Praha, Středo.	0
22.1.	Liberecký	41,6	Praha	0,8
29.1.	Liberecký	32,9	Praha	0
5.2.	Liberecký	31,3	Praha	0
12.2.	Liberecký	31,9	Praha	0,1
19.2.	Liberecký	32,3	Praha	0,1
26.2.	Liberecký	32,4	Praha	0
5.3.	Liberecký	32,4	Praha	0
12.3.	Liberecký	25,5	III. Kraje	0
19.3.	Liberecký	28,7	Jihomoravský	0,2
26.3.	Liberecký	23,6	IV. Kraje	0
2.4.	Liberecký	22,9	IV. Kraje	0
9.4.	Liberecký	13,8	IV. Kraje	0
16.4.	x	x	x	x
23.4.	x	x	x	x

Tab. 10 – Porovnání hodnot SVH na úrovni krajů v ČR pro rok 2018 (zdroj dat: ČHMÚ)

O druhé a třetí místo se pravidelně dělil Karlovarský, Královehradecký a Plzeňský kraj. Stejně jako v předchozím roce, přibyla v dubnu sněhová pokrývka a zároveň se tím zvýšila hodnota SVH v Olomouckém kraji. Ve dne 9.4. byla druhá a třetí nejvyšší hodnota SVH v Olomouckém a Moravskoslezském kraji. Hodnota SVH v těchto regionech dosahovala hodnot pod 10 mm/m<sup>2</sup>.

### Srovnání průměrných objemů vody na m<sup>2</sup> období 2017 a 2018

Srovnání je uvedeno v tabulce číslo 11. Meziměsíční srovnání je uvedeno ve sloupcích „Rozdíl“ a „Hodnota růstu/poklesu“. Položka „Rozdíl“ je získána za pomoci vzorce číslo 1, zatímco „Hodnota růstu/poklesu“ byla získána podle vzorce číslo 2. Jak je

vidět, porovnání potvrzuje tvrzení, že rok 2018 byl oproti předchozímu výrazně chudší na sněhové srážky. Pokud bychom chtěli procentuální rozdíl, stačí vynásobit výsledky sloupce „Hodnota růstu/poklesu“ číslem 100. Maximální hodnoty poklesu bylo dosaženo na začátku února, kde byl pokles až 75 %.

Použité vzorce:

$$\Delta y = y_2 - y_1 \quad (9)$$

Kde:

- $\Delta y = \text{rozdíl}$
- $y_2 = \text{rok 2018}$
- $y_1 = \text{rok 2019}$

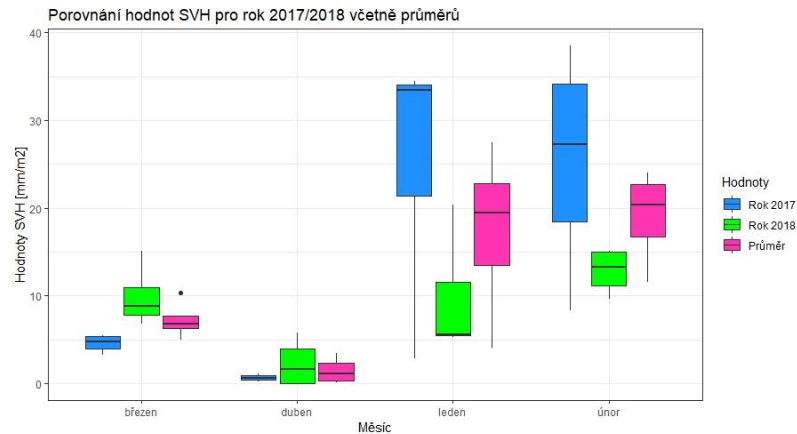
$$a = \frac{y_2 - y_1}{y_1} \quad (10)$$

Kde:

- $a = \text{hodnota růstu nebo poklesu}$

Měření	Rok 2017 [mm/m <sup>2</sup> ]	Rok 2018 [mm/m <sup>2</sup> ]	Rozdíl	Rate	Průměr
I. leden	2,80	5,30	2,50	0,89	4,05
II. leden	21,40	5,50	-15,90	-0,74	13,45
III. leden	33,40	5,60	-27,80	-0,83	19,50
IV. leden	34,50	20,40	-14,10	-0,41	27,45
V. leden	34,10	11,60	-22,50	-0,66	22,85
I. únor	38,50	9,60	-28,90	-0,75	24,05
II. únor	32,70	11,70	-21,00	-0,64	22,20
III. únor	21,88	15,10	-6,78	-0,31	18,49
IV. únor	8,30	14,90	6,60	0,80	11,60
I. březen	5,50	15,10	9,60	1,75	10,30
II. březen	5,30	8,10	2,80	0,53	6,70
III. březen	4,20	9,60	5,40	1,29	6,90
IV. březen	3,20	6,80	3,60	1,13	5,00
I. duben	1,10	5,80	4,70	4,27	3,45
II. duben	0,50	3,30	2,80	5,60	1,90
III. duben	0,20	0,00	-0,20	-1,00	0,10
IV. duben	0,80	0,00	-0,80	-1,00	0,40

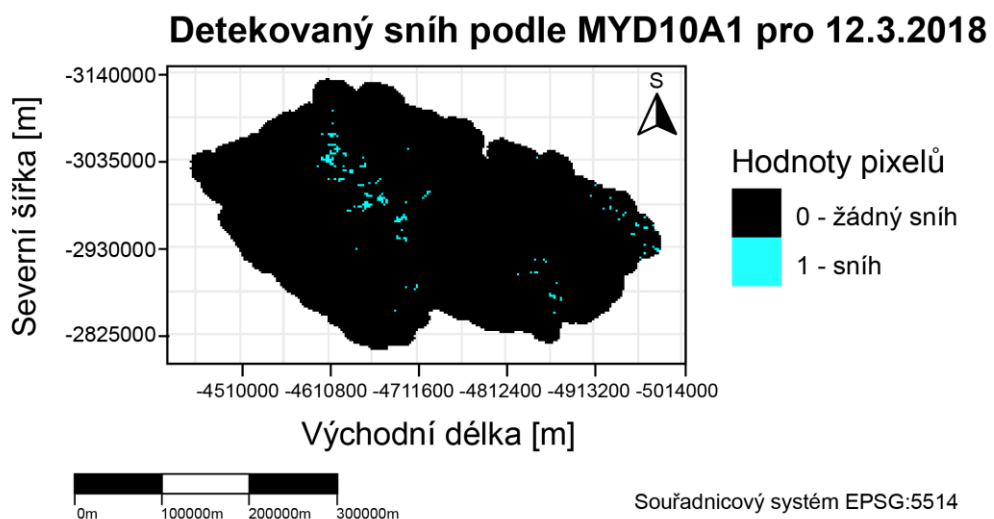
Tab. 11 – Základní srovnání sledovaných zimních období



Obr. 10 – Porovnání hodnot SVH ve sledovaných obdobích, vypracováno jazykem R verze 3.5.2.

## 5.2 MODIS - MYD10A1

Prvotní rasterové výstupy potvrdily, že produkt je silně závislý na meteorologických podmínkách a vegetativním pokryvu snímané oblasti. Zřejmě díky silné oblačnosti, vznikly i rastery, které nebyly schopné sejmout sněhovou pokrývku v horských oblastech jako Krkonoše a detekovaly nejvíce pixelů se sněhovou pokrývkou v okolí Brněnské vrchoviny a Českoleské oblasti. Stav, kdy zůstala sněhová pokrývka v Krkonoších nezachycena nastal konkrétně 12. 3. 2018 viz. obrázek níže. Na většině území ten den panovala zatažená obloha, postupně s deštěm nebo přeháňkami.



Obr. 11 – Ukázkový raster produktu MYD10A1 pro den 12.3.2018 (NASA ©2018, dostupné z: <<https://nsidc.org/data/MYD10A1>>)



Produkt MODIS je oproti H-SAF propracovanější a je schopen zpracovateli poskytnout širší souvislosti. Jeho algoritmus je schopen detekovat nejenom sníh, ale i oblačnost, vnitrozemní vody aj. To vše dokáže při důkladnější analýze jednoho zdroje dat, přinést analytikovi obecné povědomí o tom, jaké podmínky při snímání panovaly, jaké mezery má jeho analýza a jaké doplňující zdroje dat je vhodné zvolit.

Relevanci dat by mohlo zvýšit zkombinování výsledků z družice Terra a Aqua dohromady, jelikož mají rozdílné orbity a čas snímání. Vzhledem k tomu, že se oblačnost nad územím ČR mění v průběhu každého dne, je možné, že kombinace by zvýšila úspěšnost výsledků. Jak je rozebráno v diskuzi níže, bylo by nutné nejenom kombinovat datové sady družic, ale do pozorování implementovat i pozemní měření a další metody. Jako doplňující zdroj dat by se dal uvažovat radar SAR, který je schopen vyplnit mezery v měření.

Oblačnost se v průběhu celé analýzy ukázala jako nejvíce negativní faktor, která výrazně ovlivňuje výsledný počet pixelů, které jsou interpretovány jako sníh, resp. sněhem pokryté oblasti. Jako další faktor, který ovlivňuje výsledky, je hustota vegetativního pokryvu a samotná barva sněhové pokrývky. Sníh, který není zcela bílý, v literatuře jinak definován jako „špinavý sníh“, může svým albedem ovlivnit výsledek interpretace odraženého infračerveného a mikrovlnného záření. Dalším omezujícím faktorem se jeví převažující nadmořská výška do 500 m.n.m.

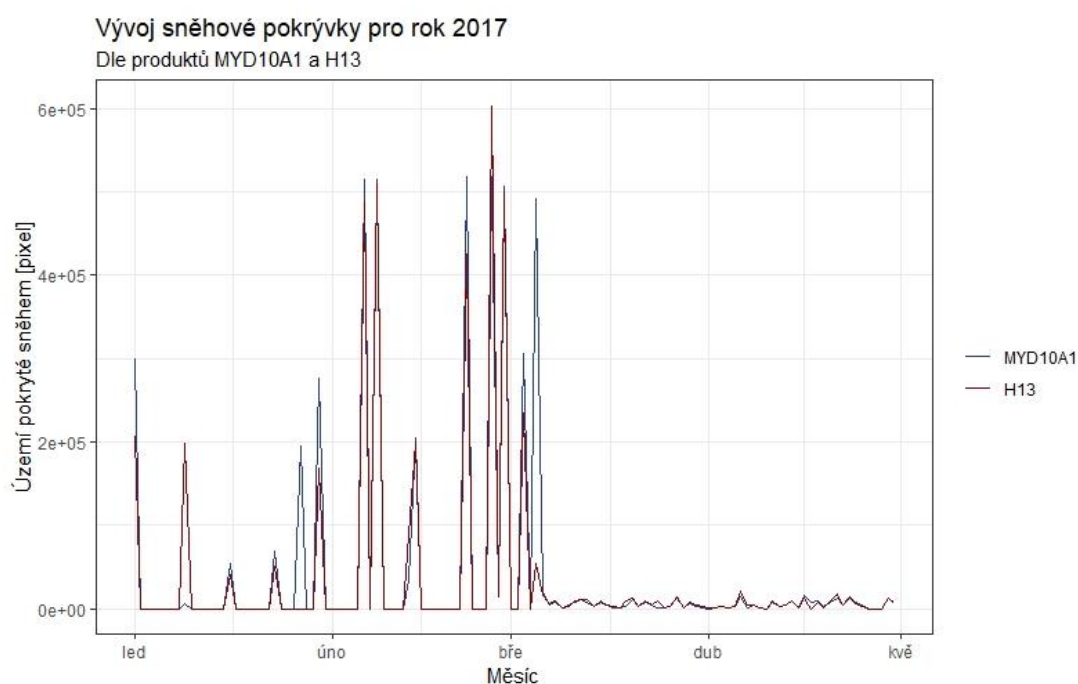
### **5.3 H-SAF – H13**

Produkt H-SAF oproti produktu MODIS poskytoval informace pouze o pixelech, které jsou interpretovány jako sníh, potažmo mají hodnotu SVH, což se v porovnání s produktem MYD10A1 je omezující. Analytik pak nemusí být schopen zvolit nejvhodnější doprovodný zdroj, jelikož MODIS poskytuje data i o výskytu oblačnosti. Další negativum produktu H13 je nedostatek již zpracovaných studií o samotnému produktu nebo jeho validaci. Pro diskuzní část byly nalezeny pouze dva odborné články, které validovaly produkty poskytující informaci o dešťových srážkách a vlhkosti půdy. V případě nesnází není mnoho zdrojů, které jsou schopny poskytnout relevantní informace a nápovědu. To je jedním z důvodů, proč zpracování produktu H13 bylo oproti MODIS časově náročnější. Komunikace s helpdeskem společnosti EUMETSAT, konkrétně s divizí pro H-SAF produkty, není nijak produktivní. Na technické dotazy odpovídají zkopírovaným textem ze svých webových stránek, o

kterém bylo v prvním dotazu řečeno, že nepřináší pro vznešený dotaz relevantní odpovědi.

Produkt H13 má jako nejstarší dostupná archivovaná data z listopadu 2012, což je oproti MODISU, který poskytuje data od dubna 2002 o deset let méně, v přepočtu na měsíce o 128 měsíců menší vzorek dat. Toto dělá z produktu MODIS vhodnější zdroj informací pro případné rozsáhlejší analýzy.

