

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ
A ENVIROMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ



**ANALÝZA METOD MONITORINGU SNĚHOVÉ
POKRÝVKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VEDOUCÍ PRÁCE: ING. ROMAN JURAS, PH. D.

BAKALANT: JAN MAŠEK

PRAHA, 2023

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Mašek

Vodní hospodářství

Název práce

Analýza metod monitoringu sněhové pokrývky

Název anglicky

Analysis of snow cover monitoring methods

Cíle práce

Vypracovat literární rešerši zaměřenou na monitoring sněhové pokrývky. Student se zaměří především na:

- Celkovou analýzu metod a technologií používaných k monitoringu sněhové pokrývky
- Získání přehledu o měřených sněhových veličinách
- Analýzu dat a senzorů využívaných při satelitním snímání Země

Metodika

Student vypracuje rešerši zahrnující dostupnost a kvalitu měřených veličin sněhové pokrývky (např. albedo, vodní hodnota sněhu, pokrytí sněhem apod.). Rešerše se zaměří především na světové databáze satelitních a terestriálních dat, kde vyhodnotí pokrytí a rozlišení v čase a prostoru vybraných sněhových veličin. V rámci práce budou graficky a tabelárně porovnány jednotlivé satelitní systémy a datové produkty.

Doporučený rozsah práce

35 stran

Klíčová slova

sníh, satelitní data, databáze, multispektrální senzory, DPZ

Doporučené zdroje informací

Dietz, A. J., Kuenzer, C., Gessner, U. and Dech, S.: Remote sensing of snow – a review of available methods, *Int. J. Remote Sens.*, 33(13), 4094–4134, doi:10.1080/01431161.2011.640964, 2012.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

Ing. Roman Juras, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Elektronicky schváleno dne 29. 3. 2023

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 29. 3. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Analýza metod monitoringu sněhové pokrývky vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne

.....

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Romanovi Jurasovi, Ph.D. za odborné vedení práce, trpělivost a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

Abstrakt

Sníh je důležitou součástí hydrologického cyklu. Jako hlavní součást kryosféry představuje sněhová pokrývka také cenný vodní zdroj. V souvislosti se změnou klimatu hraje dynamika sněhové pokrývky zásadní roli při ovlivňování hydrologického cyklu a vodní bilance, což má významné dopady na životní prostředí a lidské aktivity v oblastech závislých na vodě. Dálkový průzkum Země, hydrologické modelování a pozemní měření jsou tři techniky často používané pro výzkum sněhové pokrývky. Protože sněhová pokrývka hraje důležitou roli v klimatickém systému Země, je nutné mapovat rozsah sněhové pokrývky, a to ve vysokém časovém i prostorovém rozlišení. V této práci je uveden grafický a tabelární přehled dostupných možností pro monitorování sněhové pokrývky. Práce se zabývá shrnutím fyzikálních a spektrálních vlastností sněhu, metodami mapování sněhové pokrývky, nejčastěji měřenými veličinami a na závěr popisuje multispektrální senzory a jejich datové produkty využívané pro monitoring sněhové pokrývky. Diskutuje se o možnostech zkvalitnit dálkově snímané informace ohledně sněhu, pomocí dat z pozemního sběru. Na konci práce by měl mít čtenář zastřešující přehled o tom, co je v současnosti možné a jaké úskalí mohou nastat v rámci mapování sněhové pokrývky z reflexní a mikrovlnné části spektra a doporučuje synergický rámec pro budoucnost výzkumu sněhové pokrývky, který klade důraz na propojení měření sněhu pomocí pozemního sběru dat, metod DPZ a asimilací vylepšených dat dálkového průzkumu, které jsou základním vstupním parametrem hydrologických modelů.

Klíčová slova: sníh, satelitní data, databáze, multispektrální senzory, dálkový průzkum Země

Abstract

Snow is an important part of the hydrological cycle. As a major component of the cryosphere, snow cover is also a valuable water resource. In the context of climate change, snow cover dynamics play a major role in influencing the hydrological cycle and water balance, with significant impacts on the environment and human activities in water-dependent areas. Remote sensing, hydrological modelling and ground measurements are three techniques often used for snow cover research. Because snow cover has an important role in the Earth's climate system, it is necessary to map the extent of snow cover at high temporal and spatial resolution. In this thesis, a graphical and tabular overview of the available options for snow cover monitoring is presented. The thesis discusses a summary of the physical and spectral properties of snow, snow cover mapping methods, the most commonly measured quantities, and concludes with a description of multispectral sensors and their data products used for snow cover monitoring. The possibility of improving remotely sensed snow cover information using ground collection data is discussed. At the end of the thesis, the reader should have an overarching view of what is currently possible and what pitfalls may arise in mapping snow cover from the reflective and microwave portions of the spectrum, and a synergistic framework for the future of snow cover research is recommended that emphasizes the integration of snow measurements using ground-based data collection, remote sensing methods, and the assimilation of improved remotely sensed data as a fundamental input to hydrological models.

Key words: snow, satellite data, databases, multispectral sensors, remote sensing

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce	2
3. Sněhová pokrývka a kryosféra	3
3.1 Kryosféra	3
3.2 Vznik sněhových krystalů	3
3.3 Druhy sněžení.....	4
3.4 Vývojová fáze sněhové pokrývky	6
3.5 Vybrané charakteristické parametry sněhové pokrývky	6
3.5.1 Měrná hmotnost	6
3.5.2 Obsah kapalné vody	7
3.5.3 Vodní hodnota sněhu	8
3.5.4 Odrazivost – Albedo	8
3.5.5 Velikost zrna a pórovitost	10
4. Možnosti monitorování sněhové pokrývky.....	11
4.1 Pozemní – staniční a terénní měření.....	11
4.1.1 Sněhoměrný polštář.....	14
4.1.2 Sněhoměrná váha	15
4.1.3 Snowpack analyser (SPA).....	16
4.2 Distanční měření.....	17
4.2.1 Mapování sněhové pokrývky za použití DPZ.....	17
4.2.2 Historie monitoringu sněhové pokrývky.....	18
4.2.3 Monitoring v oblasti elektromagnetického spektra.....	19
Optická část spektra	20

Infračervená část spektra.....	21
Mikrovlnná část spektra	22
4.2.4 Problematické aspekty ovlivňující monitoring sněhové pokrývky.....	24
Oblačnost	24
Lesní vegetace.....	25
Denní doba	26
4.2.5 Indexy používané k detekování sněhové pokrývky	26
NDSI	26
S3 index.....	27
NDFSÍ.....	28
4.2.6 Instituce a projekty zabývající se mapováním sněhu.....	29
National Snow and Ice Data Center	29
Remote Sensing of Snow and Ice.....	29
Cryospheric Sciences Laboratory	30
NASA's Earth Observing System	30
National Operational Hydrologic Remote Sensing Center	31
European Space Agency	32
Copernicus	33
Polar View.....	34
4.2.7 Přehled vybraných družicových systémů (senzorů).....	35
Modis	35
Landsat	37
Sentinel.....	39
AVHRR.....	40

SEVIRI.....	41
MERIS	42
VIIRS	42
CrIS	43
ASTER	43
5. Zpracování dat.....	44
5.1 Druhy a typy dostupných dat.....	44
5.2 Dostupnost dat	44
5.3 Využívané programy k analýze dat	45
6. Výsledné zhodnocení	46
6.1 Tabelární porovnání družicových systémů.....	46
6.2 Grafické porovnání družicových systémů	48
7. Diskuse.....	54
8. Závěr a přínos práce	57
9. Přehled literatury a použitých zdrojů	59

1. Úvod

Sněhová pokrývka je významným faktorem ovlivňující klimatické změny, hydrologické cykly a životní prostředí obecně. Z hydrologického hlediska sněhová pokrývka plní funkci zásobárny vody. V České republice se během zimního období voda ve formě sněhu hromadí po několik měsíců. Většina zásob vody se uvolňuje během jarního tání, které může v extrémních podmínkách vést až k lokálním povodním. Cílem této práce je poskytnout přehled možností monitorování sněhové pokrývky a porovnat vybrané metody a technologie, které jsou využívány k mapování sněhu.

Téma práce se zaměřuje na problematiku sledování a mapování sněhové pokrývky, která je v posledních letech stále aktuálnější, zvláště s ohledem na současné změny klimatu. Z tohoto důvodu je mapování sněhové pokrývky velmi důležité pro celou řadu odvětví, jako je zemědělství, vodohospodářství, energetika, turistika a mnoho dalších. Mapování sněhové pokrývky se provádí za účelem získání informací o množství a rozloze sněhu na určitém území. Tyto informace jsou potřebné například pro správu vodních zdrojů, plánování zimní sezóny v lyžařských střediscích, předpovědi lavinového ohrožení, predikci povodní a pro analýzu změn klimatu.

Důležitost sněhu v dnešní době je nezpochybnitelná. Sníh totiž působí jako izolant, který chrání vegetaci před mrazem a zabraňuje vysychání půdy. Dále sníh ovlivňuje množství slunečního záření, které se odráží zpět do atmosféry, a tím má vliv na klimatické změny.

V posledních letech se díky rozvoji automatizace technologií monitoringu sněhové pokrývky a dálkového průzkumu Země zkrátila doba aktualizace dat, a je tak možné získávat velké množství dat o stavu sněhu po celém světě, a to i na denní bázi. Tyto informace mohou být využívány k vytváření modelů klimatických změn, predikci povodní a pro analýzu dopadu změn klimatu na životní prostředí.

2. Cíle práce

Hlavním cílem práce je získat ucelený přehled o možnostech monitorování sněhové pokrývky a dostupných datech. Jako dílčí cíle jsou definovány:

- Celková analýza metod a technologií používaných k monitoringu sněhové pokrývky
- Získání přehledu o měřených sněhových veličinách
- Analýza dat a senzorů využívaných při satelitním snímání Země

Práce tabelárně a graficky porovnává vybrané družicové senzory mapující sněhovou pokrývku a sněhové datové produkty. Také by měla přispět k lepšímu pochopení významu důležitosti mapování sněhu a pomoci při výběru vhodné metody pro monitorování této důležité složky klimatického systému.

3. Sněhová pokrývka a kryosféra

Tato kapitola se věnuje problematice sněhové pokrývky a jejími vybranými parametry důležitými pro její monitoring. Popisuje vybrané fyzikální vlastnosti sněhu, vývojové fáze a obecný úvod do oblasti kryosféry.

3.1 Kryosféra

Slovo kryosféra má svůj původ v řečtině. *Krios* se dá přeložit jakožto chlad/chladný či námraza. Mezi kryosféru se dá zařadit sněhová pokrývka, led na tekoucí vodě, jezerní led, ledovce, ledové příkopy, mořský led a permafrost. Teplota na zemském povrchu klesá s rostoucí vzdáleností od rovníku (Rees, 2006).

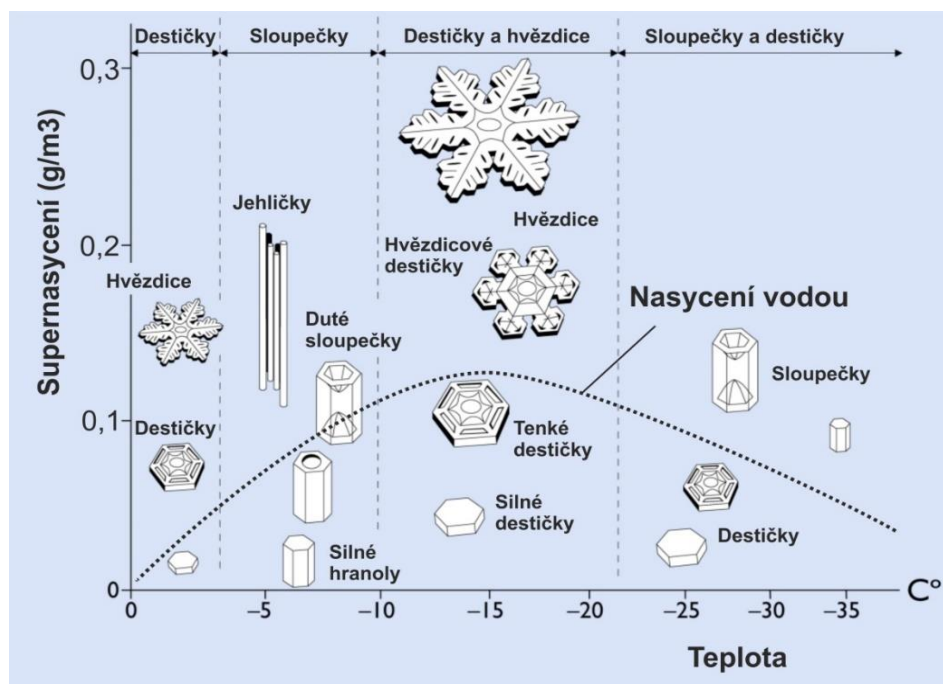
Sněhová pokrývka je důležitá pro ochranu krajinného krytu, půdního podloží i zásobárnou vody a závlahy v období jara. V neposlední řadě sněhová pokrývka je nepostradatelným prvkem zimy, ze kterého se radují nejen milovníci zimních sportů. Nicméně může způsobit velké materiální škody a ohrozit životy, při víceletých povodních či lavinách. Kryosféra je součástí globálního klimatického systému a má vliv na výskyt sněhu a ledu na planetě.

3.2 Vznik sněhových krystalů

Sníh je z hydrologického a klimatologického hlediska významný prvek, který ovlivňuje přírodní prostředí, floru a faunu nacházející se v jeho okolí. Je to druh vertikálních vypadávajících srážek v tuhém skupenství. Zjednodušeně řečeno jde o formu ledu. Při hromadění sněhu na zemském povrchu, nazýváme jej sněhová pokrývka (Giuliani et al., 2016).

Vznik sněhových a ledovcových krystalů je složitý proces, který je součástí koloběhu vody v atmosféře. Pokud je oblačnost dostatečně nasycena vodní parou, začne docházet ke kondenzaci na ledových krystalcích. Tím vznikají drobné kapičky vody, které mrznou a dochází k následné akreci. Krystalky jsou formovány při nízké prostorové koncentraci molekul vody. Z tohoto důvodu nevzniká kompaktní masa, kterou můžeme pozorovat při změně skupenství vody do na zemském povrchu. Tvary a velikost výsledných krystalů závisejí na stupni nasycení vodní parou v místě vzniku a na teplotě při které se formují.

Tato závislost je patrná na obrázku č. 1. Může také docházet k růstu krystalů díky kontaktu s ostatními krystaly, spojí-li se více krystalů do hromady, začnou vznikat dendrity neboli sněhové vločky. Základním tvarem je šesticípá destička a hvězdice. Hlavním důvodem, proč může sněhová vločka tvořit takovéto struktury, je specifický typ intermolekulárních vazeb (DeWalle, 2011).



Obr. 1: Schéma vzniku sněhových krystalů (Nakaya, 1954).

Vznikající vrstvy ve sněhové pokrývce neboli diagenese je důsledkem metamorfózy. V průběhu doby dochází k subsidenci sněhové pokrývky, při kterém se snižuje pórovitost a zvyšuje se hustota. Sníh se udrží ve stejném krystalickém stavu nejdéle do pátého dne po napadnutí (Hrušková, 2006).

3.3 Druhy sněžení

Vypadávající sníh se v meteorologii označuje jako sněžení. Rozeznáváme sněžení podle doby na občasné či trvalé a dále podle viditelnosti na silné, mírné a slabé sněžení. Soukupová (2011) uvádí topologii mraků, z nichž může sníh vypadávat. Jedná se o *Nimbostratus*, *Altostratus*, *Cumulonimbus* a *Stratocumulus*. Okolo 5 % srážek, které dopadnou na povrch je sněhových. V polárních oblastech je to okolo 80 % (Rees, 2006).

V mírném podnebném pásu České republiky sníh můžeme nalézt převážně v horských oblastech. Obecně platí, že s rostoucí nadmořskou výškou klesá teplota vzduchu a přibývá sněhových srážek (Jelínek, 2008).

Fierz et al. (2009) zohledňují mezinárodní klasifikaci sněhové pokrývky podle vzniku a tvaru sněhových zrn, viz následující rozdělení.

Tab. 1: Druhy sněhu a jeho charakteristiky (Fierz et al., 2009).

DRUH SNĚHU	SYMBOL	VZNIK	CHARAKTERISTIKA	VELIKOST
nový	++	v atmosféře, klasické vločky	obvykle velmi rychlá změna konzistence, po krátkou dobu může tvořit kritickou vrstvu	1-3 mm
zlomkový	//	důsledek destruktivní přeměny nového sněhu, často je sníh zlomkový již po dopadu na povrch	nepravidelné tvary, ve stádiu destrukce jsou základem nebezpečných deskových lavin	1-2 mm
krupkovitý	⊗ ⊗	forma srážek, často s bouřkovým počasím	mohou krátce tvořit kritickou vrstvu	0,5-3 mm
pohárkové krystaly	∧ ∧	extrémní projev rostoucí krystalizace, při vysokém gradientu teplot	krystaly mají tvar podobný pohárkům, měkký a lámavý sníh – kritická vrstva	2-5 mm
hranatozrnitý	□ □	růstovou krystalizací	nebezpečnost hranatých ledových krystalů roste s jejich velikostí, vlastnosti se mění velmi pomalu	0,5 - 2 mm
okrouhlozrnitý	● ●	sesedáním nového sněhu či mechanickým roztrháním sněhových krystalu	hutná struktura sněhu, může být obsažen v deskové lavině, vlastnosti se mění velmi pomalu	< 0,5 mm
firn (přechod mezi ledem a sněhem)	○ ○	opakovanou krystalizací natavené vrstvy sněhu	mokrý, měkký kompaktní sníh, který se nachází mezi novým sněhem a ledovcem	1-5 mm

povrchová jinovatka	V V	ledové krystaly vzniklé díky vzdušné vlhkosti za silného mrazu	pokud na ni napadne sníh, tvoří nestabilní vrstvu, vlastnosti se mění velmi pomalu	2-5 mm
zledovatělá krusta	⊙ ⊙	opakovaným promrzáním nataveného povrchu sněhu	tvrdá a stabilní struktura, její tloušťka může dosáhnout až několika centimetrů	
ledové lamely	— —	obvykle po dešti, mrznutím se na povrchu sněhu vytvoří ledová glazura	pokud na ni napadne zmrzlý sníh, tvoří nestabilní, kritickou vrstvu	

3.4 Vývojová fáze sněhové pokrývky

Při modelování sněhové pokrývky rozeznáváme tři období:

- a. akumulace
- b. dozrávání
- c. tání sněhu

Sněhová pokrývky se formuje při teplotách pod bodem mrazu, výjimečně také při velké intenzitě sněžení v kladných teplotách. Množství nečistot, které sněhová pokrývky obsahuje se zvyšuje se stářím sněhu (Fierz et. al., 2009).

3.5 Vybrané charakteristické parametry sněhové pokrývky

Vlastnosti sněhu jsou značně spjaté s vlastnostmi vody, tudíž fyzikální a chemické charakteristiky jsou si velmi podobné. (Dingman, 2015). Tato kapitola popisuje vybrané fyzikální vlastnosti sněhové pokrývky stěžejní pro potřeby této práce.

3.5.1 Měrná hmotnost

Měrná hmotnost sněhu je vyjádřena jako hmotnost sněhové pokrývky a množstvím vody v ní obsaženém. Tato informace je klíčová pro předpověď povodňového rizika (Rees, 2006).

Pro výpočet měrné hmotnosti sněhové pokrývky se dá použít následující vzorec:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (1)$$

Kde m_s udává hmotnost sněhu a V_s objem sněhu. Základní jednotka měrné hmotnosti je $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ či $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Standardní parametry měrné hmotnosti sněhové pokrývky se nachází v rozmezí $0,2 - 0,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Ve výjimečných případech, zejména za chladného počasí, může hustota dosahovat množství menší nežli $0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Hustota sněhu roste s jeho stářím, což je důsledek zhutňování a metamorfózy. U čerstvého nově napadlého sněhu bude hustota nejmenší (Singh et Singh, 2001; Dingman, 2015). Tabulka č. 2 porovnává hustotu různých sněhových forem.

Tab. 2: Hustota rozdílných forem sněhové pokrývky (Singh et Singh, 2001).

Typ sněhu	Hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
nový sníh	40-70
vlhký nový sníh	100-200
sesedlý sníh	200-300
zhuštěný sníh	350-400
firn	400-650
velmi mokrý sníh	700-800
ledovcový led	850-910

3.5.2 Obsah kapalné vody

Anglická zkratka LWC neboli Liquid water content, je množství kapalné vody obsažené v pórech sněhu, což zjednodušeně vyjadřuje vlhkost sněhu. Tato hodnota se vyjadřuje v objemových procentech a získává se jako poměr masy sněhu a kapalné vody. Čerstvě napadaný prachový sníh má LWC blížíící se 0 %. Čím vyšší je obsah kapalné vody, tím rychleji sníh taje. Výpočet LWC je důležitý pro předpověď povodní a dalších meteorologických událostí (Koch et al., 2019). Pro výpočet obsahu kapalné vody se dá použít následující vzorec:

$$LWC = \frac{V_w}{V_s} \quad (2)$$

Kde V_w udává objem kapalné vody a V_s celkový objem sněhu.

Tab. 3: Rozdělení typu sněhu podle LWC (Singh et Singh, 2001).

Typ sněhu	Charakteristika	Podíl vody
suchý	teplota sněhu je menší než 0 °C, sníh nemá tendenci se lepit	0
vlhký	teplota sněhu je rovna 0 °C, sníh se lepí a sněhová zrna mají tendenci se shlukovat	< 0,03
mokrý	teplota sněhu je rovna 0 °C, voda je viditelná při 10násobném zvětšení, ale nelze ji vytlačit	0,03-0,08
velmi mokrý	teplota sněhu je rovna 0 °C, vodu lze vytlačit lehkým tlakem, ve sněhu stále zůstávají vzduchové póry	0,08-0,15
rozbředlý	teplota sněhu je rovna 0 °C, nastává nasycení sněhu volnou vodou, ve sněhu je jen malé množství vzduchových pórů	> 0,15

3.5.3 Vodní hodnota sněhu

Vodní hodnota sněhové pokrývky, česky zkráceně SVH je definována jako množství vody ve sněhové pokrývce. Pro tuto veličinu lze použít i název Snow Water Equivalent, dále jako SWE. Udává se v milimetrech výšky vodního sloupce, který vznikne po úplném roztátí sněhové pokrývky. Stanovuje se z výšky sněhové pokrývky a hustoty (DeWalle, 2011). Pro výpočet SWE se dá použít následující vzorec:

$$SWE = h_s \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3)$$

Kde h_s udává výšku sněhové pokrývky, ρ_s objemovou hustotu sněhové pokrývky a ρ_w hustotu vody v kapalném skupenství o teplotě 0 °C (Strum et al., 2010). V rámci určení vodní hodnoty sněhu na stanicích ČHMÚ (Český hydrometeorologický ústav) se využívá metoda, která umožňuje vypočítat denní hodnotu SVH na základě měření na srážkoměrné stanici a nejbližší klimatické stanici (Bercha et al., 2017).