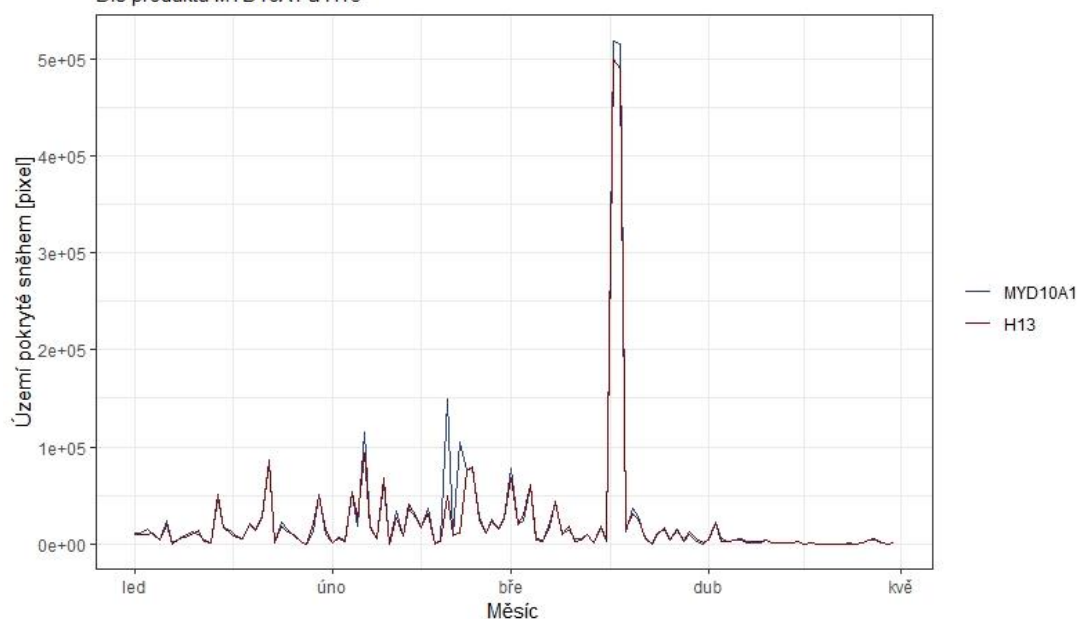
## 5.4 Průběh sněhové pokrývky na území ČR dle satelitů pro rok 2017 a 2018



Obr. 12 – Počet platných pixelů interpretovaných jako sníh pro produkt MYD10A1 a H13 pro rok 2017

Uvedené grafy na obrázku 12 a 13 ukazují, že oba dva produkty jsou víceméně shodné. Vyskytující se extrémní hodnoty lze pravděpodobně přisoudit zlepšeným meteorologickým podmínkám, konkrétněji slabé oblačnosti, která v době snímání panovala.

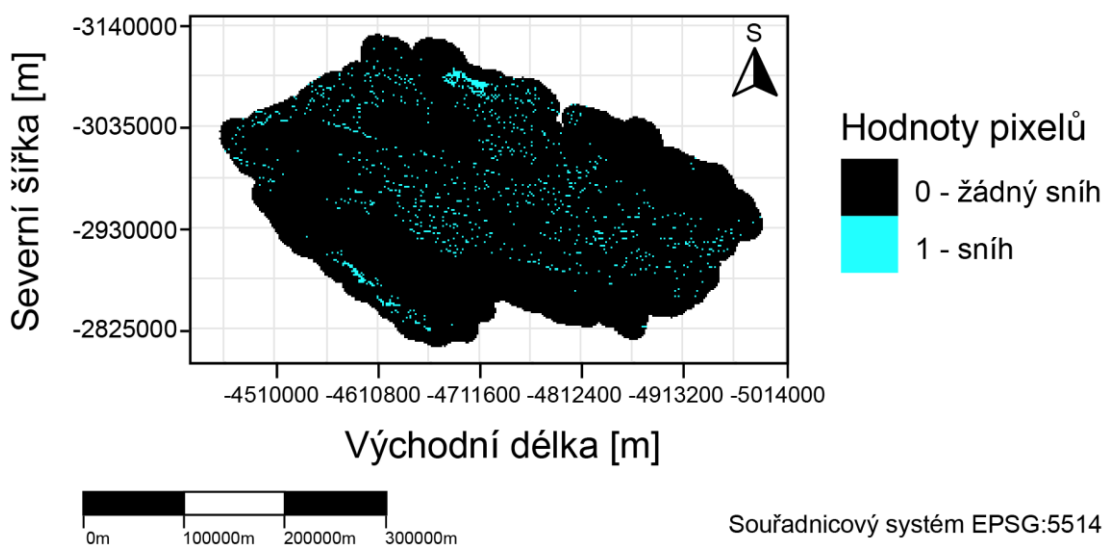
Vývoj sněhové pokrývky pro rok 2018  
Dle produktů MYD10A1 a H13



Obr. 13 – Počet platných pixelů interpretovaných jako sníh pro produkt MYD10A1 a H13 pro rok 2018

K výraznému extrému došlo ve dnech 17.3. a 18.3. 2018. Ve dne 17.3. MYD10A1 klasifikoval 518 630 platných sněhových pixelů a H13 500 243. Ve dne 17.3. bylo zataženo se sněžením v devíti ze čtrnácti krajů (IN-Počasí ©2017). Druhý den, tedy 18.3. klasifikoval MYD10A1 515 012 platných pixelů a H13 490 253 platných pixelů. V tento den bylo na území ČR opět oblačno až zataženo. Občasné sněžení se vyskytovala pouze ve dvou krajích (IN-Počasí ©2017). Zřejmě díky tomu měl extrémní počet platných sněhových pixelů klesající tendenci 18.3.

## Detekovaný sníh podle MYD10A1 pro 17.3.2018



Obr. 14 - Distribuce platných pixelů sněhu ve dne 17.3. 2018 (NASA ©2018, dostupné z: <  
<https://nsidc.org/data/MYD10A1>>)

## 5.5 Porovnání MODIS, H-SAF s daty ČHMÚ

Výsledné hodnoty pixelů jsou srovnány s informacemi o počasí, které na sledovaném území měřený den panovalo. Je porovnáván počet a distribuce pixelů s teplotními mapy a oblačností. V požadovaném období byly dostupné oba dva satelitní produkty.

### 5.5.1. Leden až duben 2017

Roční přehled hodnot platných pixelů jednotlivých produktů pro rok 2017					
Datum	MYD10A1	H13	ČHMÚ	MYD10A1	H13
2.1.	299756	206176	307954	3%	67%
9.1.	6098	198478	239600	97,0%	18,0%
16.1.	53605	40559	266739	80,0%	85,0%
23.1.	69809	50209	272414	74,38%	81,60%
30.1.	276623	168034	268738	2,90%	37,50%
13.2.	34567	89765	96270	64,1%	6,80%
20.2.	56	196	145611	99,96%	99,86%
27.2.	14265	13901	44691	68,1%	68,90%
6.3.	18981	15999	25978	27%	38,50%
13.3.	11150	8640	8640	29%	0%
20.3.	11150	13210	17759	37,30%	25,70%
27.3.	14521	13551	15222	4,70%	11%
3.4.	2940	3698	8150	64,0%	55,0%
17.4.	7675	2365	1723	445%	37%
24.4.	7786	7786	7659	1,6%	1,6%

**Legenda:**

podhodnocení
nadhodnocení
shoda

Tab. 12 – Roční přehled platných pixelů sněhu jednotlivých produktů pro rok 2017

V období od ledna do dubna v roce 2017 bylo od ČHMÚ poskytnuto celkem 15 pozemních měření. V datech chyběla informace o prvním týdnu v únoru 2017, který

začínal 6.2. Tento výpadek snížil počet sledovaných dní pro rok 2017 na 15. Z patnácti sledovaných dní, byla ze 73 % případů zvýšená oblačnost (IN-Počasi ©2017).

V roce 2017 nejvíce podhodnocoval produkt H13, který z 15 sledovaných dní podhodnocoval 12 x a z toho měl 7 x větší podhodnocení než MYD10A1. Zároveň se jako jediný shodoval s měřením ČHMÚ za celé sledované období, a to 13.3. 2017. Nadhodnocoval pouze 2 x v posledních dvou měření v dubnu.

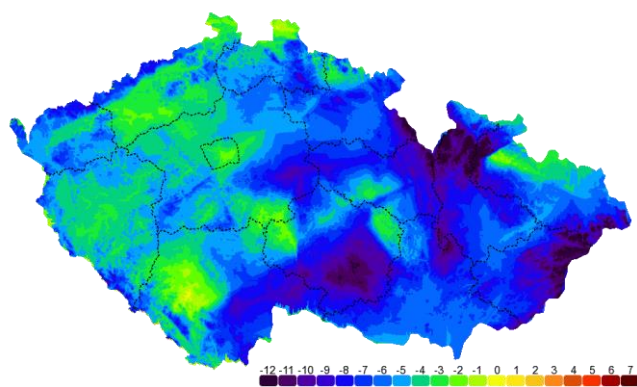
V tom samém roce nejvíce nadhodnocoval produkt MYD10A1, který z 15 sledovaných dní nadhodnocoval 4 x a zároveň nejvíce výrazně. Míru podhodnocení měl pouze 5 x větší než H13.

Počasí ve sledovaných dnech v roce 2017		
Datum:	Denní teploty:	Oblačnost:
2.1.	-1°C - 3°C	polojasno až jasno
9.1.	-5°C - 1°C	oblačno až zataženo
16.1.	-4°C - 0°C	oblačno až zataženo
23.1.	-5°C - 1°C	Zataženo nízkou oblačností nebo mlhy
30.1.	-5°C - 1°C	oblačno až zataženo
13.2.	2°C - 6°C	jasno až skorojasno
20.2.	5°C až 9°C	oblačno až zataženo
27.2.	9°C až 13°C	Jasno až polojasno, během dne až oblačno
6.3.	5°C až 9°C	Oblačno až zataženo
13.3.	7°C až 11°C	Polojasno až oblačno
20.3.	11°C až 15°C	Oblačno až zataženo
27.3.	13°C až 17°C	Jasno až skoro jasno
3.4.	12°C až 16°C	Č- oblačno až zataženo, MaS - jasno až skoro jasno, postupně polojasno až oblačno
17.4.	6°C až 10°C	Oblačno až zataženo
24.4.	12°C až 16°C	Skoro jasno až polojasno, na severovýchodě přechodně až oblačno

Tab. 13 – Obecný přehled o počasí a oblačnosti, které panovalo na území ČR v měřených dnech (IN-Počasi ©2017, dostupné z < <https://www.in-pocasi.cz/archiv/>>)

### 5.5.2 Nejvyšší počet pixelů

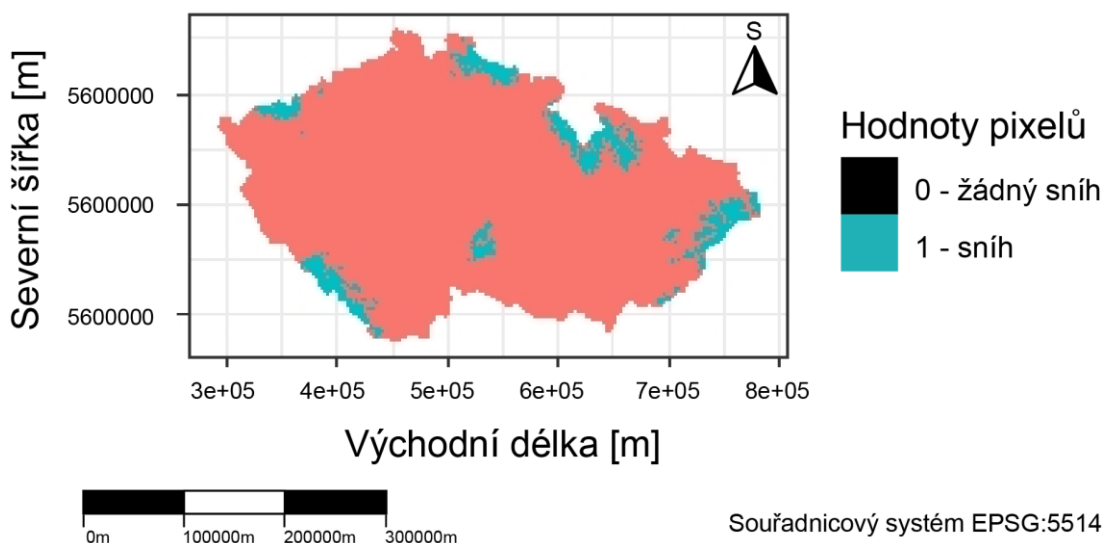
Nejvíce pixelů, které byly interpretovány jako sníh, byly naměřeny 2.1. 2017 kdy podle tabulky 12 panovalo na většině území polojasno až jasno s průměrnými teplotami od -1 °C do 3 °C (IN-Počasi ©2017). Tento výsledek potvrzuje korelaci mezi oblačností a přesností detekce satelity. Teplotní mapa na obrázku 15 zobrazuje prostorové rozložení teplot. Produkt MYD10A1 v tomto případě vyšel lépe než H13, jelikož jeho datová sada naměřila pouze o 3 % méně pixelů ve srovnání s ČHMÚ. Zatímco produkt H13 měl podhodnocení 67 %.



Obr. 15 – Teplotní mapa ČR pro den 2.1. 2017 (IN-Počasi ©2017, dostupné z < <https://www.in-pocasi.cz/archiv/>>)

Měření ČHMÚ, které je na obrázku 16 ukazuje, že se sněhová pokrývka vyskytovala pouze na místech, kde teplota nepřesahovala 0 °C, a která leží ve výšce nad 700 m.n.m. (IN-Počasi ©2017).