3.5.4 Odrazivost – Albedo

Pro sníh, který má vysokou odrazivost, je albedo obvykle velmi vysoké, což znamená, že téměř všechno sluneční záření, které dopadá na sněhovou plochu, je odraženo zpět do atmosféry. To má důležité dopady na klima a hydrologii, protože vysoké albedo může způsobit nižší teploty v okolí, což ovlivňuje srážky a sněhovou pokrývku. Další popis odrazivosti sněhové pokrývky je popsán v kapitole 4.2.3.

Albedo je klíčovou bezrozměrnou veličinou ovlivňující tání sněhu. Jedná se o míru schopnosti povrchu odrazit sluneční záření, vyjádřenou poměrem odraženého a dopadajícího záření. Albedo může nabývat hodnot od 0 do 1. Čerstvý sníh má zvláštní schopnost výrazně odrazit sluneční záření ve srovnání s jinými přírodními povrchy. Sníh, který je čerstvě napadlý a nachází se na málo členitém povrchu bez znečištění, má vysokou schopnost odrazit až 90 % sluneční záření zpět do kosmu. Naopak mokrá sníh má schopnost odrazit pouze okolo 50 % záření (Gardner et Sharp, 2010). Další porovnání různých druhů povrchů je vidět v tabulce č. 4. Důležitým faktorem je také vlnová délka záření, protože záření s kratší vlnovou délkou proniká dále než záření s delší vlnovou délkou (Pomeroy et Brun, 2001).

Tab. 4: Porovnání albeda u různých typů povrchu (Singh a Singh, 2001).

Typ povrchu	Albedo
nový čerstvý sníh	0,75-0,95
starý sníh	0,40-0,80
ledovcový led	0,30-0,40
voda	0,04-0,13
pole	0,05-0,19
les	0,10-0,18
zatravnění	0,16-0,28

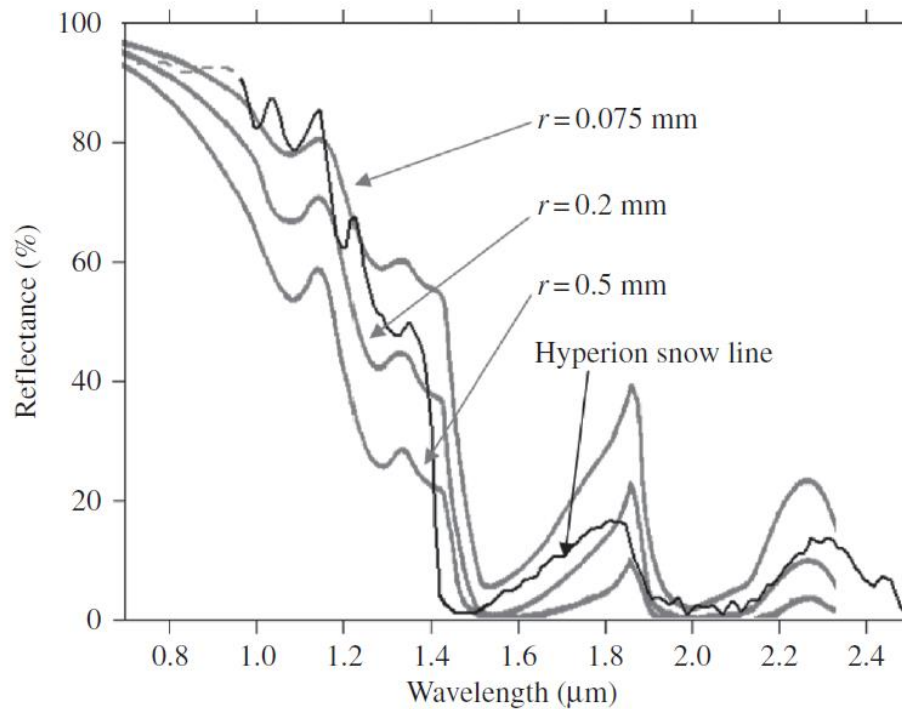
Pro výpočet planetárního albeda se dá použít následující vzorec:

$$R = \frac{\pi \cdot L}{E_{slunce} \cdot \cos \theta} \quad (4)$$

Kde L udává pozorovanou odrazivost, E_{slunce} ozáření spektrálního pásma Sluncem a θ zenitový úhel Slunce. Pro výpočet energetické bilance je nutné měřit odrazivost světla v celém spektru slunečního záření, který se pohybuje v rozmezí 0,3 až 2,5 mikrometrů. Protože družicové senzory poskytují data pouze z omezeného spektrálního pásma, je třeba provést dodatečné výpočty odrazivosti pro všechna úzká pásma (Havlík, 2008).

3.5.5 Velikost zrna a pórovitost

Sněhová pokrývka je ovlivňována mnoha faktory, ale jeden z nejdůležitějších je velikost zrn. Čím jsou zrna větší, tím je nižší odrazivost sněhu v celém spektru vlnových délek. Nejvíce zřetelný je tento efekt vlnových délek okolo 1000 nm, avšak i vlnové délky kratší či delší jsou v menší míře ovlivněny. Obrázek č. 2 ukazuje, jak různé velikosti sněhových zrn (r) ovlivňují odrazivost sněhu (Fierz et. al., 2009).



Obr. 2: Velikosti sněhových zrn v závislosti odrazivosti na vlnové délce (Dietz et al., 2011).

Pro výpočet pórovitosti se dá použít následující vzorec:

$$\phi = \frac{V_w + V_a}{V_s} \quad (5)$$

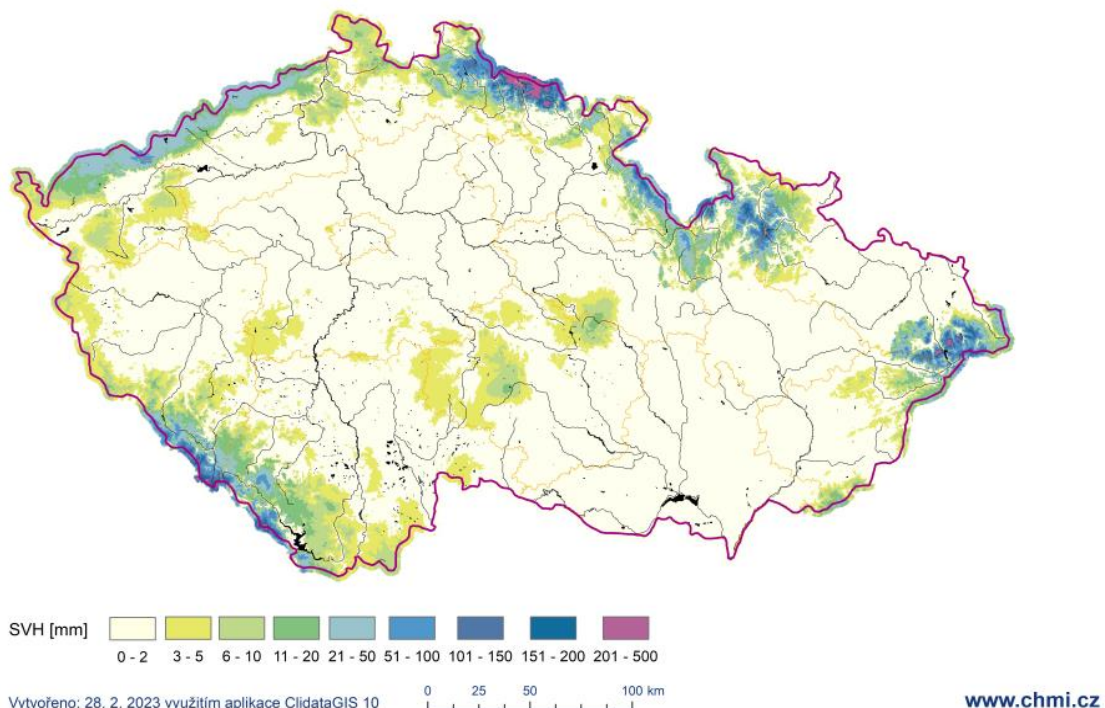
Kde V_w udává objem vody, V_a objem vzduchu a V_s celkový objem sněhu. Pórovitost sněhu vyjadřuje poměr objemu vzduchu, který je uzavřen v určitém typu sněhu, k celkovému objemu tohoto sněhu (Rees, 2006).

4. Možnosti monitorování sněhové pokrývky

Tato kapitola se věnuje možnostem sledování a měření sněhové pokrývky. Zabírá se metodami pozemního sběru dat a distančního měření. Zaměřuje se převážně na dálkový průzkum země, monitorující sněhovou pokrývku. Dále popisuje vybrané družicové systémy a instituce zabývající se mapováním sněhu.

4.1 Pozemní – staniční a terénní měření

V České republice se pozemním měřením v oblasti hydrometeorologie zabývá Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) a stanice Povodí a.s. Denně v 7:00 hodin probíhá měření výšky nového sněhu a celkové výšky sněhové pokrývky na více než 800 srážkoměrných a klimatických stanicích. Jednou týdně v pondělí ráno jsou na těchto stanicích prováděna také měření vodní hodnoty sněhu a následně se vypočítává jeho hustota. (ČHMÚ, 2022). Aktuální a dostupné informace o sněhové pokrývce a její vodní hodnotě jsou veřejně k dispozici pro každého na stránkách Českého hydrometeorologického ústavu (<https://www.chmi.cz>). K nahlédnutí jsou jednotlivá měření ze všech stanic či nejrůznější grafy a mapy. Obrázek č. 3 ukazuje vodní hodnotu sněhu pro území ČR k datu 27. 2. 2023.



Obr. 3: Mapa ČR k datu 27. 2. 2023 zobrazující vodní hodnotu sněhu (ČHMÚ, 2022).

Na území ČR se nadále budují nové automatické sněhoměrné stanice a pokrývá se stále více míst ke zpřesnění měření sněhové pokrývky. Kupříkladu od roku 2017, kdy ČHMÚ ve své správě evidovalo 20 automatických stanic – 16 sněhových polštářů (od roku 2007) a 4 stanice na měření SCE (výšky sněhu), začátkem roku 2022 uvádí, že v rámci projektu automatizace stanic, který probíhal ve dvou etapách v období 2017 až 2021, kde se přidávali čidla na základní klimatologické sítě a automatizované



Obr. 4: ASNS SCE na Šumavě (ČHMÚ, 2022).

srážkoměrné stanice, které umožňují měřit výšku sněhu, proběhl rozvoj sítě automatizovaných sněhoměrných stanic (ASNS). Při tomto projektu se vybudovalo více nežli 40 samostatně stojících stanic, měřící pouze výšku sněhu (ASNS SCE). Dnes ČHMÚ provozuje 65 plně automatických sněhoměrných stanic (ČHMÚ, 2022).

Jelikož staniční měření se provádí pouze v daném místě, ve kterém se stanice nachází, probíhá také v nepravidelných intervalech doplňkové expediční měření pomocí tzv. profilů. Tyto měrné profily, které bývají obvykle dlouhé kolem 100 m, se nacházejí v různých expozičních svahu a různých typech krajiny, jak na otevřených plochách, tak i v lesích, ale ve stejné nadmořské výšce (ČHMÚ, 2022). Tím se hydrologové pokouší zachytit a zprůměrovat skutečný stav sněhové pokrývky. Měření tohoto druhu je velmi náročné jak z časového hlediska, tak z hlediska fyzické námahy, proto se provádí v nepravidelných intervalech a pouze jako doplňkové či kalibrační měření.

Pro modelování odtoku ze sněhové pokrývky jsou klíčovými vstupními parametry celková výška sněhu a jeho vodní hodnota. K základnímu měření výšky sněhové pokrývky lze využít sněhoměrnou lať, která se umístí do sněhu vertikálně a s přesností na centimetry se odečte hodnota na stupnici či pro měření nově napadlého sněhu lze využít sněhoměrného prkénka. To se čistě umístí na starší vrstvu sněhu, pozorujeme

nárůst sněhové pokrývky od posledního data sněžení. Pro reprezentativní výsledek se používá více prkének naráz a jsou umístovány v závětrí. SWE se následně vypočte z výšky sněhu a známé hustotě. Ta se určí pomocí sněhoměrného válce, což je 1 až 2 metry dlouhý válec, vyrobený z plastu či laminátu a je zakončen na spodní straně kovovým ozubením, pro lepší prostup tvrdým sněhem (Křístek et al., 2011). Při měření nejdříve odečteme výšku sněhu napřímo z válce, na kterém je stupnice v centimetrech. Sníh ve válci se upěchuje a pomocí této komprese lze válec vytáhnout ze sněhové pokrývky i se sněhem a následně jej zvážit závěsnou digitální váhou. Ze zjištěné hmotnosti a výšky sněhové pokrývky lze vypočíst hustotu sněhu za pomoci vzorce č. 1 a následně dopočíst SWE ze vzorce č. 3.

V Severní Americe se využívá automatizovaných meteorologických stanic SNOTEL (Snow Telemetry) což je automatizovaný systém pro sběr a přenos dat o sněhových podmínkách. Systém je provozován americkou federální agenturou NRCS (Natural Resources Conservation Service) a zahrnuje více než 800 stanic rozptýlených v horách Severní Ameriky. Každá stanice sbírá informace o sněhové výšce, hustotě, teplotě, srážkách a vlhkost vzduchu, a tyto informace jsou pak přenášeny v reálném čase do centrálního datového skladu, kde jsou zpracovávány a umožňují přesné monitorování stavu sněhu v horských oblastech a lepší předpovědi povodní. SNOTEL je důležitým nástrojem pro sledování sněhových podmínek v horách a pomáhá předpovídat povodně a zásoby vody pro zemědělské a průmyslové účely (Engel et al., 2022).



Obr. 5: Sněhoměrná váha (Sommer, 2016).



Obr. 6: Sněhoměrný polštář (ČHMÚ, 2022).

4.1.1 Sněhoměrný polštář

Dnes se více využívá řada automatizovaných procesů. Zjednodušení a zpřesnění metod se dostává i do řad přístrojů měřící údaje sněhu. Pro měření SWE se využívá tzv. sněhoměrný polštář. Což je přístroj mající čtvercoví nebo kruhovitý tvar a je vestavěný v zemi. Jedná se o jakýsi gumový polštář, z vyztužené gumy či plastu, naplněný nemrznoucí kapalinou, díky níž na principu hydrostatického tlaku, který vytváří akumulovaný sníh na povrchu polštáře, vypočítává SWE. Aby nedocházelo k chybnému měření musí být sněhoměrný polštář instalován do roviny (Němec, 2006). Rozměry přístroje se mohou lišit v závislosti na výrobcích, standardně se jedná o plochu o rozměru až 9 m² a výšky do 15. cm (Egli et al., 2009). V České republice je v provozu 17 sněhoměrných polštářů, které spravuje ČHMÚ. První zkušební stanice byla postavena v roce 1996 v experimentálním povodí v Jizerských horách.

Měřené meteorologické prvky těmito stanicemi jsou:

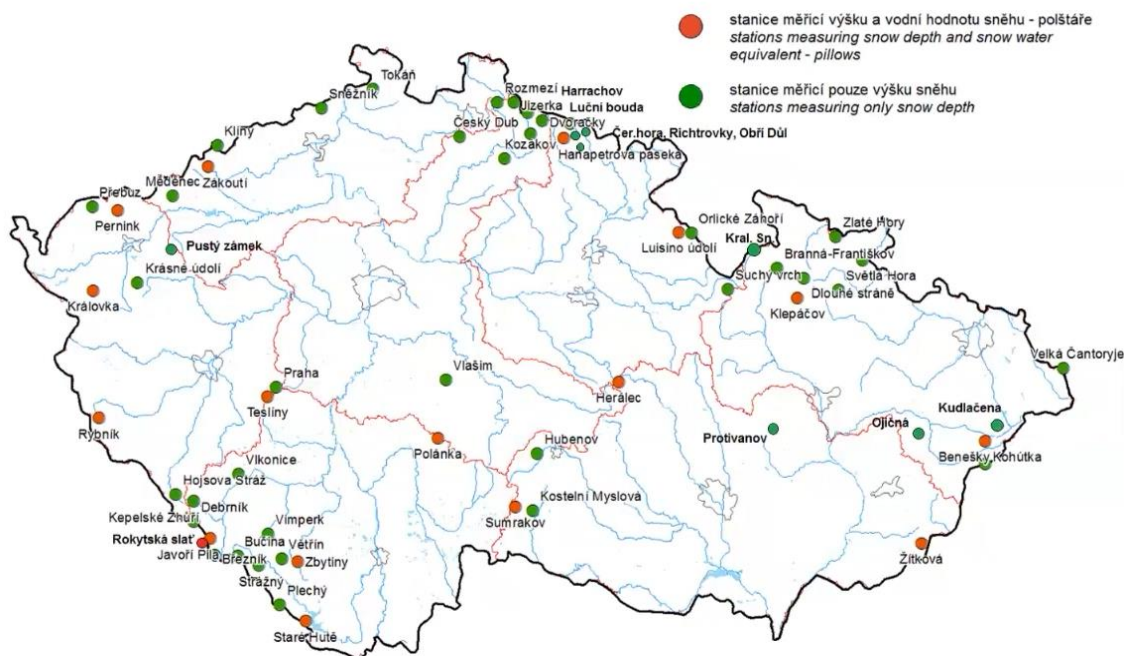
- vodní hodnota sněhu – SVH v mm
- výška sněhu – SCE v cm
- teplota vzduchu ve °C
- relativní vlhkost v %

a doplňkové měřené meteorologické prvky jako směr a rychlost a směr větru v m/s; stupních, srážky v mm a odtok ze sněhu v mm (ČHMÚ, 2022).

Dále se v ČR využívají samostatně stojící ASNS SCE (automatické sněhoměrné stanice) pro zjišťování výšky sněhu. Tyto stanice používají ultrazvuková čidla pro měření výšky sněhové pokrývky, dokážou také zaznamenávat teplotu vzduchu a relativní vlhkost. Výhody ASNS jsou v bez základové montáži stanice, umožňující případné přemístění, také jsou volně stojí v terénu a vhodně doplňují měřické sítě viz v detailu obrázek č. 7. Velká další výhoda je v bezúdržbovém provozu po dobu minimálně 5. let za použití baterií a solární technologie. K roku 2022 ČHMÚ eviduje v provozu 48 samostatně stojících automatických sněhoměrných stanic, které vysílají

online a aktualizují svůj stav každých 10 minut, stejně tak jako sněhoměrné polštáře (ČHMÚ, 2022).

Stav sítě ASNS v roce 2021



Obr. 7: Rozmístění ASNS k roku 2021 (ČHMÚ, 2022).

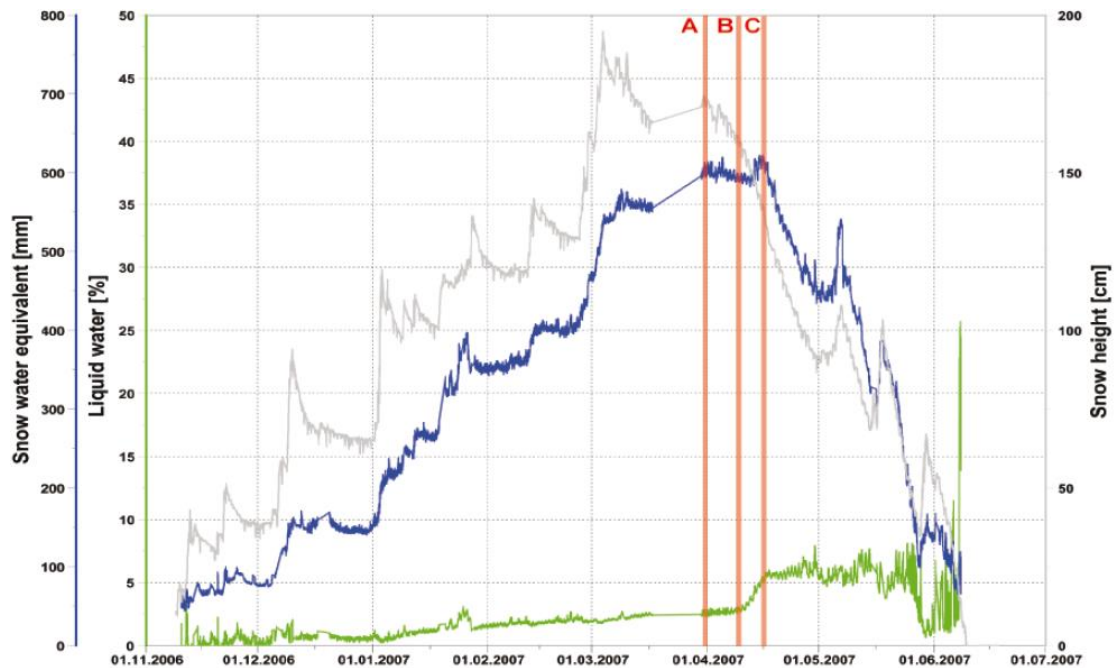
4.1.2 Sněhoměrná váha

Další systém pro měření SWE jsou sněhoměrné váhy, které zjišťují hmotnost sněhové pokrývky na přímo. Sněhové váhy jsou složeny z kovové konstrukce, pod níž jsou přesná váhová čidla. Celá konstrukce je na stejné úrovni jako okolní terén. Oproti sněhoměrným polštářům mají výhodu v tom, že neexistuje riziko úniku nemrznoucí kapaliny, a tím způsobené chemické znečištění prostředí. Povrch vah bývá perforován, aby umožnil průsak (Němec, 2006). Egli et al. (2009) udává, že může docházet k nepřesnostem v měření a chybovosti přístroje podobně jako u sněhoměrných polštářů z důvodu teplotních rozdílů povrchů.