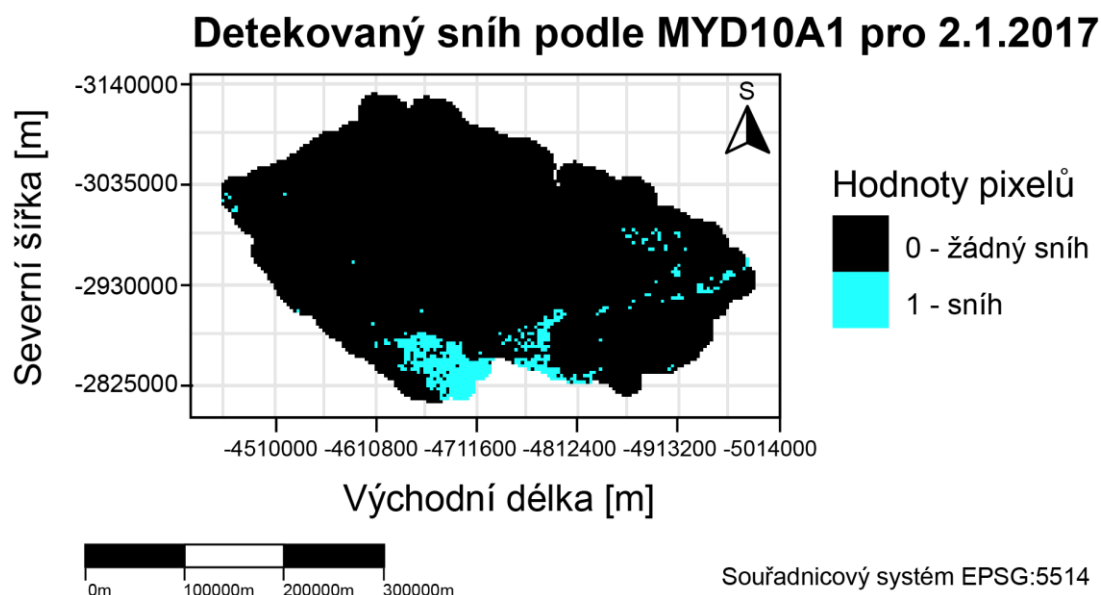
### Detekovaný sníh podle ČHMÚ pro 2.1.2017



Obr. 16 – Naměřená distribuce sněhové pokrývky dle ČHMÚ pro 2.1. 2017

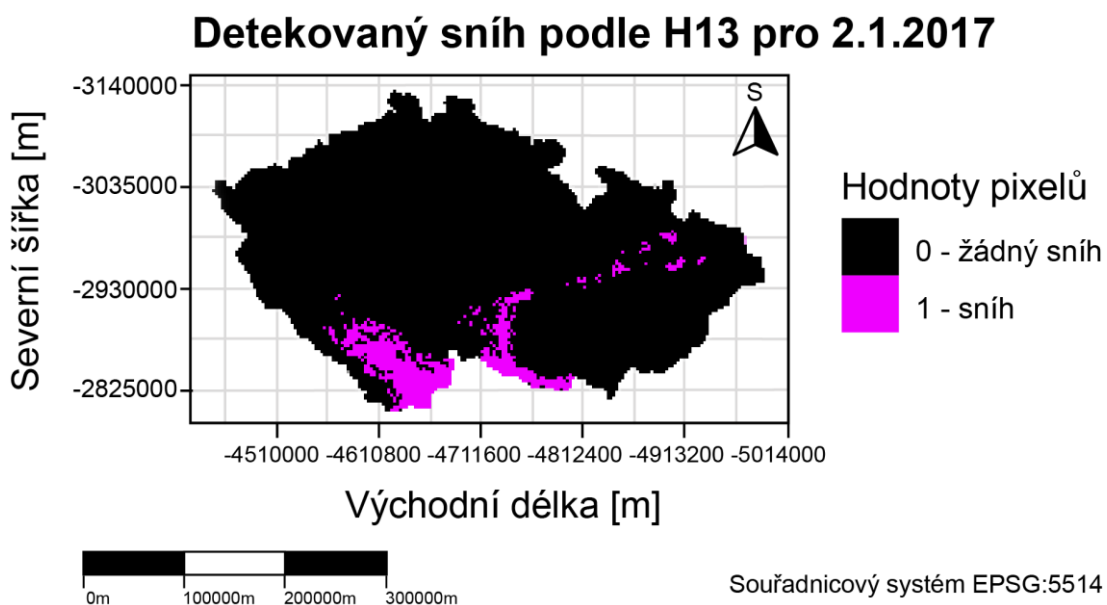
Produkt MYD10A1 měl podhodnocení pouze 3 %, ale prostorovou distribuci sněhových pixelů měl zcela odlišnou od naměřené ČHMÚ. Zatímco ČHMÚ měření detekovalo sníh převážně v horských oblastech, produkt MYD10A1 detekoval sněhovou pokrývku pouze na jihu ČR kolem Vysočiny, Jihočeského a Jihomoravského kraje. Paradoxně ale nebyl schopný detekovat sněhovou pokrývku jižně od Jihočeské

pánve, kde se nachází Šumavská hornatina. Bez výrazné detekce pixelů sněhu zůstala i Krkonošská oblast, pouze u Beskyd byl jistý počet pixelů interpretován jako sníh.



Obr. 17 – Distribuce sněhové pokrývky dle MYD10A1 pro 2.1.2017 (NASA ©2018, dostupné z: <<https://nsidc.org/data/MYD10A1>>)

Produkt MYD10A1 měl s produktem H13 téměř shodnou prostorovou distribuci, zřejmě kvůli slabé oblačnosti nad detekovanou oblastí. Shodnou prostorovou distribuci a rozdílnou četnost pixelů lze odůvodnit samotným charakterem HDF dat. Pixely nejsou počítány pouze do šířky, ale také do výšky.

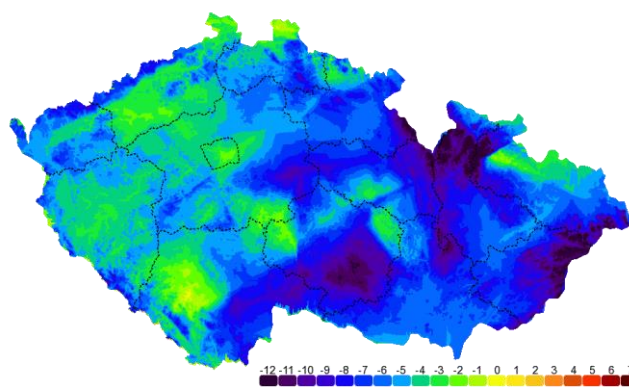


Obr. 18 – Distribuce sněhové pokrývky dle H13 pro 2.1.2017

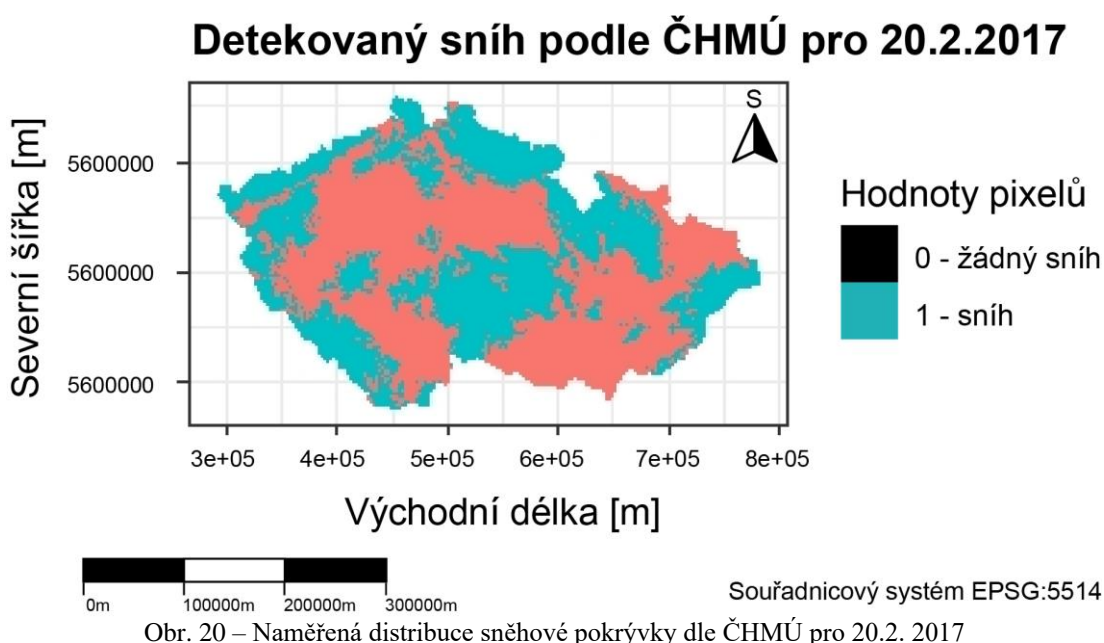
V den 2.1. byla nad územím ČR oblačná až zatažená obloha. Na polojasno se v průběhu dne obloha vyjasnila pouze v okolí Beskyd a Slovansko-Moravských Karpat. Nejvyšší sněhová pokrývka byla naměřena na meteorologické stanici Churáňov – 48 cm (Šumava) a na stanici Šerák – 26 cm (Jeseníky) (IN-Počasí ©2017).

### 5.5.3 Výrazné podhodnocení

K nejvýraznějšímu podhodnocení sněhové pokrývky v tomto roce došlo 20.2. kdy ČHMÚ naměřilo 145 611 pixelů se sněhem, zatímco produkt MYD10A1 vyhodnotil pouze 56 pixelů se sněhem a produkt H13 196. Toho dne na území ČR byla obloha oblačná až zatažená (IN-Počasí ©2017). Distribuce sněhové pokrývky opět přímo odpovídala teplotní distribuci, sníh se vyskytoval v místech, která jsou ve výšce nad 600 m.n.m.



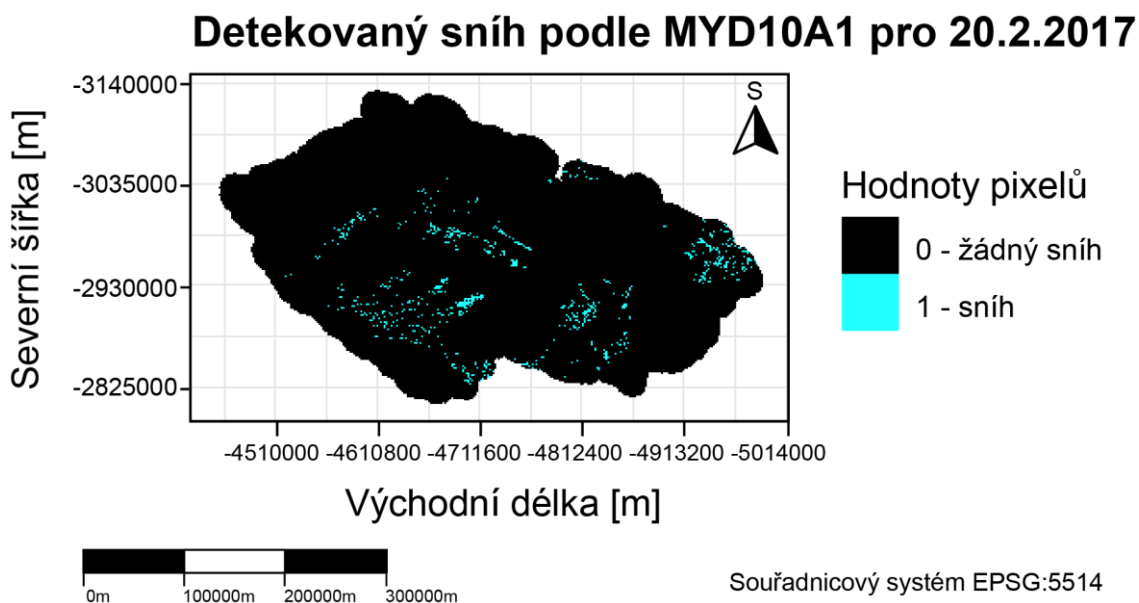
Obr. 19 – Teplotní mapa ČR pro den 20.2. 2017 (IN-Počasí ©2017, dostupné z < <https://www.in-pocasi.cz/archiv/>> )



Obr. 20 – Naměřená distribuce sněhové pokrývky dle ČHMÚ pro 20.2. 2017



Produkt MYD10A1 podhodnocoval o 99,96 % a H13 o 99,86 %. Toto podhodnocení bylo nejhorší z obou dvou sledovaných období.

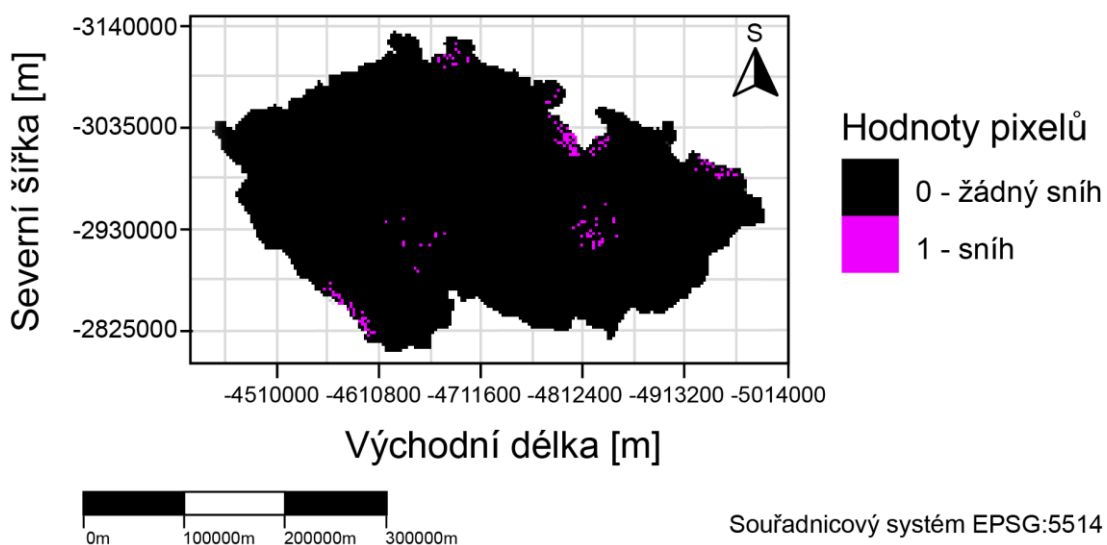


Obr. 21 – Distribuce sněhové pokrývky dle MYD10A1 pro 20.2.2017 (NASA ©2018, dostupné z: <<https://nsidc.org/data/MYD10A1>>)

Satelitní snímky ukazují distribuci výrazně řidší, oproti distribuci, kterou udává ČHMÚ. Rozdíl ukazuje H13 v distribuci pixelů v oblasti Krkonoš, kde produkt MYD10A1 nedetekoval téměř žádné. Na druhou stranu produkt MYD10A1 postihl sněhovou pokrývku v oblasti Beskyd, kde H13 nedetekoval skoro žádnou. Zatímco produkt MYD10A1 postihoval sněhovou pokrývku spíše prostorově napříč ČR, H13 detekoval hustší síť pixelů například v Orlických horách.