4.1.3 Snowpack analyser (SPA)

Jeden z nejmodernějších používaných zařízení k získávání SWE a výšky sněhové pokrývky je Snowpack analyser dále jako SPA. Tento typ senzoru pracuje na metodě elektrické impedance sněhu. Sníh se skládá ze tří složek: ledu, vodní páry a vzduchu. Při použití různých frekvencí měření, tyto složky vykazují různé dielektrické konstanty. Měření komplexní impedance podél plochého pásu pomocí senzoru SPA na dvou různých frekvencích umožňuje určení objemového obsahu jednotlivých komponentů (Strum et al., 2010).

Systém SPA poskytuje údaje s vysokým rozlišením o parametrech jako je výška sněhu, SWE, hustota sněhu a LWC sněhové pokrývky. Podle Sommera (2016) je nejzajímavější období roku na jaře, kdy začíná tání sněhu. Na obrázku č. 8 je zpočátku vidět patrný pokles výšky sněhu (šedá čára, A), po níž následuje vzestup kapalné vody (zelená čára, B). O několik dní později také hodnota vodního ekvivalentu (modrá čára, C), která označuje bod nasycení. Ve sněhové pokrývce již nelze skladovat žádnou vodu a nastává odtok.



Obr. 8: Měření hodnot systému SPA v období od listopadu do července (Sommer, 2016).

4.2 Distanční měření

Možným řešením a doplněním pozemních měření mohou být právě informace a data z družic a z dálkového průzkumu Země. Bohužel se zatím v České republice nepracuje s těmito typy dat, a měření je založeno pouze na bodovém uspořádání staničních měření (ČHMÚ, 2022).

4.2.1 Mapování sněhové pokrývky za použití DPZ

Historicky byl monitoring sněhové pokrývky prováděn převážně ručně nebo s použitím jednoduchých nástrojů, jako jsou sněhoměrné nádoby, latě apod. V posledních desetiletích však byly vyvinuty a zdokonaleny nové technologie, jako jsou satelitní snímky, radary a lidary, které umožňují rychlejší a přesnější sběr dat o sněhové pokrývce (Rees, 2006).

Dálkový průzkum Země (DPZ) je proces, při kterém jsou získávány informace o Zemi z dálky pomocí satelitů, letadel, dronů a dalších technologií. Tyto informace jsou získávány pomocí různých senzorů, které mohou zachytit a analyzovat data o povrchu Země, atmosféře, oceánech a dalších prostředích (Quelle et Richter, 2019). Tato práce je zaměřena zejména na data a informace, které jsou získávány prostřednictvím různých satelitů a družicových snímků a jsou zaměřeny na monitoring sněhové pokrývky.

Dálkový průzkum Země je také klíčovým nástrojem pro mnoho vědeckých výzkumů, jako je např. výzkum vesmíru a vesmírných objektů, zkoumání geologických procesů a sledování migrace zvířat. Díky dálkovému průzkumu Země jsou vědci schopni získávat přesné a detailní informace o Zemi z dálky, což je klíčové pro pochopení a řešení globálních problémů, jako jsou klimatické změny. (Hall et al., 2005).

Sharma et Pandey (2018) uvádějí, že sněhový pokryv je důležitým faktorem v hydrologii, meteorologii, klimatologii a životním prostředí. V posledních desetiletích se používají různé senzory na palubách družic a letadel k získání dat o sněhové pokrývce. Tyto senzory poskytují informace o rozsahu sněhu, jeho hloubce, hustotě, teplotě a vlhkosti. Získaná data se používají k odhadu SWE, předpovědi

povodní, monitorování změn klimatu a jako vstupní parametry do hydrologických modelů.

Dozier (2009) ve svém článku zmiňuje, že pomocí DPZ lze získávat informace o vlastnostech sněhu, jako je množství, hloubka a pokrytí, v oblastech, kde je sněhová pokrývka velmi rozsáhlá a těžko přístupná. K tomu se využívají satelitní snímky a radarové systémy, které dokážou prostorově a časově sledovat změny v pokrytí sněhem.

Podle Sharmy a Pandeyho (2018) jsou k dispozici různé metody pro mapování sněhu pomocí dálkového průzkumu Země, jako jsou optické, mikrovlnné a termální senzory. Optické senzory jsou citlivé na viditelné a blízké infračervené spektrum a poskytují informace o sněhovém pokryvu v závislosti na jeho vlastnostech. Mikrovlnné senzory jsou vhodné pro měření tloušťky a vlhkosti sněhu, zatímco termální senzory jsou citlivé na teplotní změny a umožňují odhadovat rychlost tání sněhu.

4.2.2 Historie monitoringu sněhové pokrývky

Historie dálkového průzkumu Země sahá až do druhé poloviny 19. století, kdy se začaly používat balóny a vzducholodě pro fotografické záznamy z výšky. V průběhu 20. století se dálkový průzkum Země stával stále více sofistikovaným a přesným, a to díky pokroku v oblasti technologií a senzorů. Dnes je DPZ klíčovou součástí mnoha oblastí, včetně meteorologie, geologie, vodohospodářství, lesnictví, zemědělství a mnoha dalších (Bulygina et al., 2011).

V 60. letech minulého století začala americká státní organizace ESSA (později přejmenovaná na NOAA) používat optická data z družice TIROS-1 k mapování sněhové pokrývky. Tato data byla získávána z viditelné a infračervené části elektromagnetického spektra a umožňovala stanovit sněhovou linii a sledovat vliv teploty a srážek na sněhové podmínky. Od roku 1966 vytváří NOAA týdenní mapy sněhové pokrývky na severní polokouli s vysokým prostorovým rozlišením. Po uvedení družice Landsat-1 v roce 1972, která nesla optický multispektrální radiometr MSS s rozlišením 80 m, bylo možné detailně mapovat sněhovou pokrývku

ve specifickém povodí. Novější generace družic Landsat s přístroji TM a ETM+ dosahují prostorového rozlišení až 30 m, v panchromatickém pásmu dokonce až 15 m, což umožňuje ještě podrobnější mapování sněhu (Frei et al., 2012; Špatová, 2010)

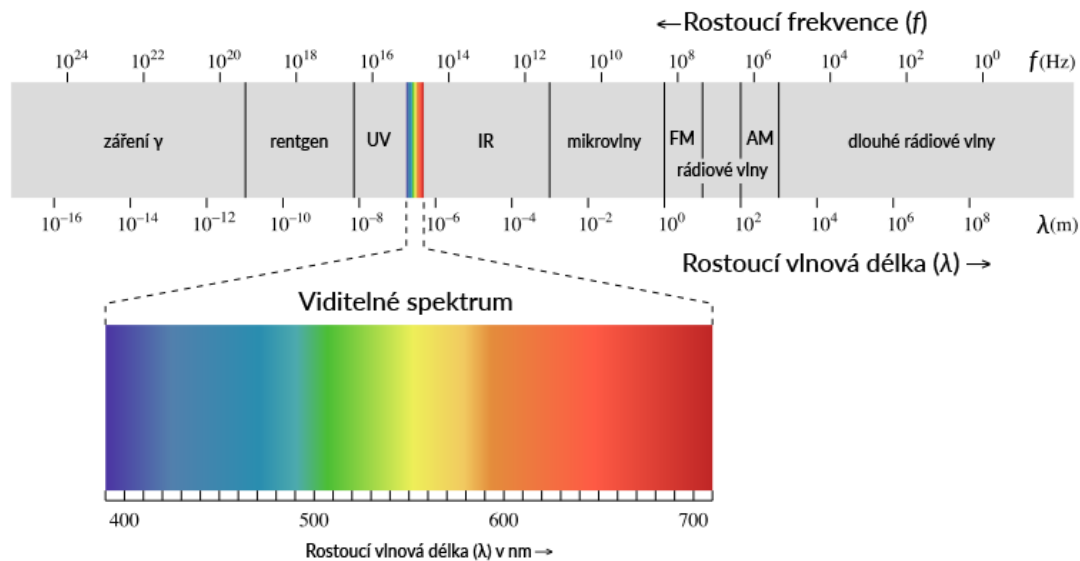
V roce 1999 byla vyslána družice Terra, s pokročilým spektrálním radiometrem MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer). Tento přístroj poskytuje informace, které jsou přímým zdrojem pro vytváření sněhových map s rozlišení od 250 m. Sněhový produkt se obnovuje s denní či týdenní frekvencí. Podobné vybavení nese i družice Aqua, která byla vypuštěna o 5 let později, v roce 2004. (Frei et al., 2012; Špatová, 2010)

Od 70. let 20. století se začalo s mapováním v oblasti mikrovlnného spektra. Tato oblast elektromagnetického spektra je vhodná pro určování sněhové pokrývky, její vlhkosti a SWE. První takto využívaná družice Nimbus-7, která nesla radiometr SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometr), byla vypuštěna v roce 1978. Přístroj se dočkal modernizace v roce 2002, kdy vynesena na oběžnou dráhu satelitem ADEOS-II (Kawanishi et al., 2003).

Další možností je použití radiometru se syntetickou aperturou (SAR), který je užitečným nástrojem pro mapování sněhové pokrývky. Tento druh technologie byl vyvinut v 50. letech 20. století a od té doby byl používán převážně pro vojenské účely. Nicméně, od 80. let 20. století se SAR stal dostupný i pro veřejnou sféru. SAR je schopen poskytnout informace o množství sněhu na povrchu, včetně vodního ekvivalentu sněhu a hustoty sněhu a je schopen pracovat za jakýkoliv podmínek, jako jsou mračka, tma či silný vítr, a to i za vysokého rozlišení (Hall et al., 2005).

4.2.3 Monitoring v oblasti elektromagnetického spektra

Elektromagnetické spektrum je rozsáhlá oblast různých typů elektromagnetického záření, které se odlišují vlnovou délkou, frekvencí a energií. Pro mapování sněhové pokrývky se využívají různé části elektromagnetického spektra, zejména v oblasti viditelného světla, infračerveného záření a mikrovln. Jednotlivé vlastnosti sněhové pokrývky jsou sledovány pomocí různých částí elektromagnetického spektra.



Obr. 9: Elektromagnetické spektrum (Light, 2023).

Optická část spektra

Spektrální chování sněhu ve viditelné části spektra (VIS) se vyznačuje tím, že sníh vypadá bíle, protože odráží všechny viditelné vlnové délky světla rovnoměrně a není absorbováno. Nicméně, pokud by byl sníh pozorován pod mikroskopem, je patrné, že sněhové krystaly mají různé tvary a velikosti. To má za následek rozdílné spektrální vlastnosti pro různé vlnové délky světla, což může být pozorováno jako lehké odstíny modré a fialové barvy na okrajích sněhových polí (Dozier et Painter, 2004).

Družicové snímky sněhové pokrývky mají různé vlastnosti v závislosti na použitém senzoru a vlnové délce. Sněhové pokrývky mají vysoké albedo, což znamená, že odrážejí většinu světla, a proto se na snímcích objevují jako světlé oblasti. Avšak přítomnost oblačnosti nebo různých stínů mohou mít vliv na odrazivost sněhu a způsobovat, že se sníh jeví tmavší, což může být problematické při detekci sněhu na snímcích.

Elektromagnetické charakteristiky sněhu v optické části spektra se odlišují v závislosti na stavu sněhového povrchu. Pokud je sníh čerstvý a nezakalený, má vysokou propustnost světla a nízkou absorpci. Na druhé straně, pokud je sněhový povrch zakalený nebo jinak poškozený, může být více absorbuje a méně propustný.

Navíc, pokud sníh taje nebo je mokrý, může se stát ještě více absorbujícím a méně propustným (Dozier et Painter, 2004).

Při stárnutí sněhové pokrývky, může docházet k výskytu různých nečistot, což snižuje její odrazivost. Čerstvý sníh má obvykle albedo vyšší než 90 %, ale po určité době stárnutí klesne na 40 % a pro velmi znečištěný sníh dokonce až pod 20 %. I když kapalná voda ve sněhu nemá výrazný vliv na odrazivost, má nepřímý dopad na optické vlastnosti. To je způsobeno tím, že kapalná voda podporuje shlukování ledových krystalů, což zase vede k větší drsnosti povrchu sněhu, a tedy ke snížení jeho odrazivosti. Voda absorbuje elektromagnetické záření podobně jako led pro viditelnou a blízkou infračervenou část spektra (Seidel et Martinec, 2004).

Odrazivost sněhu se v jednotlivých částech viditelného spektra odlišuje. V oblasti krátkovlnného modrého světla má sníh vysokou odrazivost, která se postupně snižuje při přechodu ke středně dlouhým zeleným vlnovým délkám a následně k delším červeným vlnovým délkám (Gardner et Sharp, 2010).

Nejlepší odrazivost sněhu je tedy v oblasti krátkovlnného modrého světla. Tato oblast se nachází přibližně v rozmezí vlnových délek 400-500 nm. Proto se pro monitorování sněhového pokryvu nejčastěji využívají optické snímky získávané pomocí družic, které pracují právě v této oblasti spektra. Viditelné vlnové délky jsou silně rozptýleny atmosférou a mohou být snímány pouze během dne, kdy je dostatek slunečního záření. Přesto se však téměř všechny běžné metody získávání obrazových dat zaměřují na tuto oblast spektra. V této oblasti spektra se nejčastěji používají snímače s vysokým rozlišením, jako například multispektrální snímače s rozlišením až několika metrů na pixel. Tyto snímače umožňují přesné mapování sněhového pokryvu a sledování jeho vývoje v čase. Více rozvedeno v kapitole 4.2.7.

Infračervená část spektra

Spektrální vlastnosti sněhu v infračervené části spektra jsou důležité pro jeho monitorování a analýzu. Infračervené záření (IR) může proniknout sněhem a odhalit různé vlastnosti, jako například teplotu a vlhkost či stáří sněhu.

Spektrální chování sněhu v IR části spektra se odlišuje od jeho chování ve VIS části spektra. Snížená odrazivost sněhu v infračervené oblasti je dána tím, že sníh absorbuje část infračerveného záření a tím se zahřívá. Sníh s vyšší vlhkostí má vyšší absorpci, a tedy vyšší teplotu v porovnání se suchým sněhem (Singh et Singh, 2001).

Vlastnosti sněhu na družicových snímcích jsou založeny na detekci IR, které proniká skrze sníh a zachycuje teplotní rozdíly. Z družicových snímcích lze získat informace o množství sněhu, jeho vlhkosti, teplotě a dalších vlastnostech.

Elektromagnetická charakteristika sněhu v infračerveném pásmu je ovlivněna jeho teplotou a vlhkostí. Suchý sníh má vyšší odrazivost v infračervené oblasti, ale sníh s vysokou vlhkostí, a tedy vyšší teplotou má nižší odrazivost. IR může proniknout do sněhu a být absorbováno jeho vrstvami, což umožňuje určovat jeho teplotu a další charakteristiky (Seidel et Martinec, 2004).

Dozier et Painter (2004) ve své publikaci uvádějí, že v infračervené části spektra lze snadno rozeznat přítomnost sněhové pokrývky díky nižší teplotě sněhu v porovnání s okolním povrchem. Dále lze v této části spektra snadno určit velikost sněhových zrn, což je indikátor stáří sněhu. Avšak, i v infračervené oblasti spektra může být oblačnost problémem, jelikož absorbuje a odráží IR záření, což ztěžuje monitorování zemského povrchu pod ní. (Dozier et Painter, 2004).

Mikrovlnná část spektra

Snímkování mikrovlnnými senzory je další možností pro získávání informací o sněhové pokrývce. Podle Snehmani et al. (2015) jsou v mikrovlnné části spektra spektrální vlastnosti sněhu závislé na jeho vlhkosti, teplotě a velikosti zrn. Mikrovlnné senzory dokážou pronikat hlouběji do sněhu a odhalit tak vlastnosti, které nejsou viditelné v optických senzorech.

Elektromagnetická charakteristika sněhu v mikrovlnném pásmu je ovlivněna různými faktory, jako jsou dielektrické vlastnosti, ztrátový faktor a odrazivost. V mokrém sněhu jsou vlastnosti značně odlišné od suchého sněhu. Na družicových snímcích se sněhová pokrývka jeví jako homogenní oblast s nízkou intenzitou signálu (Snehmani et al., 2015).

Mikrovlenná spektroskopie sněhu je stále v oblasti výzkumu a má mnoho využití při sledování sněhových podmínek v různých klimatických oblastech. Mikrovlenné vlny pronikají do sněhu a interagují s jeho vlastnostmi, což umožňuje měřit různé parametry sněhu, jako jsou množství vody, hustota, textura, stáří a další.

Existuje několik technik mikrovlenné spektroskopie, které se používají k měření sněhu. Jednou z nich je radarová technologie, která využívá odrazu signálu mikrovlenné od sněhového povrchu. Tato metoda se používá k měření výšky sněhové pokrývky a objemu sněhu (Kawanishi et al., 2003).

Další technikou je pasivní mikrovlenná spektroskopie, která využívá emise mikrovlenné z povrchu sněhu. Tato metoda stanovuje množství vody ve sněhové pokrývce, což umožňuje odhadnout množství tekuté vody v oblastech, kde je důležitý hydrologický cyklus (Snehmani et al., 2015).

Vlastnosti sněhu na družicových snímcích jsou významné pro mnoho aplikací, včetně předpovědi počasí a sledování klimatických změn. Družice jsou schopny poskytovat informace o sněhových podmínkách v širším měřítku a často se používají k vytváření sněhových map.

Elektromagnetická charakteristika sněhu v mikrovlenném pásmu zahrnuje dielektrické vlastnosti a rozptyl mikrovlenné. Tyto vlastnosti jsou závislé na mnoha faktorech, jako je vlhkost, teplota a struktura sněhu. Tyto vlastnosti jsou důležité pro výpočty sněhových parametrů získaných z mikrovlenných měření (Singh et Singh, 2001).

Výhodou mikrovlenného záření je, že může snadno pronikat atmosférou, a to i přes oblačnost, což umožňuje jeho využití v oblasti sledování sněhové pokrývky za špatné viditelnosti i v noci. Kromě toho se oblačnost při použití mikrovlenné spektroskopie nestává překážkou, jelikož oblaka vyzařují pouze malé množství mikrovlenného záření ve srovnání se zemským povrchem. Díky této vlastnosti mohou družice sledovat intenzitu mikrovlenného záření za velké oblačnosti i v noci, což umožňuje získávání dat o sněhové pokrývce na pravidelné bázi (Frei et al., 2012).

Tab. 4: Porovnání částí elektromagnetického spektra v závislosti na vlastnostech sněhové pokrývky (Singh et Singh, 2001).

vlastnosti sněhové pokrývky	část elektromagnetického spektra		
	viditelné	infračervené	mikrovlnné
rozsah	ano	ano	ano
SWE	částečně detekovatelná	špatně detekovatelná	částečně detekovatelná
hloubka	částečně detekovatelná	špatně detekovatelná	částečně detekovatelná
odrazivost	ano	ne	ne
množství vody	špatně detekovatelná	špatně detekovatelná	ano
teplota	ne	ano	špatně detekovatelná

4.2.4 Problematické aspekty ovlivňující monitoring sněhové pokrývky

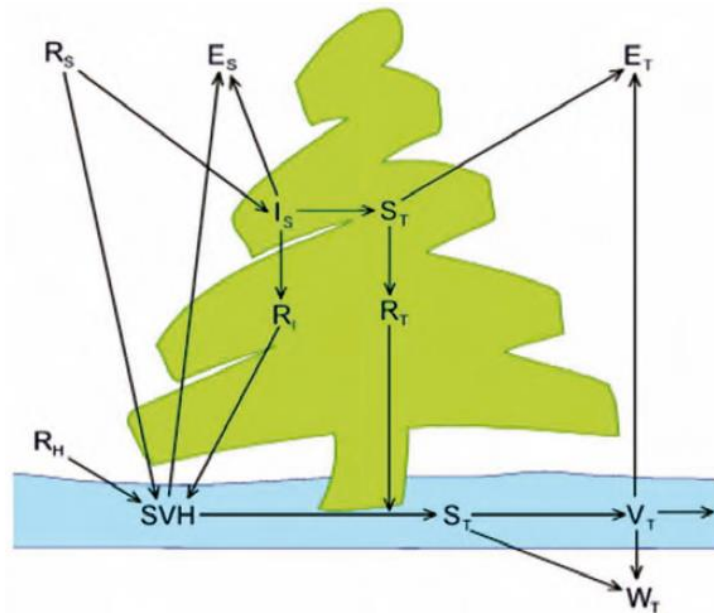
Detekce sněhové pokrývky je ovlivněna řadou faktorů, které komplikují identifikaci sněhu na družicových snímcích, z nichž některé jsou vypsány níže.

Oblačnost

Přítomnost mraků je značná komplikace při DPZ (dálkový průzkum Země). Mraky mohou blokovat sluneční záření a ztížit detekci sněhové pokrývky z družicových dat. Problematická jsou zejména řasovitá oblaka, která se skládají z ledových krystalů. U družicových snímků pořízených z oblasti viditelného spektra elektromagnetického záření se často nedokáže zcela rozlišit oblačnost od sněhové pokrývky, protože oba typy povrchů mají v této oblasti vysokou odrazivost. Toto rozlišení je často velmi obtížné a představuje významný problém při interpretaci družicových snímků. Nicméně, použití krátkovlnného infračerveného záření s vlnovou délkou okolo 1,6 μm může pomoci rozlišit sněhovou pokrývkou od oblačnosti. Při použití této vlnové délky se oblačnost zobrazuje jako světlá, na rozdíl od sněhové pokrývky, která se jeví jako tmavá, což umožňuje jejich rozlišení (Rees, 2006; Křístek et al., 2011).

Lesní vegetace

Vegetace je významným faktorem ovlivňujícím sněhovou pokrývku. Tento vliv je patrný nejen v bezprostřední blízkosti vegetačního krytu, ale také v okolí vysoké vegetace, jako je například lesní porost. Zalesněné oblasti, které mohou obsahovat jak listnaté, tak jehličnaté stromy, mají obecně nižší odrazivost než nezalesněné oblasti, a to i v případě, že se pod stromy nachází velké množství sněhu. Dochází totiž k zákrytu a nerovnoměrnému pokryvu sněhové pokrývky, v důsledku rozsáhlých korun stromů, které ji zakrývají. Vegetace může představovat překážku pro vzdušné proudění, což se projevuje jak na návětrné, tak i na závětrné straně. Navíc může vegetace sloužit jako činitel zastínění. Obrázek č. 10 popisuje modifikovanou rovnici vodní bilance, díky které se dá odhadnout přímý vliv vegetačního krytu na sněhovou pokrývku (Křístek et al., 2011).