Na celém území panovala oblačná až zatažená obloha. Polojasno bylo pouze v Moravskoslezském, Jihomoravském a Jihočeském kraji. Nejvíce sněhu bylo naměřeno na meteorologické stanici Lysá Hora – 70 cm (Beskydy) a Pec pod Sněžkou – 46 cm (Krkonoše) (IN Počasí ©2017).

## Detekovaný sníh podle H13 pro 20.2.2017

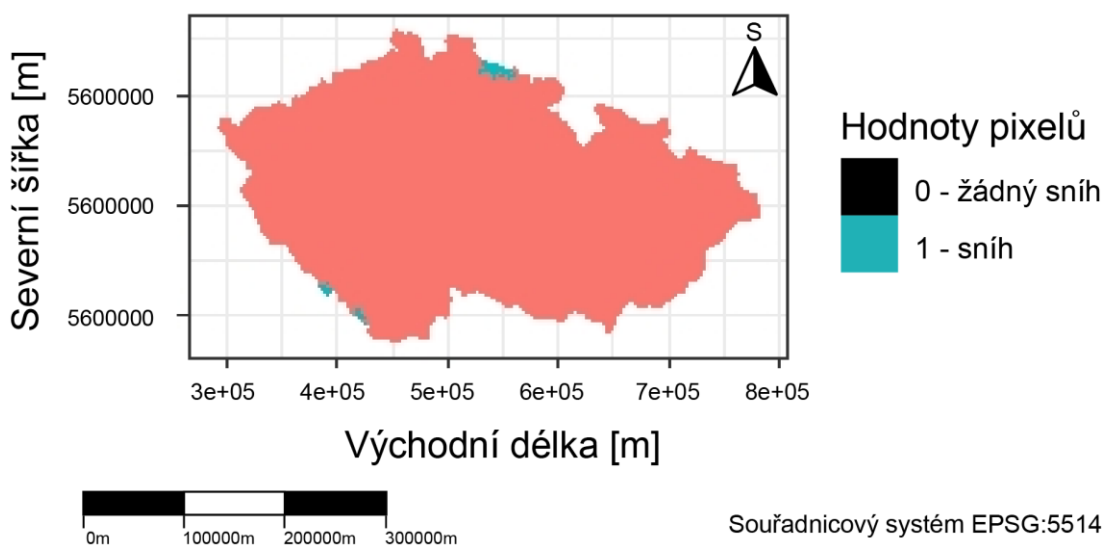


Obr. 22 – Distribuce sněhové pokrývky dle H13 pro 20.2.2017

### 5.5.4 Výrazné nadhodnocení

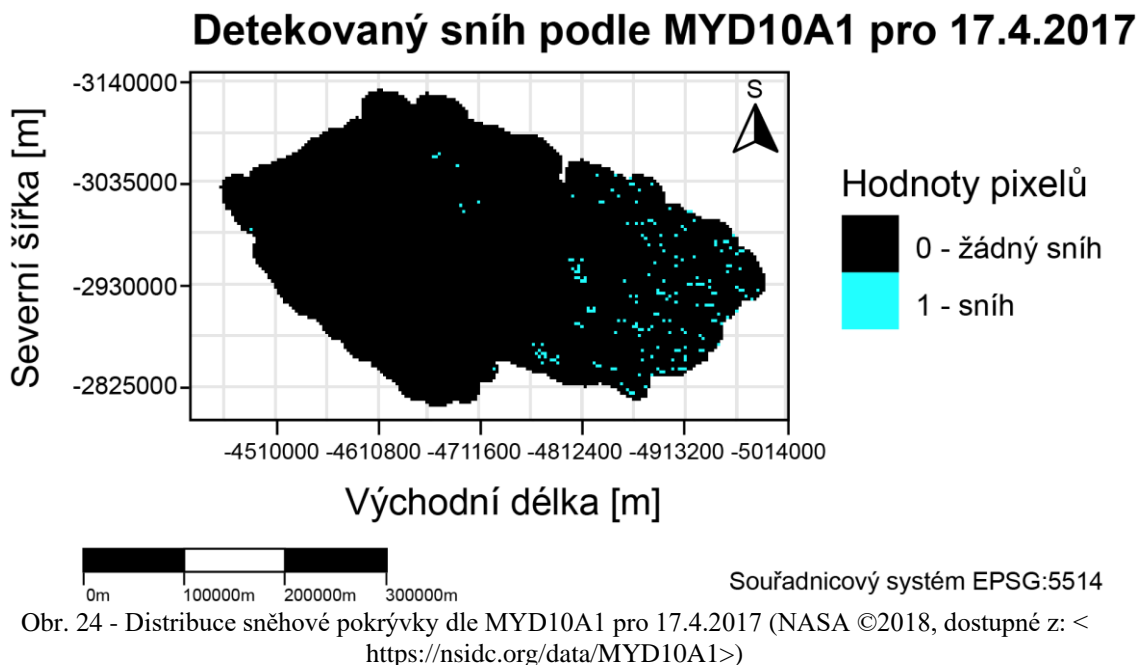
Jediný den, kdy satelitní produkty sněhovou pokrývkou na území ČR výrazně nadhodnocovaly byl 17.4. V tento den byla obloha oblačná až zatažená. Nejvýrazněji nadhodnocoval MYD10A1, a to o 445 %. Zatímco H13 nadhodnocoval pouze o 37 %. Porovnání distribuce pixelů s daty ČHMÚ je zobrazeno níže.

## Detekovaný sníh podle ČHMÚ pro 17.4.2017



Obr. 23 – Naměřená distribuce sněhové pokrývky dle ČHMÚ pro 17.4.2017

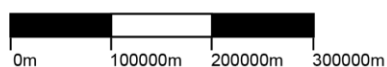
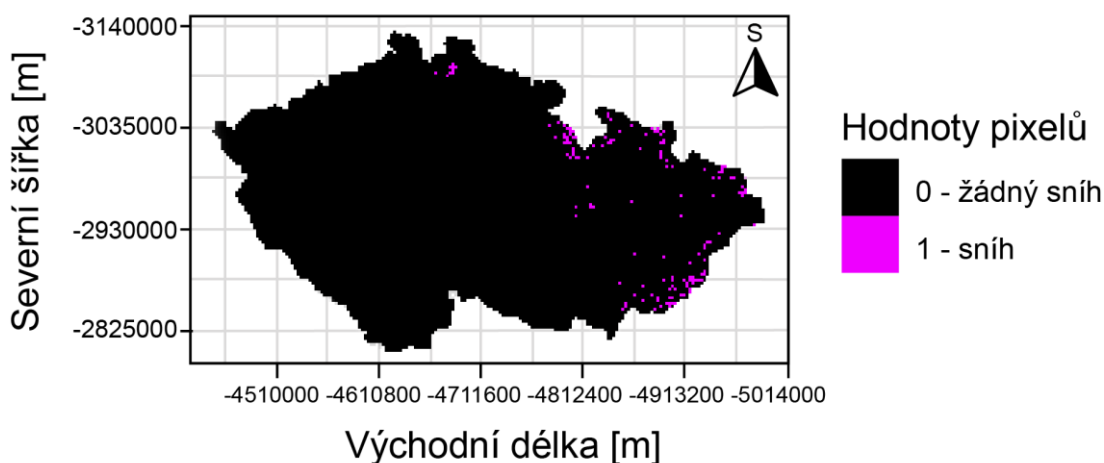
Sněhová pokrývka se vyskytovala pouze v okrese Klatovy a mezi Prachaticemi a Českým Krumlovem. Tato místa leží ve výšce nad 800 m.n.m. V tento den teplota nepřesahovala 0 °C (IN-Počasí ©2017).



Dne 17.4. byla obloha převážně zatažená. Polojasno bylo pouze v Moravskoslezském, Zlínském a Královehradeckém kraji. Nejčtenější distribuci ukazuje MYD10A1, dokonce větší než naměřená data ČHMÚ. Zatímco ČHMÚ detekovala sněhovou pokrývku pouze v Krkonoších a Šumavě, oba dva produkty vyhodnotili sněhové pixely i v rámci celé Moravy a Slezska.

Vzhledem k zvýšenému výskytu oblačnosti (IN-Počasí ©2017), může za tak výrazné nadhodnocení pixelů pravděpodobně špatná interpretace algoritmem.

## Detekovaný sníh podle H13 pro 17.4.2017



Souřadnicový systém EPSG:5514

Obr. 25 – Naměřená distribuce sněhové pokrývky dle H13 pro 17.4. 2017

### 5.5.5 Leden až duben 2018

Následující zima v roce 2018 byla analyzována na základě 17 dat, které ČHMÚ pro tento rok poskytlo. Data 16.4. a 24.4. jsou uvedeny s nulovými hodnotami pro ČHMÚ, jelikož v týdenní zprávě ústav uvedl, že na sledovaném území se vyskytovala pouze nesouvislá sněhová pokrývka, a proto se dále rozhodl informaci o sněhové pokrývce nemonitorovat. Produkt MYD10A1 a H13 interpretovali počet pixelů obsahující sníh vcelku shodně. Správnost této detekce by mohl poskytovat fakt, že sněhová pokrývka je podle již provedených analýz nejlépe detekována při své výšce ~3 cm. Při takto nízké výšce sněhu se v horských oblastech vyskytuje sněhová pokrývka nepravidelně a v níže položených oblastech vlivem vzrůstajících teplot přes den zcela vymizí.

Roční přehled hodnot platných pixelů jednotlivých produktů pro rok 2018

Datum	MYD10A1	H13	CHMU	MYD10A1	H13
1.1.	9703	10724	31261	69%	66%
8.1.	4850	5690	27208	82,2%	79,1%
15.1.	16494	17001	172508	90,5%	90,2%
22.1.	86301	85709	172508	49,98%	50,40%
29.1.	12768	21387	58401	78,20%	63,40%
5.2.	17828	26907	42976	58,9%	38,00%
12.2.	8359	8028	56448	85,20%	85,80%
19.2.	149830	49002	100599	48%	51,30%
26.2.	25173	23098	92884	73%	75,20%
5.3.	3666	6980	92884	96,1%	92,5%
12.3.	5270	4110	29493	82,20%	86,10%
19.3.	13128	15294	38492	66,00%	60%
26.3.	3911	4608	24635	84,2%	81,3%
2.4.	223004	20987	22257	3%	6%
9.4.	1107	2749	13431	91,8%	79,6%
16.4.	201	76	0	x	x
24.4.	150	138	0	x	x

#### Legenda:

podhodnocení
nadhodnocení
shoda

Tab. 14 – Roční přehled platných pixelů sněhu jednotlivých produktů pro rok 2018

V roce 2018 nadhodnocoval pouze MYD10A1, ale oproti roku 2017 už ne výrazně. Produkt H13 měl v období 2018 tendenci podhodnocovat. Pro tento rok nejvýrazněji podhodnocoval MYD10A1, který z 15 hodnocených dní a z celkem 13 podhodnocených dní, měl v 9 případech větší míru podhodnocení než H13. Produkt H13 měl větší míru podhodnocení pouze ve čtyřech případech.

Z tabulky níže lze vyčíst, že ze sedmnácti sledovaných dní, byla celkem v 82 % případech zvýšená oblačnost. Zřejmě proto měli oba dva produkty tendenci skutečné množství platných pixelů podhodnocovat.

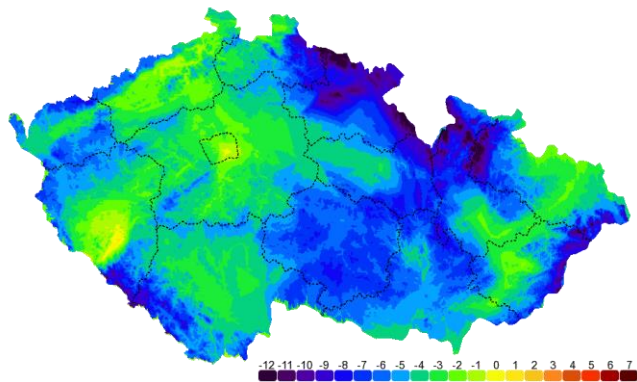
Počasí ve sledovaných dnech v roce 2018		
Datum:	Denní teploty:	Oblačnost:
1.1.	5°C až 9°C	oblačno až zataženo
8.1.	2°C až 6°C	zataženo až oblačno
15.1.	-2°C až 2°C	zataženo nízkou oblačností nebo mlhy, na horách polojasno
22.1.	-3°C až 1°C	oblačno až zataženo
29.1.	8°C až 12°C	oblačno až zataženo, přechodně polojasno
5.2.	-2°C až 2°C	oblačno až zataženo
12.2.	0°C až 4°C	zataženo až oblačno
19.2.	0°C až 4°C	jasno až polojasno
26.2.	-9°C až -5°C	jasno až polojasno
5.3.	0°C až 4°C	oblačno až zataženo
12.3.	7°C až 11°C	většinou zataženo
19.3.	-4°C až 0°C	oblačno až zataženo
26.3.	4°C až 8°C	oblačno až zataženo
2.4.	8°C až 12°C	polojasno až oblačno
9.4.	20°C až 24°C	jasno až polojasno
16.4.	15°C až 19°C	oblačno až zataženo
24.4.	18°C až 22°C	polojasno až oblačno

Tab. 15 – Obecný přehled o počasí a oblačnosti, které panovalo na území ČR v měřených dnech (IN-Počasi ©2017, dostupné z < <https://www.in-pocasi.cz/archiv/>>)

### 5.5.6 Nejvíce pixelů

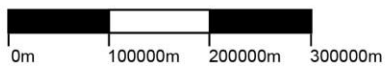
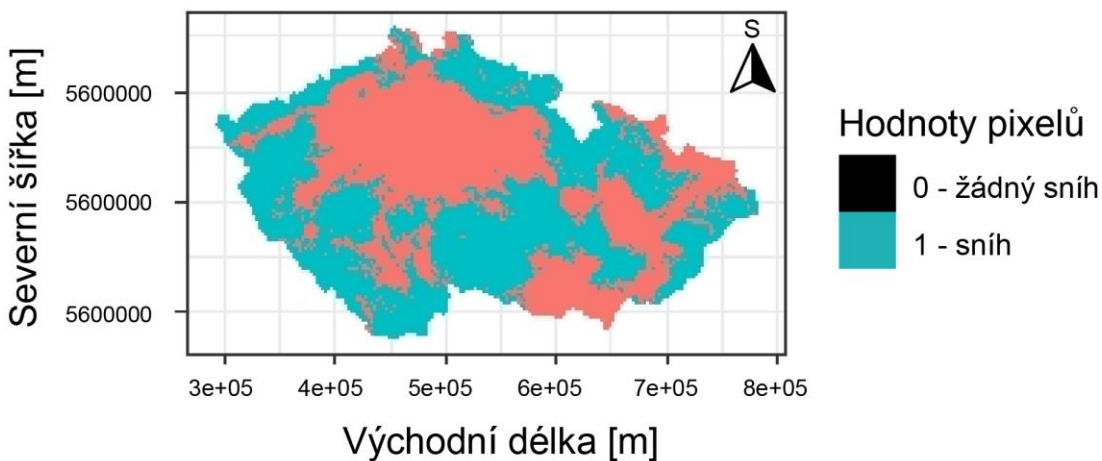
Nejvíce pixelů vyhodnocených jako sníh bylo ČHMÚ naměřeno 22.1. V tento den oba dva satelitní produkty interpretovali jako sníh zhruba 80 tisíc pixelů, což je v porovnání s daty ČHMÚ zhruba polovina. V době snímání byla zvýšená oblačnost až zataženo a teploty se pohybovaly od -3 °C do 1 °C (IN-Počasi ©2017).

Sněhová pokrývka opět korespondovala s teplotní mapou. Sníh se nevyskytoval v oblastech, kde byly teploty vyšší než ~ -4 °C až -3 °C. Nejvyšší sněhová pokrývka byla naměřena na meteorologické stanici Šerák – 84 cm (Jeseníky) a Churáňov – 83 cm (Šumava) (IN-Počasi ©2017).



Obr. 26 – Teplotní mapa ČR pro den 22.1. 2018 (IN-Počasí ©2017, dostupné z < <https://www.in-pocasi.cz/archiv/>>)

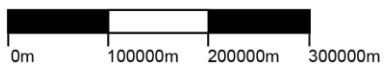
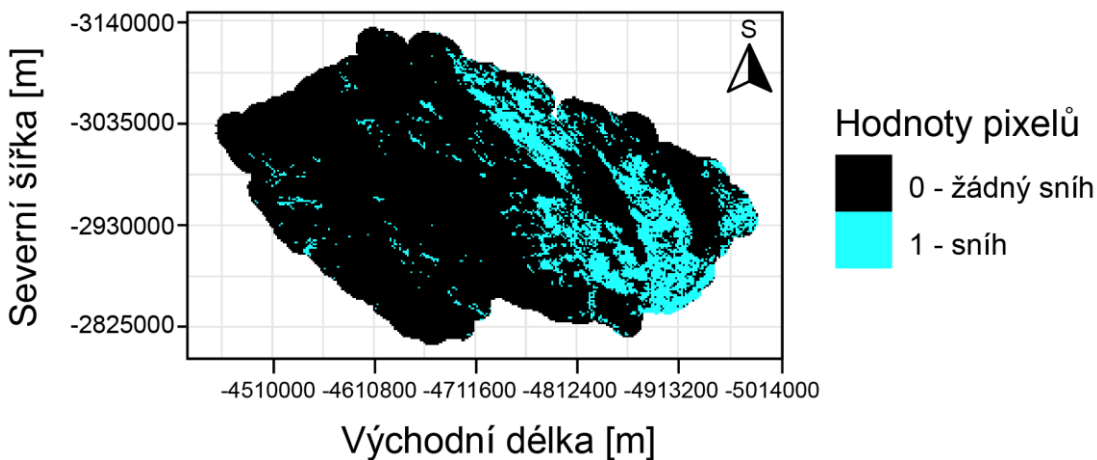
### Detekovaný sníh podle ČHMÚ pro 22.1.2017



Souřadnicový systém EPSG:5514

Obr. 27 – Naměřená distribuce sněžové pokrývky dle ČHMÚ pro 22.1.2018

### Detekovaný sníh podle MYD10A1 pro 22.1.2018

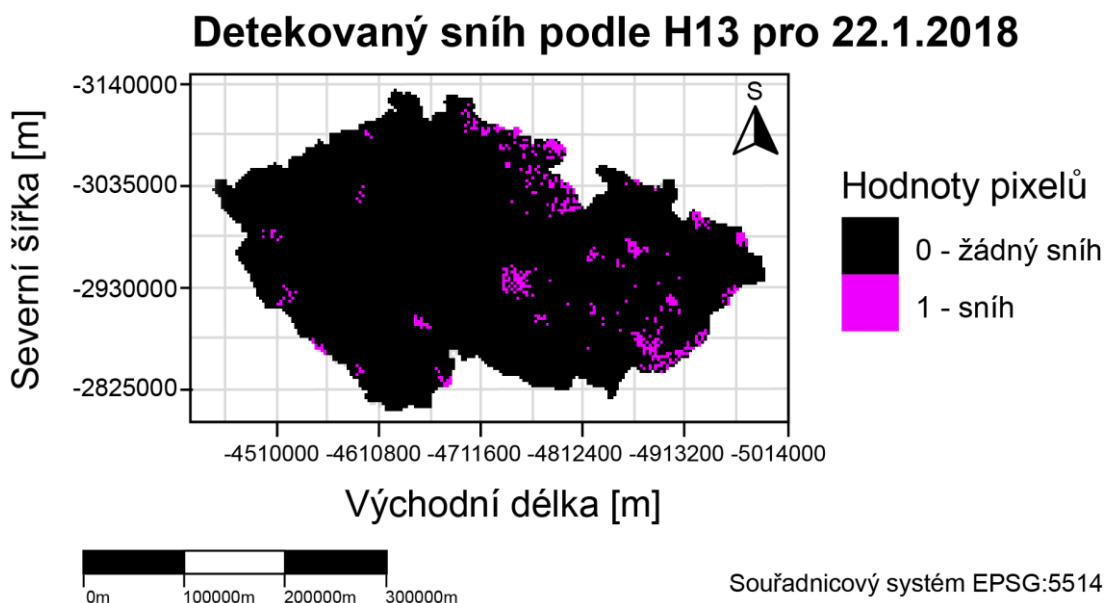


Souřadnicový systém EPSG:5514

Obr. 28 - Distribuce sněžové pokrývky dle MYD10A1 pro 22.1.2018 (NASA ©2018, dostupné z: < <https://nsidc.org/data/MYD10A1>>)

Částečně polojasno bylo pouze v kraji Moravskoslezském, Olomouckém, Zlínském a Jihomoravském. V těchto oblastech produktu MYD10A1 zároveň interpretoval nejvíce pixelů se sněhem.

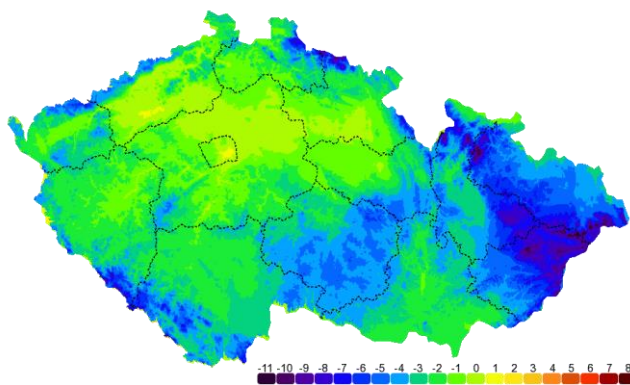
Stejně jako v případě 20.1.2017 i 22.1.2018 byla data MYD10A1 spíše více distribuovaná do prostoru než do hloubky, jako to je v případě H13.



Obr. 29 - Distribuce sněhové pokrývky dle H13 pro 22.1.2018

#### 5.5.7 Výrazné podhodnocení

K výraznému podhodnocení došlo 15.1. kdy pixely se sněhem dosahovaly zhruba 10 % celkové hodnoty naměřených dat ČHMÚ in-situ.

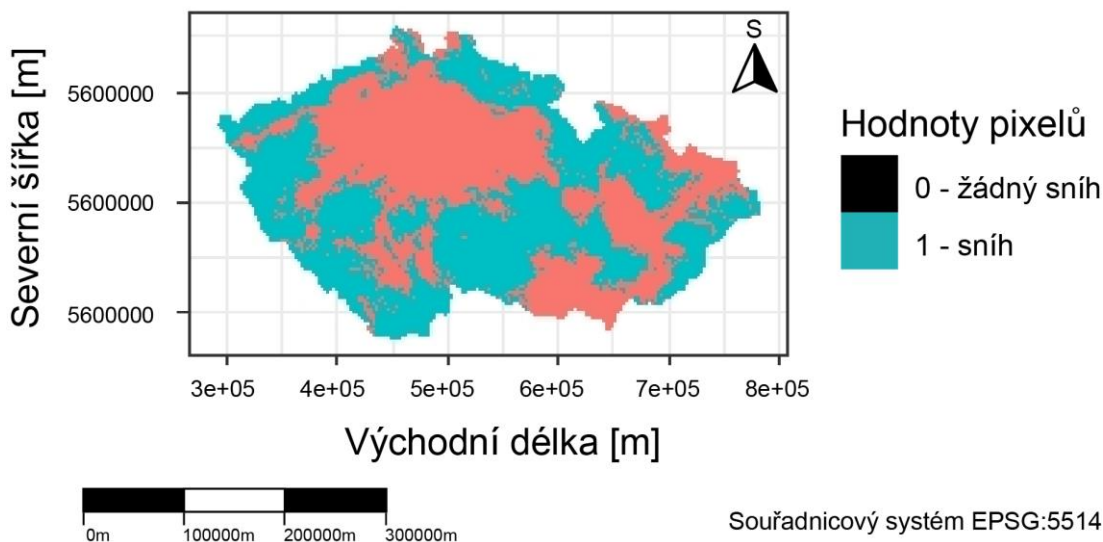


Obr. 30 – Teplotní mapa ČR pro den 15.1. 2018 (IN-Počasí ©2017, dostupné z < <https://www.in-pocasi.cz/archiv/>>)



I 15.1. 2018 bylo nad ČR zataženo nízkou oblačností s výskytem mlh. Ve vyšších polohách bylo místy polojasno (IN-Počasí ©2017). Oba dva produkty detekovaly zvýšený počet pixelů v Jihočeském kraji, kde se v průběhu dne vyjasnilo až na polojasno.

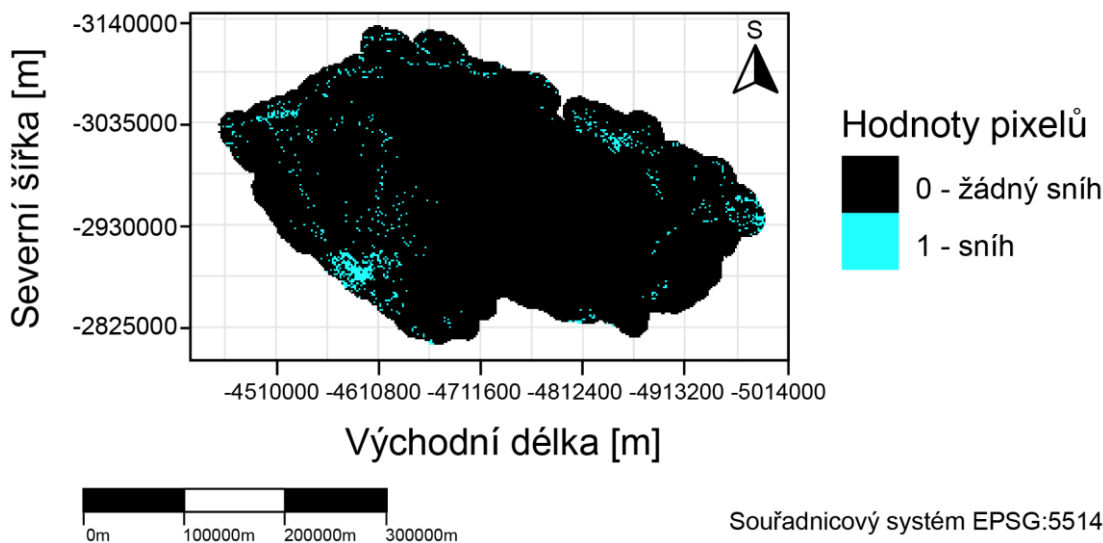
### Detekovaný sníh podle ČHMÚ pro 15.1.2018



Obr. 31– Naměřená distribuce sněhové pokrývky dle ČHMÚ pro 15.1.2018

Nejvyšší sněhová pokrývka byla naměřena na meteorologické stanici Šerák a Pec pod Sněžkou, které naměřily 52 cm. Dále následovala Lysá Hora se 46 cm, a poté Churáňov se 30 cm (IN-Počasí ©2017).