Obr. 10: Bilanční schéma vody ve sněhové pokrývce (Křístek et al., 2011).

Kde R_s udává úhrnné sněhové srážky, E_s sublimaci sněhu, E_T výpar vody, I_s sněh zadržovaný, S_T vodu z tání sněhu, R_I odpad sněhu z nadzemní vegetace, R_T okap vody z tání na povrchu vegetace, R_H desublimaci vodních par, S_{VH} vodní hodnotu sněhu, V_T odtok a W_T vsak.

Denní doba

Proměnlivost parametrů sněhové pokrývky je závislá na různých meteorologických faktorech, jako jsou srážky, teplota, vlhkost vzduchu, typ proudění, teplota rosného bodu a sluneční záření. Tyto faktory ovlivňují sněhovou pokrývku v průběhu času a staří sněhu. V případě nepříznivého počasí, například vlivem intenzivních srážek nebo vysokých teplot, může dojít k výrazným změnám sněhové pokrývky během několika hodin (Němec, 2006). Při sledování sněhové pokrývky je nejčastěji využíváno viditelné a infračervené záření. Tento postup však neumožňuje sledování sněhu v nočních hodinách, což představuje problém zejména při monitorování polárních oblastí (Rees, 2006). Ačkoliv družice snímají zemský povrch i během noci, potřebné informace a data se získávají hlavně během dne, z důvodu závislosti na dopadajícím a odraženém slunečním záření (Křístek et al., 2011).

4.2.5 Indexy používané k detekování sněhové pokrývky

Sněhové indexy jsou matematické operace, které se provádí s hodnotami digitálních čísel mezi dvěma nebo více pásmy. Tyto indexy jsou využívány pro detekci a mapování sněhové pokrývky pomocí satelitních dat a využívají rozdílných vlastností záření odraženého od sněhu a ostatních materiálů v různých částech elektromagnetického spektra, a pro jejich zvýraznění. V této části jsou uvedeny indexy, které lze využít pro detekci sněhové pokrývky. Při interpretaci takto upravených snímků, se využívá znalosti toho, že světlejší pixely na snímku znamenají vyšší koncentraci sněhu a lze tak lépe určit rozsah sněhové pokrývky (Akyürek et Sözen, 2021).

NDSI

Index normalizovaného rozdílu sněhu (NDSI) je nejpoužívanější spektrální index, který se používá k identifikaci sněhové pokrývky na základě rozdílné absorpce a odrazu elektromagnetického záření sněhem a okolní krajinou. NDSI kombinuje data ze dvou optických pásem, zeleného a blízkého infračerveného pásma, a vypočítá se jako poměr rozdílu intenzity světla mezi těmito dvěma pásmy a součtu intenzity. NDSI index lze vypočítat dle následujícího vzorce:

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} \quad (5)$$

kde Green a SWIR jsou reflektance v zeleném a blízkém infračerveném pásu. Hodnoty těchto pásem jsou normalizovány na rozmezí od 0 do 1, aby se minimalizovaly vlivy jako je orientace slunečního světla nebo atmosférický šum. Přičemž pixely s přítomností sněhové pokrývky mají hodnotu NDSI větší nebo rovnu 0,4. Pokud pixel dosahuje hodnoty rovnající se 0,4, znamená to, že alespoň 50 % plochy pixelu je pokryto sněhem (Hall et al., 1995; Lyu et. al, 2020).

NDSI index byl vyvinut pro detekci sněhu na satelitních snímcích, přičemž se využívají především satelity Landsat, MODIS a Sentinel-2. Jedním z hlavních výhod NDSI indexu je jeho schopnost rozlišit mezi sněhovou pokrývkou a mraky, což zajišťuje vysokou úspěšnost detekce sněhu (Hall et al., 1995).

S3 index

Tento index využívá dat získaných ze satelitů Landsat, Sentinel a MODIS. S3 index kombinuje data ze tří různých vlnových délek elektromagnetického spektra, konkrétně ze zeleného a dvou blízkých infračervených pásem. Tyto pásmové kombinace umožňují S3 indexu detekovat a mapovat sněhovou pokrývku na základě rozdílné absorpce a odrazu elektromagnetického záření sněhem a okolní krajinou. S3 index se vypočítá jako rozdíl normalizovaných hodnot zeleného a infračervených pásem, vynásobený normalizovanou hodnotou jednoho z infračervených pásem:

$$S3 = SWIR1 - Green \cdot \frac{1}{SWIR1} \quad (6)$$

kde SWIR1 a Green jsou reflektance v blízkém infračerveném a zeleném pásu, normalizované tak, aby se pohybovaly v rozmezí 0 až 1 (Hall et al., 1995).

Výhodou S3 indexu je jeho schopnost detekovat sněhovou pokrývku i v oblastech s částečným zastíněním, kdy jsou v základních optických pásmech sněhové pixely zamaskovány okolní krajinou. S3 index také umožňuje mapovat sních i v oblastech s různou nadmořskou výškou a teplotními podmínkami, což jej činí užitečným pro monitoring sněhu v horských oblastech (Zhang et al., 2021).

NDFSÍ

Normalized Difference Forest Snow Index (NDFSÍ) je spektrální index využívaný pro detekci sněhu v lesnatých oblastech. NDFSÍ byl vyvinut jako modifikace standardního NDSI (Normalized Difference Snow Index) pro zlepšení detekce sněhu v lesnatých oblastech, kde dochází k překryvu sněhu s vegetací. Index umožňuje rozlišit sněž a vegetaci, což zvyšuje úspěšnost detekce sněhu v porovnání s ostatními spektrálními indexy (Lyu et. al, 2020).

Pro výpočet hodnoty NDFSÍ jsou potřeba hodnoty odebrané z různých vlnových délek v oblasti blízkého infračerveného spektra, konkrétně NIR (Near Infrared) a SWIR (Shortwave Infrared). Poté lze použít vzorec:

$$\text{NDFSÍ} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}} \quad (7)$$

Výsledná hodnota NDFSÍ se pohybuje v rozmezí mezi -1 a 1. Sněhová pokrývka bývá charakterizována pozitivními hodnotami NDFSÍ, zatímco lesy mají často záporné hodnoty NDFSÍ. Nicméně, pro správnou interpretaci výsledků je nutné mít k dispozici referenční hodnoty, např. z terénních měření nebo snímků s vysokým rozlišením (Lyu et. al, 2020).

Některé z dalších nejpoužívanějších sněhových indexů jsou např. Snow Cover Index (SCI), Modified Normalized Difference Snow Index (MNDIS) nebo Snow Water Equivalent Index (SWEI). SCI se používá k detekci sněhu pomocí odlišení odrazivosti v oblasti blízké infračervenému a modrému spektru. MNDIS se pak využívá k odstranění vlivu ostatních materiálů, jako jsou stíny nebo zeměpisné rysy. SWEI se zaměřuje na měření objemu vody, který by byl uvolněn při tání sněhu. Použití konkrétního sněhového indexu se odlišuje v závislosti na aplikaci a dostupných datových sadách (Akyürek et Sözen, 2021).

4.2.6 Instituce a projekty zabývající se mapováním sněhu

Existuje několik institucí, výzkumných center a organizací, které se specializují na mapování a sledování sněhové pokrývky pomocí různých metod a technologií. Hlavními oblastmi, na které se zaměřuje mapování sněhu jsou horské regiony s celoroční nebo sezónní sněhovou pokrývkou. Níže jsou uvedeny některé z těchto institucí.

National Snow and Ice Data Center (NSIDC) je organizace, která se zaměřuje na sledování, mapování a výzkum sněhu a ledu na Zemi. Zahrnuje data z mnoha družic a pozemních měření a poskytuje širokou škálu produktů a služeb, včetně mapování sněhové pokrývky. NSIDC poskytuje klíčové informace pro vědecké výzkumné projekty, management přírodních zdrojů a posuzování dopadů klimatických změn na globální úrovni. Poskytuje řadu datových produktů týkajících se sněhové pokrývky, zahrnující:

- Rozšířené údaje o sněhové pokrývce – Obsahuje informace o množství, rozloze, vodním ekvivalentu a době přetrvání sněhu v různých oblastech.
- Historické údaje o sněhové pokrývce – Obsahuje informace o množství, rozloze a dobu přetrvání sněhu v minulosti.
- Satelitní snímky sněhové pokrývky – Obsahuje satelitní snímky z různých časových období, které ukazují rozlohu a množství sněhu v různých oblastech.
- Klimatická data – Obsahuje informace o klimatických podmínkách na Zemi, včetně teplot, srážek a větru, které ovlivňují sněhovou pokrývku.

Pro sběr těchto dat NSIDC využívá různé satelitní senzory, jako jsou MODIS, AMSR-E a SMOS, které měří teploty, barvy, množství vlhkosti a další parametry sněhové pokrývky. Tyto datové produkty jsou důležité pro studium sněhové pokrývky a pro predikci klimatických podmínek v různých oblastech (Parsons et al., 2019).

Pro více informací o NSIDC a jejích aktivitách lze navštívit oficiální webové stránky na adrese www.nsidc.org (NSIDC, 2023).

Remote Sensing of Snow and Ice (RSSI) je skupina vědců z různých institucí po celém světě zabývající se využitím satelitních dat k mapování sněhové pokrývky

a sledování jejího chování v různých oblastech světa. Zabývají se také vývojem nových metod pro získávání informací o sněhu pomocí satelitních a dalších prostředků. RSSI umožňuje získávat údaje o rozložení sněhu a ledu, jeho tloušťce, teplotě a dalších parametrech, což je nezbytné pro přesné odhadování množství dostupné vody a pro predikci změn v klimatu. Podrobnější a komplexní přehled využití RSSI pro sledování sněhu a ledu se věnuje například Tedesco ve své publikaci z roku 2019.

Cryospheric Sciences Laboratory (CSL) výzkumná laboratoř, která je součástí Goddardova kosmického střediska NASA. Zaměřuje se na studium ledovců, sněhu, mořského ledu a permafrostu. Poskytuje také širokou škálu produktů a služeb, jako jsou mapy sněhové pokrývky a globální sněhové analýzy. Výzkumný tým se zaměřuje na analýzu dat získaných z kosmických a leteckých misí, aby lépe porozuměl stavu a vývoji ledových oblastí. Cílem týmu je nejen poskytnout přesné odhady o stavu kryosféry, ale také předpovídat její budoucí vývoj (CSL, 2023).

NASA's Earth Observing System (EOS) je program, který zahrnuje soubor družicových misí, které umožňují detailní sledování a měření různých faktorů ovlivňujících stav naší planety, včetně atmosféry, oceánů, kryosféry, biosféry a geosféry. EOS poskytuje velké množství dat a informací, které umožňují lepší porozumění procesům ovlivňujícím stav naší planety a klimatickým změnám (EOS, 2023).

Mapování sněhové pokrývky na Zemi je jedním z důležitých činností tohoto programu. Satelity EOS přináší informace o rozložení a množství sněhu na různých místech naší planety, což je klíčové pro sledování klimatických změn a pro řízení vodních zdrojů (King et Platnick, 2018).