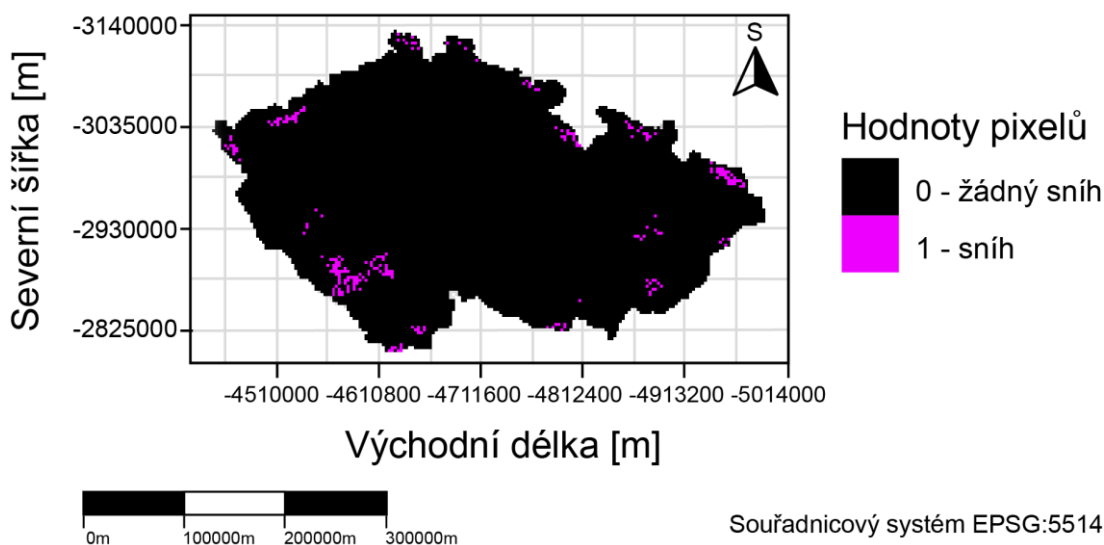
### Detekovaný sníh podle MYD10A1 pro 15.1.2018



Obr. 32– Distribuce sněhové pokrývky dle MYD10A1 pro 15.1.2018 (NASA ©2018, dostupné z: <<https://nsidc.org/data/MYD10A1>>)



### Detekovaný sníh podle H13 pro 15.1.2018

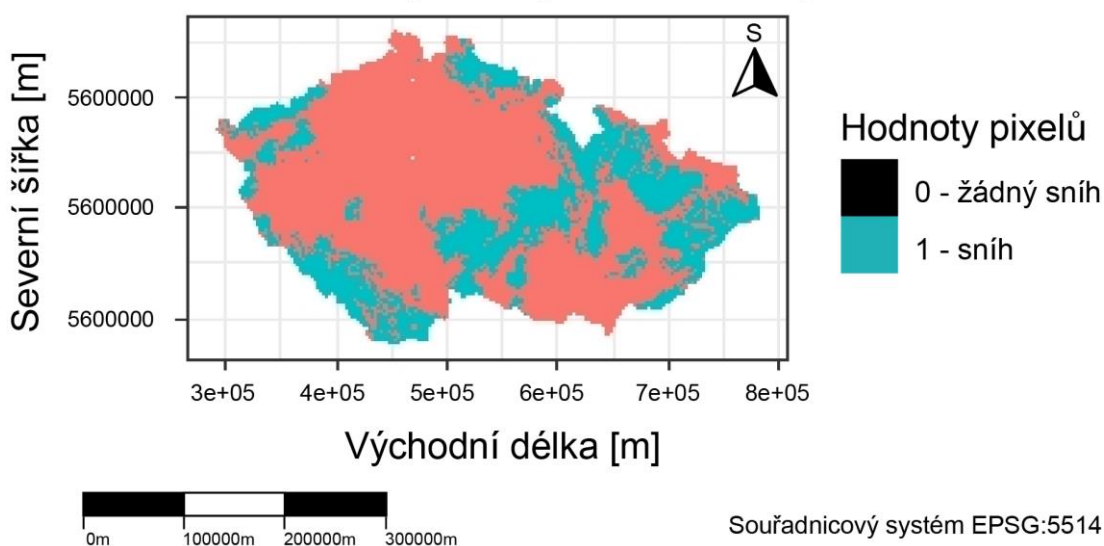


Obr. 33 – Distribuce sněhové pokrývky dle H13 pro 15.1.2018

#### 5.5.8 Výrazné nadhodnocení

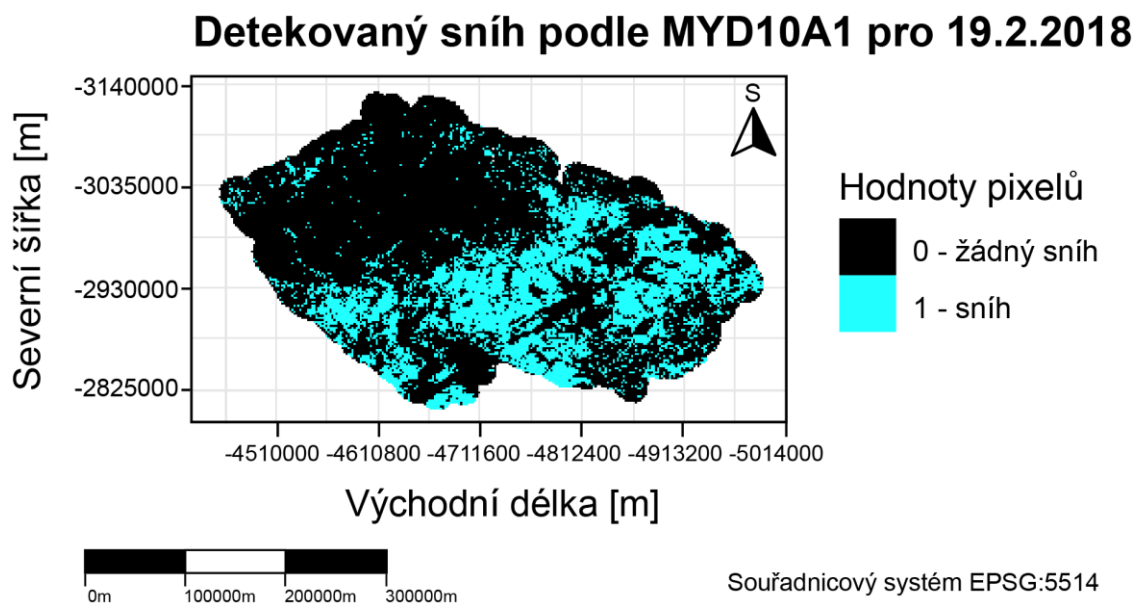
Naopak k výraznému nadhodnocení došlo 19.2. u produktu MYD10A1, který oproti datům ČHMÚ nadhodnocoval sněhovou pokrývkou o 48 %. Zajímavé je, že ten den byla jasná až polojasná obloha a je zajímavé, že při těchto podmínkách naměřil více pixelů sněhu, než ČHMÚ. Teploty se pohybovaly od 0 °C do 4 °C. Na většině území byla jasná až polojasná obloha (IN-Počasí ©2017).

### Detekovaný sníh podle ČHMÚ pro 19.2.2018



Obr. 34 – Naměřená distribuce sněhové pokrývky dle ČHMÚ pro 19.2.2018

Nejvyšší sněhová pokrývka byla naměřena na meteorologické stanici Šerák – 96 cm, Lysá Hora – 78 cm, Churáňov a Pec pod Sněžkou – 64 cm (IN-Počasí ©2017). Při porovnání obrázku 34 a 35 je zjevné, že produkt MYD10A1 vcelku dobře v tomto případě kopíroval prostorovou distribuci dle ČHMÚ. Pravděpodobně k tomu přispěla již zmíněná jasná obloha, téměř bez oblačnosti.



Obr. 35 – Distribuce sněhové pokrývky dle MYD10A1 pro 19.2.2018 (NASA ©2018, dostupné z: <<https://nsidc.org/data/MYD10A1>>)

K dalšímu méně výraznému nadhodnocení došlo na konci dubna, kdy ČHMÚ vlivem expozice a vegetace nebyl schopen udělat vhodnou interpolaci dat, a proto od 16.4. nebyl odhad stanovován (ČHMÚ ©2018).

#### 5.5.9 Míra variability

Výpočet míry variability prokázal, že v jednotlivých sledovaných obdobích, nebyli mezi produkty výraznější odlišnosti v porovnání s naměřenými daty ČHMÚ in-situ.

<b>Hodnoty míry variability v porovnání s daty ČHMÚ pro rok 2017</b>		
<b>Index</b>	<b>MYD10A1</b>	<b>H13</b>
RMSE	105 580	98 320
R2	0,5	0,6
PBIAS	-52,0	-51,8

Tab. 16 – Hodnoty míry variability v porovnání s daty ČHMÚ pro rok 2017

V roce 2017 dosahoval nejlepšího výsledku RMSE produkt H13 s hodnotou 98 320 a také nepatrně lepší hodnoty koeficientu determinace. U produktu H13 vyšel koeficient determinace lépe pouze v řádu desetin, přesněji o 0,1 lépe. Oba dva produkty mají pro rok 2017 relativně stejnou hodnotu procentuální systematické chyby, která se liší o 0,2 % ve prospěch produktu H13.

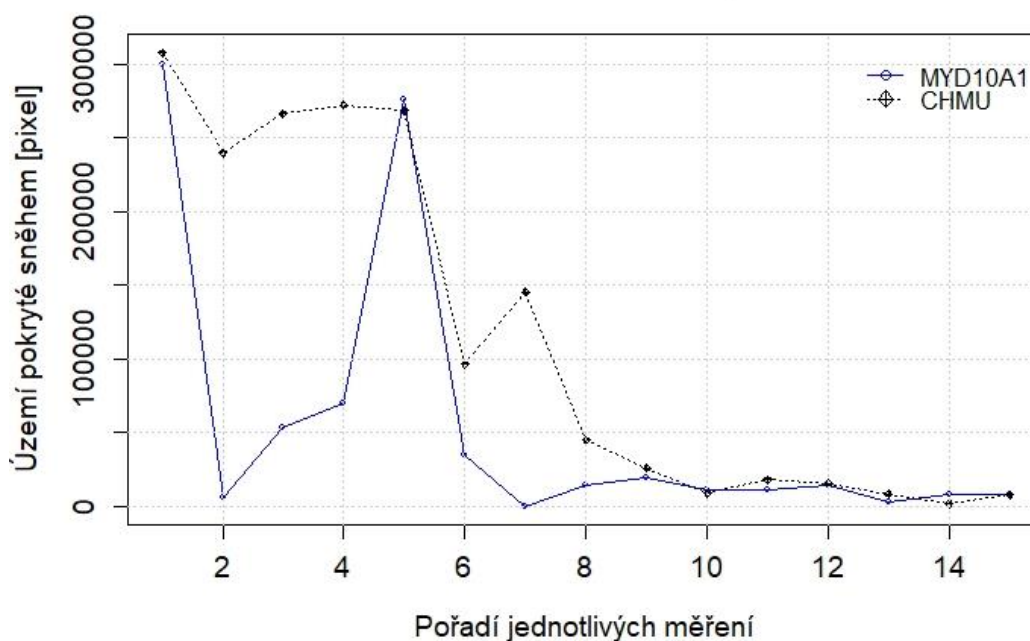
Hodnoty míry variability v porovnání s daty ČHMÚ pro rok 2018		
Index	MYD10A1	H13
RMSE	57 133	56 432
R2	0,3	0,5
PBIAS	-61,2	-69,3

Tab. 17 – Hodnoty míry variability v porovnání s daty ČHMÚ pro rok 2018

V roce 2018 dosahoval nejlepšího výsledku RMSE opět produkt H13, který byl k požadované nule o 701 pixelů blíže. Stejně jako v roce 2017 měl opět lepší hodnotu  $R^2$  produkt H13, který byl požadované jedničky blíže o hodnotu 0,2. I přesto měl v roce 2018 hodnotu procentuální systematické chyby vyšší produkt H13, přesně o 8,1 %.

I když míra variability hodnotí jako přesnější produkt H13, při bližším prozkoumání je zřejmé, že se oba dva produkty v celkovém měřítku liší pouze o zanedbatelné hodnoty. Grafické srovnání níže zobrazuje průběh hodnot u obou produktů.

Porovnání dat MYD10A1 a ČHMÚ pro rok 2017

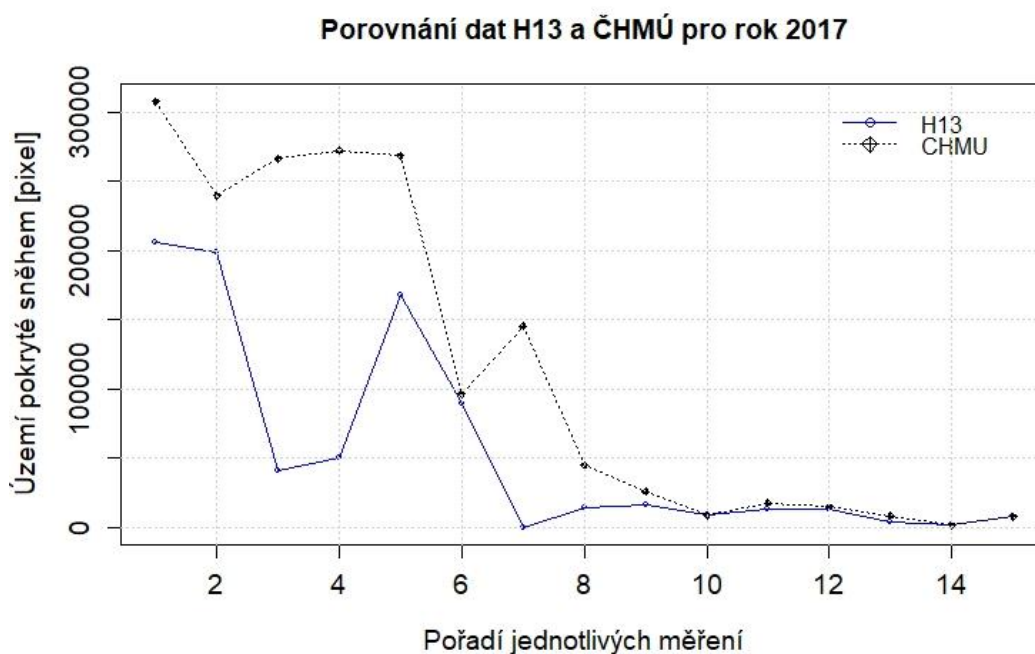


Obr. 36 – Porovnání produktu MYD10A1 s pozemním měřením ČHMÚ pro rok 2017

Výrazná fluktuace hodnot je zřejmá u obou produktů, která se po osmém měření, které odpovídá datu 27.2. 2017, výrazně uklidňuje. V průběhu března a dubna vykazovaly hodnoty MYD10A1 a H13 relativně stejný průběh.

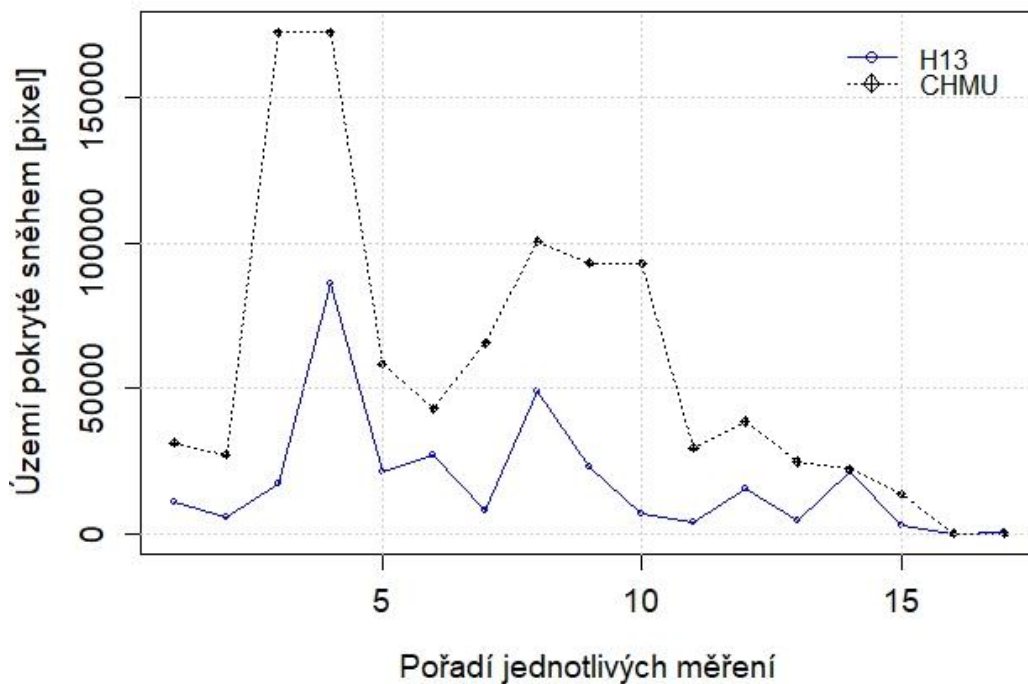
V roce 2017 nejlépe postihoval extrémů produkt MYD10A1, který byl hned v rámci prvního měření, tedy 2.1. 2017, relativně shodný s měřením ČHMÚ. Oproti tomu produkt H13 většinu extrémů podhodnocoval až na jeden, který produkt MYD10A1 oproti H13 výrazně podhodnotil. Tato situace nastala v rámci šestého měření, které odpovídá datu 13.2. 2017.

Obrázek 38 graficky interpretuje periodu, kdy se systematická chyba blížila 70 %. Je zde vidět, že H13 je schopen relativně dobře odhadovat pixely, které jsou interpretovány jako sníh, až na dobu mezi 29.1. až 5.3. 2018 (5-10 měření), kdy nebyl schopen postihnout extrémní výkyv a jeho výstupy výrazně podhodnocovaly skutečný výskyt sněhové pokrývky. Toto výrazné podhodnocení pak mělo zásadní vliv na hodnotu PBIAS.



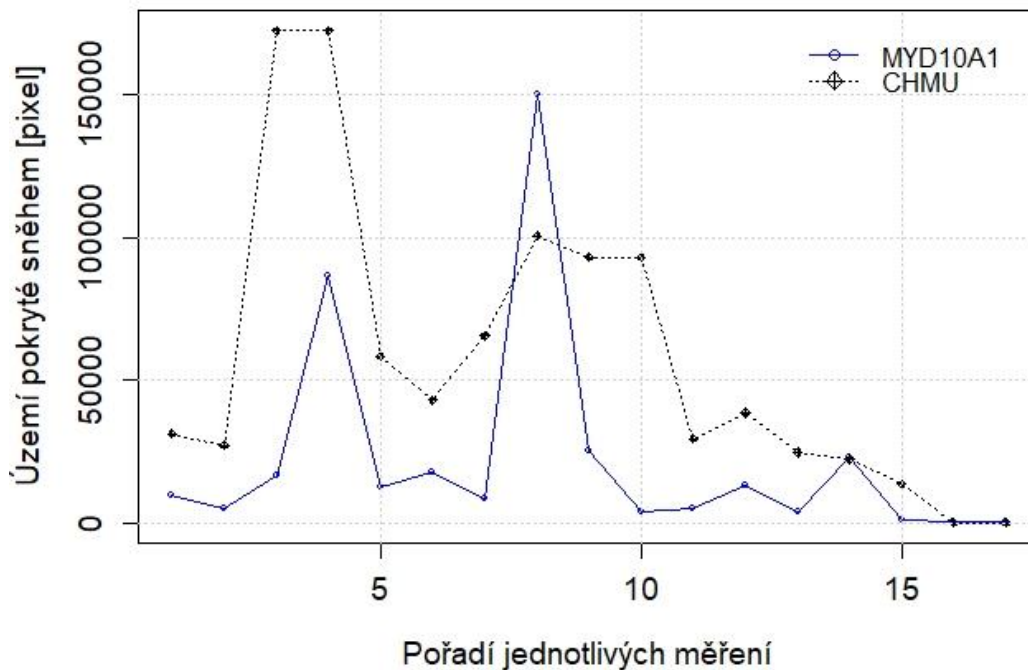
Obr. 37 – Porovnání produktu H13 s pozemním měřením ČHMÚ pro rok 2017

### Porovnání H13 s daty ČHMÚ pro rok 2018



Obr. 38 – Porovnání produktu H13 s pozemním měřením ČHMÚ pro rok 2018

### Porovnání dat MYD10A1 a ČHMÚ pro rok 2018



Obr. 39 – Porovnání produktu MYD10A1 s daty ČHMÚ v roce 2018

V roce 2018 nelze jednoznačně určit, který produkt kopíroval průběh naměřených dat ČHMÚ nejlépe. Produkt H13 má tendenci kopírovat průběh naměřené datové sady ČHMÚ již po desátém měření (29.1.). Oproti tomu MYD10A1 byl schopen relativně kopírovat průběh dat až ke konci sledovaného období. Produkt H13 byl schopen v době 1-5 měření (1.1.-29.1.) postihnout lokální extrém s menší mírou podhodnocení než MYD10A1. Naopak v době mezi 5-10 měřeními (29.1.-5.3.) poskytoval extrémně podhodnocené hodnoty. Oproti tomu MYD10A1 v té samé periodě nadhodnocoval.

## 6 Diskuze

Dle (Dong a Menzel 2016a) jsou produkty MODIS vhodné pro širokou škálu ekohydrologických studií, zejména pro oblasti, kde je vysoká pokrývka sněhu spojená s hrozbou lavin. Ve své práci (Dong a Menzel 2016a) uvádí, že produkt MODIS má určité mezery a špatná interpretace dat je často zaviněna zvýšeným výskytem oblačnosti. Studie (Dong a Menzel 2016a) validovala osmidenní produkty z obou satelitů MODIS, a to Aqua a Terra. Kombinací obou satelitů bylo sníženo celkové nadhodnocení sněhu z 11,9 % na 11 %. Finálně metoda kombinace zvyšuje přesnost ze 78 % až na 89 %. (Dong a Menzel 2016a) zvolil jako studované území Porýní-Falc, které je jedním ze 16 států Spolkové republiky Německo. Nadmořská výška se zde pohybuje v rozmezí 100–817 m.n.m. Celkem 42 % území státu je pokryto smíšenými lesy. Území ČR leží ze 67 % v nadmořské výšce do 500 m, 32 % je v rozmezí 500-1000 m a pouze 1 % leží nad 1000 m. Lesy pokrývají 1/3 území Česka. I přesto, že se některá místa ČR vyskytují ve vyšší nadmořské výšce, má menší zalesněnou plochu a větší celkovou rozlohu, měl MODIS tendenci naměřenou sněhovou pokrývku oproti studii (Dong a Menzel 2016a) podhodnocovat. Nadhodnocoval pouze v 6 případech ze 32 měření, jinak k výraznému nadhodnocení nedocházelo. Na rozdíl od analýzy v ČR neanalyzoval (Dong a Menzel 2016a) celé území Porýní-Falc, ale pouze 60 pixelů, jež se vyskytovaly v poloze, kde byly umístěny fyzické měřiče. V práci (Dong a Menzel 2016a) bylo zjištěno, že nejpřesnější detekce sněhu je pořízena při výšce sněhové pokrývky 3 cm.

Ve své další studii interpretoval (Dong a Menzel 2016b) metodu kombinace družice Terra a Aqua jako nedostatečnou, protože se během zimních období vyskytuje nad pozorovaným územím v Německu výrazná oblačnost. Tentokrát analyzoval efektivitu satelitních dat na celém území. Fúzi pozemního a satelitního snímání

označili za nejvhodnější, aby se minimalizovala chybovost za nepříznivého počasí. Kombinace je doporučována i touto prací vzhledem k faktu, že stále neexistuje spolehlivý a efektivní algoritmus, který by byl schopen rozeznat sněhovou pokrývku i pod mraky. Jako negativum by se pak vyskytla nutnost zvýšit počet fyzických měření in-situ. Tento algoritmus se u analýzy satelitních dat jeví jako nejsnazší, který by se dal na území ČR aplikovat. Zároveň by dokázal snížit chybovost, která byla v této práci zjištěna. Dle studie (Dong a Menzel 2016b) jsou oblačnost a nesprávná klasifikace dvě hlavní omezení hydrologického využití produktu MODIS.

Sníh je hlavním zdrojem proudění v centrálních horách Alborz v severním Íránu, a proto byla satelitní data uvažována a zkoumána jako pramen informací o sněhové pokrývce na tomto území (Darlane, Khoramian, a Santi 2017). Informace o vodních zdrojích je v tomto regionu klíčová a měření in-situ není v této oblasti dostačující. Na území pohoří Alborz poskytovaly produkty MOD10A1 a MYD101 prostorově přesné mapování sněhu. (Darlane et al. 2017) Pro odstranění chyby zapříčiněné mraky byl vytvořen sekvenční algoritmus, který jejich výskyt v datech eliminoval (Darlane et al. 2017). Navrhovaná technika dokáže oblačnost snížit až o 94 %. Algoritmus spoléhá na kombinaci družic Terra a Aqua, časové filtrování, sněhové čáry a zohledňování sousedních pixelů. Časové filtrování je jednou z nejoblíbenějších metod ve studiích redukce mraků (Darlane et al. 2017). Pravděpodobně k přesnější detekci dopomohla nadmořská výška pohoří Alborz, která se pohybuje v rozmezí od 0-5,610 m.n.m. Vyšší nadmořské výšky jsou vyprahlé s velmi malou hustotou zalesnění (Darlane et al. 2017). Časové filtrování využívá pozorování v předchozích a následujících dnech a předpokládá, že sněhová pokrývka se v uvažovaném časovém okně nemění. To by mohla být výraznější překážka při monitoringu sněhu v ČR, protože na území jako Praha často v ranních hodinách napadne vrstva sněhu, která během odpoledních hodin zcela vymizí vlivem přes den narůstající teploty. V rámci ČR by byla vhodnější metoda sousedních pixelů. Tento postup využívá informace o okolních pixelech, aby rozhodl o hodnotě pixelu, u kterého nemohl satelit určit interpretaci (Darlane et al. 2017).

Další práce (Rittger et al. 2013) ukazuje na méně diskutovaný vliv slunečních paprsků, které dopadaly na pozorované území. K eliminaci tohoto faktoru je dobré používat výsledky satelitu Terra, který snímá planetu v ranních hodinách. Změna úhlu slunečního zenitu klesla z maximálního ~ 96 % při 42° na 84 % při 58° (Coll a Li

2018). Závislost sněhového albeda u vysokých slunečních zenitových úhlů studoval (Wang a Zender 2010). Zkoumanou doménou bylo Grónsko a ve výsledcích své studie uvádí, že změna zenitového úhlu vysvětluje až 50 % sezónní variabilitu albeda. Tradiční metody pro měření albeda jsou omezené, a proto je nutné tento ukazatel dodatečně kalibrovat (Qin et al. 2018). Dalším, i když ne tak častým faktorem, který může ovlivňovat interpretaci je aktuální poloha Měsíce vůči Slunci, resp. stín který vrhá na sledované území (Zhang et al. 2019). Tyto faktory pro monitoring ČR nijak výrazně ovlivnit nelze, pouze zohledňovat v metodě kombinace čas snímání jednotlivými družicemi. Mimo jiné zmínil (Rittger et al. 2013), že v chybové interpretaci nehraje roli pouze samotný výskyt mraku jako takový, ale i jeho vlastnosti - hustota, velikost krystalů nebo kapek deště. „Silné“ mraky odrážejí mnohem více slunečního záření než sníh v krátkovlnné infračervené části spektra, a proto mohou být chybně interpretovány jako sníh (Rittger et al. 2013). Dále potvrzuje že podhodnocení sněhové pokrývky způsobuje hustota vegetativního pokryvu a špinavý sníh, který může být satelitem chybně interpretován. Tomu odpovídají i výsledky této práce, kdy pravděpodobně vlivem oblačnosti a hustého vegetativního pokryvu nebyly studované produkty schopny detekovat sníh v oblastech jako Šumava a Krkonoše. V budoucnosti by mohl tyto problémy vyřešit shluk menších senzorů a LiDAR (Rittger et al. 2013). Studie (Dong a Menzel 2016a) uvedla, že chybovost interpretace je přímo úměrná nadmořské výšce, ve které se snímáný povrch vyskytuje.

Delší časové období, konkrétně pak 12 let analyzovala studie (Coll a Li 2018), která mimo již diskutovaných faktorů uvádí, že přesnost detekce sněhové pokrývky je spojena i s typem krajinného pokryvu. Největší přesnost se vyskytuje na orné půdě a to 94,9 %, naopak nejmenší přesnost je u půd s vyšším podílem vody, například mokřadů. Tyto půdy mají přesnost 79,5 % (Coll a Li 2018). (Coll a Li 2018) uvádí, že v budoucnosti by se měly analýzy satelitních produktů MODIS zkombinovat i s evropskými sněhovými produkty jako Landsat. Tuto práci plánuje porovnat se šesti sněhovými produkty MODIS namísto s pouhými pěti. Že nelze spoléhat na jeden satelitní produkt, potvrzuje i (Sproles et al. 2018), který ve své práci také navrhuje metodu kombinace.

Jak již uvádí text výše bylo již uvedeno, že nebyl nalezen žádný odborný zdroj, který by validoval sněhový produkt H13 nebo jakýkoliv jiný sněhový produkt ze sady H-SAF. Za zmínku stojí práce (Feidas 2018), která hodnotila produkt H03 a jeho



působení nad územím Řecka. Produkt H03 je určen pro dešťové srážky. Jako v jiných studiích, i zde byla satelitní data porovnávána s fyzickými měření na 33 stanicích, které byly rozmístěny po celém území sledovaného státu. Obecně statistiky vykazovaly vysoké hodnoty RMSE, MAE se závěrem, že vychází obecně horší RMSE v % pro lehký typ srážek. I v předkládané práci vykazoval produkt od producenta HSAF vysoké hodnoty RMSE.

S pokračujícím vývojem technik pozorování Země je aktuálně k dispozici ohromné množství snímků s vysokým spektrálně-prostorovým časovým rozlišením (Zhong et al. 2018). Dle předložených studií, zatím neexistuje produkt, potažmo algoritmus, který by dokázal monitorovat sněhovou pokrývku se 100 % úspěšností za všech okolností.

## **7 Závěr**

Na základě výsledků této analýzy nelze jednoznačně doporučit ani jeden ze zkoumaných produktů. V majoritě větší případů oba dva produkty podhodnocovaly počet pixelů obsahujících sněhovou pokrývku. Pouze v roce 2017 se produktu H13 podařila shoda s naměřenými daty ČHMÚ. V kombinaci s ostatními zmíněnými inženýrskými aplikacemi, které jsou schopny nahradit chybějící data, by mohly oba dva produkty vykazovat lepší výsledky v budoucnosti.

Z hlediska náročnosti zpracování a počtu informací je zhodnocen jako nejvhodnější MODIS. Bylo již napsáno obsáhlé množství prací, které se problematice produktu MODIS věnují a všechny se shodují, že bez kombinace s pozemním měřením nelze MODIS používat jako jediný zdroj informací o sněhové pokrývce, pouze v těžko přístupných oblastech, kde není měření in-situ možné. Oproti tomu o produktech HSAF mnoho studií publikováno nebylo. I když produkt H13 vykazoval mírně lepší hodnoty RMSE a R2, zároveň jeho systematická chybovost dosahovala v roce 2018 69 %. Proto je autorem práce preferován ze dvou analyzovaných produktů MODIS i s ohledem na náročnost samotného zpracování a cesty k metadatům.

Cíle práce byly splněny, ale výsledně bylo zjištěno několik nedostatků, které obsáhlost této analýzy snižují. V případě budoucích analýz je autorem doporučeno detailněji prozkoumat možnosti všech produktů MODIS na delším časovém úseku a porovnat úspěšnost satelitního snímání u domén, které leží ve vyšší nadmořské výšce oproti těm, které se nachází převážně pod 1000 m.n.m. Zároveň je doporučováno zkombinovat

data z družic Terra a Aqua a určit, zda jejich syntéza zlepšuje úspěšnost dat i pro doménu České republiky, jelikož jak již bylo zmíněno, chybovost interpretace je přímo závislá na nadmořské výšce, ve které pozorované území leží. Pro pokročilejší analýzu by bylo vhodné použít i metodu interpretace za pomoci sousedního pixelu, která byla v diskuzní části zmíněna.

## 8 Přehled literatury a použitých zdrojů

- Barnston, Anthony G. 1992. *Correspondence among the Correlation, RMSE, and Heidke Forecast Verification Measures; Refinement of the Heidke Score*.
- Bert Markgraf. 2018. „How to calculate BIAS". *Sciencing*.
- Coll, James a Xingong Li. 2018. „ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Comprehensive accuracy assessment of MODIS daily snow cover products and gap filling methods". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 144(July):435–52.
- Córdoba, Dr. S. Sanz Fernández de. 2004. „The 100 km Boundary for Astronautics". *Fédération Aéronautique Internationale*.
- CZRegion. 2019. „Všeobecné info o České republice". Získáno (<https://www.czregion.cz/vseobecne-info>).
- Darlane, Alireza B., Amin Khoramian, a Emanuele Santi. 2017. „Remote Sensing of Environment Investigating spatiotemporal snow cover variability via cloud-free MODIS snow cover product in Central Alborz Region". *Remote Sensing of Environment* 202:152–65.
- Day, Dwayen A. 1998. *Eye in the Sky: The Story of the Corona Spy Satellites*. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press.
- DeWalle, David R. and Rango, Albert. 2008. *Principles of snow hydrology*. Cambridge. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, New York.
- Ding, Yongjian, Shiqiang Zhang, Lin Zhao, Zhongqin Li, a Shichang Kang. 2019. „Global warming weakening the inherent stability of glaciers and permafrost". *Science Bulletin* 64(4):245–53.
- Dingman, S. Lawrence. 2015. *Physical Hydrology*. Third Edit. Waveland Press, Inc.
- Dong, Chunyu a Lucas Menzel. 2016a. „Improving the accuracy of MODIS 8-day snow products with in situ temperature and precipitation data". *JOURNAL OF HYDROLOGY* 534:466–77.
- Dong, Chunyu a Lucas Menzel. 2016b. „Remote Sensing of Environment Producing cloud-free MODIS snow cover products with conditional probability interpolation and meteorological data". *Remote Sensing of Environment* 186:439–51.
- Feidas, H. 2018. „Validation of the H-SAF precipitation product H03 over Greece using rain gauge data". 377–98.
- Fesenmaier, Kimm. 2011. „Snowflake science: Physicist explains why snowflakes are so thin and flat". Získáno (<https://phys.org/news/2011-12-snowflake-science-physicist-snowflakes-thin.html?fbclid=IwAR2SfwPy1pDZNSe3V11iLD0gbDjLa220ZkAJrAEeg1U7y-jPSa519n0Ivjg>).
- Frei, Allan, Marco Tedesco, Shihyan Lee, James Foster, Dorothy K. Hall, Richard Kelly, a David A. Robinson. 2012. „A review of global satellite-derived snow

- products". *Advances in Space Research* 50(8):1007–29.
- Friesl, M. 2014. „Pravděpodobnost a statistika". 124. Ziskáno (<https://home.zcu.cz/~friesl/Vyuka/Pse.html>).
- Hall, D. K. and G. A. Riggs. 2007. „Accuracy assessment of the MODIS snow-cover products".
- Hall, Dorothy K., George A. Riggs, Vincent V Salomonson, Nicolo E. Digirolamo, a Klaus J. Bayr. 2002. „MODIS snow-cover products". 83:181–94.
- Howell, Elizabeth. 2017. „What is a Satellite?" *space.com*.
- Huang, Xiaodong, Tiangang Liang, Xuotong Zhang, a Zhenggang Guo. 2011. „Validation of MODIS snow cover products using landsat and ground measurements during the 2001-2005 snow seasons over northern Xinjiang, China". *International Journal of Remote Sensing* 32(1):133–52.
- Huggel Ch., Carey M., Clague J. J. and Kääh A. 2015. *The High-Mountain Cryosphere*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, New York.
- Janke, Jason R., Sam Ng, a Antonio Bellisario. 2017. „Geomorphology An inventory and estimate of water stored in firn fields, glaciers, debris-covered glaciers, and rock glaciers in the Aconcagua River". *Geomorphology* 296:142–52.
- Jiang, Lingmei, Saibun Tjuatja, Jiancheng Shi, Lixin Zhang, a Kaiguang Zhao. 2012. „Evaluation of emission from snow-covered ground for passive microwave remote sensing". *International Journal of Remote Sensing* 33(3):872–86.
- Klein, Andrew G. a Anne W. Nolin. 2000. „Development of a prototype snow albedo algorithm for the NASA MODIS Development of a prototype snow albedo algorithm for the NASA MODIS Instrument". (September 2014).
- Krause, P. a D. P. Boyle. 2005. „Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment". 89–97.
- Lem, Pola. 2017. „Modern Satellites: Littler and Mightier Than Before". *Earth Observatory NASA*.
- Levizzani, Vincenzo, Sante Laviola, a Elsa Cattani. 2011. „Detection and Measurement of Snowfall from Space". 145–66.
- Libbrecht, Kenneth G. 2003. „Growth rates of the principal facets of ice between À 10 1 C and À 40 1 C". 247:530–40.
- Madsen, H. 2000. „Automatic calibration of a conceptual rainfall – runoff model using multiple objectives". 235:276–88.
- Mentaschi, L., G. Besio, F. Cassola, a A. Mazzino. 2013. „Problems in RMSE-based wave model validations". *Ocean Modelling* 72:53–58.
- Neyman J., & Pearson E. S. 1936. „Contributions to the theory of testing statistical hypotheses".
- Ondráčková, Jitka. 2012. *IMPLEMENTACE POSTUPŮ HODNOCENÍ KVALITY DMR DO ArcGIS*. Olomouc, Czech Republic.

- Parkinson, Claire L. 2003. „Aqua : An Earth-Observing Satellite Mission to Examine Water and Other Climate Variables". 41(2):173–83.
- Qin, Yinghong, Ju Luo, Zheng Chen, Guoxiong Mei, a Li-e Yan. 2018. „Measuring the albedo of limited-extent targets without the aid of known- albedo masks". *Solar Energy* 171(July):971–76.
- R. Čekal, P. Šercl, R. Vlnas, M. Černý, M. Boháč, L. Černá, J. Kubát, M. Pech. 2017. *Hydrologická ročenka České republiky 2017*.
- Riggs, George A. a Dorothy K. Hall. 2015. „MODIS Snow Products Collection 6 User Guide". (December).
- Rittger, Karl, Thomas H. Painter, a Jeff Dozier. 2013. „Advances in Water Resources Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS". *Advances in Water Resources* 51:367–80.
- Siddiqi, Asif. 2008. „Sputnik 50 years later : New evidence on its origins". 63:529–39.
- Singer, F. S. and R. W. Popham. 1963. „Non-meteorological observations from satellites". *Astronautics and Aerospace Engineering* 1(3):89-92.
- Snehmani, Mritunjay Kumar Singh, R. D. Gupta, Anshuman Bhardwaj, a Pawan Kumar Joshi. 2015. „Remote sensing of mountain snow using active microwave sensors: a review". *Geocarto International* 30(1):1–27.
- Sproles, Eric A., Ryan L. Crumley, Anne W. Nolin, Eugene Mar, a Juan Ignacio Lopez Moreno. 2018. „SnowCloudHydro-A new framework for forecasting streamflow in snowy, data-scarce regions". *Remote Sensing* 10(8):1–15.
- Stoffel, Markus a Richard A. Marston. 2016. „Geomorphology Floods in mountain environments : A synthesis". 272:1–9.
- T. Pánek, J. Hradecký (Department of Physical Geography and Geoecology, University of Ostrava). 2016. *Landscapes and Landforms of the Czech Republic*. Springer International Publishing Switzerland.
- Tricia Lobo. 2017. „How to Calculate the RMSE or Root Mean Squared Error". *Sciencing*.
- Wang, Xianwei a Charles S. Zender. 2010. „Remote Sensing of Environment MODIS snow albedo bias at high solar zenith angles relative to theory and to in situ observations in Greenland". *Remote Sensing of Environment* 114(3):563–75.
- Zhang, Jiahua. 2019. „International Journal of Disaster Risk Reduction Review of flood disaster studies in Nepal : A remote sensing perspective Til Prasad Pangali Sharma". *International Journal of Disaster Risk Reduction* 34(9):18–27.
- Zhang, Rui, Rui Tu, Pengfei Zhang, Jinhai Liu, a Xiaochun Lu. 2019. „ScienceDirect Study of satellite shadow function model considering the overlapping parts of Earth shadow and Moon shadow and its application to GPS satellite orbit determination". *Advances in Space Research* 63(9):2912–29.
- Zhong, Yanfei, Ailong Ma, Zexuan Zhu, a Liangpei Zhang. 2018. „Computational intelligence in optical remote sensing image processing". *Applied Soft*

*Computing Journal* 64:75–93.