Další datové produkty EOS zahrnují měření teploty oceánů, sledování mořského ledového pokryvu, měření srážek a zjišťování koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře. Tyto informace jsou důležité pro lepší porozumění stavu naší planety a pro predikci klimatických změn.

Satelity, které EOS využívá, zahrnují Terra, Aqua a Suomi NPP a další. Tyto družice jsou vybaveny různými senzory a přístroji, které umožňují měření různých

faktorů ovlivňujících stav naší planety. Terra a Aqua jsou vybaveny senzory MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer), které jsou klíčové pro sledování sněhové pokrývky a dalších aspektů kryosféry. Suomi NPP je vybaven senzory VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), umožňující sledování změn klimatu na Zemi (EOS, 2023).

National Operational Hydrologic Remote Sensing Center (NOHRSC) je instituce v rámci americké vládní agentury NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), která se zaměřuje na výzkum kryosféry a poskytuje sněhové informace v podobě interaktivních map a 3D vizualizací.

NOHRSC provozuje systém získávání dat o sněhové pokrývce, který zahrnuje měření z pozemních stanic (kterých je přes 50 000), letadel a družic. Tyto data jsou pak použity k vytvoření denních, týdenních a sezónních zpráv o sněhové pokrývce v USA, Kanadě a Aljašce. Mezi poskytované informace patří celková výška sněhu, rozsah sněhové pokrývky, vodní hodnota sněhu, sněhová hustota a další parametry či rastrová data (Carroll et al., 2001).

NOHRSC také poskytuje přístup k různým datovým produktům, včetně interaktivních map, které umožňují uživatelům vizualizovat a analyzovat sněhové podmínky v reálném čase. Tyto mapy zahrnují informace o sněhové pokrývce, SWE, teplotách sněhové pokrývky, tání sněhu a dalších meteorologických podmínkách. Interaktivní mapy a databáze jsou volně přístupny veřejnosti. (NOHRSC, 2023).

Kanada disponuje dvěma významnými organizacemi pro mapování sněhové pokrývky: **Canada Centre for Remote Sensing (CCRS)** a **Canadian Space Agency**. CCRS je součástí Natural Resources Canada a je odpovědná za vývoj a aplikace v oblasti dálkového průzkumu Země. Tato organizace poskytuje významné sněhové informace pro Kanadu, včetně údajů o sněhové pokrývce získaných pomocí satelitního průzkumu. Canadian Space Agency na druhé straně zajišťuje kanadskou účast v kosmických programech zaměřených na výzkum a využití kosmických technologií (Frei et al., 2012).

Využívají především data z Radarsat-2, což je Kanadská družice s radarovým senzorem, který umožňuje snímání ve vysokém rozlišení v různých podmínkách

počasí, včetně oblastí s velkým zasněžením. Dále spolupracují s NASA na programu Earth Observing Systém (EOS), díky nimž využívají data ze senzoru MODIS nesený družicemi Terra a Aqua (CSA, 2023).

V oblasti severní Evropy dominuje výzkumný institut **Norut** v Norsku či Institut životního prostředí **SYKE** ve Finsku. Norut využívá mnoho různých zdrojů dat, včetně optických snímků a radarových dat. Vytvíjí metody pro kombinování těchto dat, pro co nejpřesnější mapování sněhové pokrývky. SYKE využívá měření z terénu a satelitní data pro mapování sněhu a sledování jeho změn v čase. Oba instituty se také snaží vyvinout nové metody a technologie pro lepší monitorování sněhu a jeho využití pro predikci povodní, klimatických změn a jiných ekologických vlivů (SYKE, 2023; Norut Geo Viz, 2023).

Pro střední Evropu a oblast pohoří Alp dominuje **Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research (SLF)** a Evropská kosmická agentura – **European Space Agency (ESA)**.

SLF je federální výzkumný ústav ve Švýcarsku, který se specializuje na výzkum sněhu, lavin a jiných geologických rizik v horách. Poskytuje výzkumné poznatky a praktické nástroje pro prevenci před lavinami, odhad a řízení rizik, stavby ochranných prvků a plánování udržitelného rozvoje v horských oblastech. Švýcarský ústav se zaměřuje na mnoho různých oblastí výzkumu, včetně monitorování sněhu, měření sněhových vlastností, modelování sněhových procesů, predikce a řízení lavinového nebezpečí, studium klimatu v horách, výzkum hydrologických cyklů a monitoring permafrostu (Laternser, 2002).

SLF využívá mnoho různých technologií a zařízení pro sběr dat, včetně satelitních snímků, terénních měření, radarových a lidarových systémů a simulací na počítači. Tyto informace jsou pak použity k vytváření map sněhové pokrývky a lavinových rizik, stejně jako k vývoji prediktivních modelů a rozhodovacích nástrojů pro řízení rizik v horách. Institut SLF také spolupracuje s dalšími výzkumnými ústavami v rámci Evropy a celosvětově (SLF, 2023).

European Space Agency (ESA) je evropská organizace pro výzkum vesmíru a vývoj kosmických technologií, která se také zabývá sledováním sněhu pomocí

satelitů. ESA využívá satelitní mise jako je například CryoSat-2, který umožňuje měření množství sněhu na zemském povrchu a studium změn sněhové pokrývky v čase. Dále například satelity Sentinel pro mapování sněhu a sledování jeho změn v Evropě a Arktidě. Satelit Sentinel-1 využívá radarovou technologii a poskytuje přesné a pravidelné snímky sněhové pokrývky. Satelit Sentinel-3 využívá optickou a mikrovlnnou technologii a poskytuje data o sněhu, ledovcích a oceánech. ESA také podporuje výzkum a vývoj nových technologií pro zlepšení sledování sněhu a dalších aspektů kryosféry. Kromě toho ESA spolupracuje s dalšími evropskými organizacemi a institucemi, jako je například Copernicus, který poskytuje informace o sněhové pokrývce v reálném čase prostřednictvím satelitních dat (ESA, 2023).

Copernicus je evropský program, který využívá satelitní a pozemní data k monitorování životního prostředí, klimatu a bezpečnosti. Je součástí globálního systému pozorování Země a vytváří celkový obraz o stavech životního prostředí na celé planetě. Program zahrnuje několik satelitů a sítí pozemních stanic, které poskytují data o atmosféře, mořích, zeměpisných územích a městských oblastech. Copernicus také poskytuje modely, nástroje a služby pro podporu rozhodování v oblastech jako jsou zemědělství, lesnictví, vodohospodářství a prevence přírodních katastrof (Copernicus, 2023).

Program Copernicus také monitoruje sněhovou pokrývku pomocí několika družic Sentinel. Tyto družice jsou vybaveny různými senzory, které umožňují měřit množství sněhu, jeho hloubku, rozsah sněhové pokrývky a další charakteristiky. Data z těchto družic jsou následně sbírána a analyzována v rámci programu Copernicus, který poskytuje informace o sněhové pokrývce v reálném čase. Tyto informace jsou využívány například pro předpovědi povodní, změn klimatu a jiné výzkumné účely (Thépaut et al., 2018). Uživatelé mají bezplatný a neomezený přístup ke všem poskytovaným informacím a službám, který Copernicus poskytuje.

Dalšími programy v rámci ESA jsou například **Snow cover monitoring in Alpine regions using ENVISAT optical data**, což je projekt, který využívá optická data z družice ENVISAT k monitorování sněhové pokrývky v alpských oblastech. Projekt

se zaměřuje na sledování sněhu v nadmořské výšce nad 1500 m a poskytuje informace o množství sněhu, jeho rozložení a změnách v průběhu času (ESA, 2023).

Polar View je projekt Evropské kosmické agentury, který se zaměřuje na monitorování sněhové pokrývky v polárních oblastech pomocí družicových dat. Projekt poskytuje informace o množství sněhu, jeho rozložení a změnách v průběhu času, což je důležité pro sledování klimatických změn v těchto oblastech (ESA, 2023).

Za zmínku také stojí program **GlobSnow**, který Evropská kosmická agentura spustila v roce 2008. Jedná se o projekt, který se zaměřuje na vytvoření dlouhodobého globálního datasetu sněhové pokrývky s vysokým rozlišením pomocí družicových dat a dostatečnou homogenitou, aby byl přijatelný pro analýzu změny klimatu. GlobSnow v současnosti obsahuje globální mřížkové informace o rozsahu sněhu a SWE na severní polokouli. Produkt rozsahu sněhu je vytvořen pomocí viditelných a infračervených pozorování družice ESA (ERS-2 ATSR-2 a Envisat AATSR). Projekt je stále aktivní a poskytuje aktuální informace o sněhové pokrývce. Aktuální data jsou k dispozici z webových stránek <http://www.globsnow.info> (Frei et al., 2012).

V České republice byl dostupný **Projekt FLOREO (Flood Risk Earth Observation Monitoring)**, což je projekt financovaný Evropskou komisí, který se zaměřuje na využití DPZ a moderních technologií pro sledování rizik spojených s povodněmi.

Projekt se soustředí na vývoj a implementaci nových metod pro získávání, zpracování a vizualizaci dat z pozorování Země. S cílem podpořit lepší předpovědi povodní a snížit tak riziko ztrát na lidských životech a majetku. Součástí projektu bylo také uživatelské interaktivní mapové rozhraní, na kterém byla možnost zobrazit jednotlivá družicová snímání v čase včetně datových produktu a předpovědních modelů. Projekt FLOREO byl vyvíjen v rámci programu PECS, na kterém se podílí Česká republika a Evropská kosmická agentura (ESA) (FLOREO, 2023).

Metodika projektu FLOREO spojuje data z družicového snímání Země s optickými a radarovými daty středního rozlišení a informace z meteorologických stanic, aby vytvořila detailní systém pro hydrologický monitoring a předpověď povodní. Systém zahrnuje moderní metody monitorování vodní bilance v krajině s využitím dálkového

průzkumu Země, včetně mapování a monitorování sněhové pokrývky, tání sněhu a rizika povodní. Druhá část systému se zaměřuje na monitorování vlhkosti půdy a dešťových srážek v krajině, včetně rychlosti infiltrace a rizika povrchového odtoku, které mohou přispět ke vzniku povodní (FLOREO, 2023).

Podle dostupných informací z oficiálních webových stránek není nadále projekt podporován – ukončil svoji činnost.

4.2.7 Přehled vybraných družicových systémů (senzorů)

Tato podkapitola je zaměřena na přehled vybraných družicových systémů a senzorů, které jsou určeny pro monitorování sněhové pokrývky a kryosféry. Tyto systémy a senzory zahrnují různé technologie, včetně optických, radarových a mikrovlnných senzorů, které umožňují získat informace o množství, rozloze sněhu a ledu, hustotě sněhu, teplotě sněhu, tloušťce ledu a dalších klíčových faktorech. Vývoj družic a satelitních systémů je dynamický, a jejich význam v oblasti dálkového průzkumu Země stále roste. Jelikož existuje nespočet satelitů nesoucí nejrůznější senzory, jsou níže uvedeny nejvýznamnější a nejčastěji využívané přístroje v oblasti měření sněhové pokrývky a kryosféry.

Modis

Senzor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) je důležitým nástrojem pro sledování kryosféry a sněhové pokrývky z vesmíru. Tento senzor je jedním z hlavních senzorů umístěných na družici Terra a Aqua, které jsou součástí programu NASA EOS (Earth Observing System). Senzor byl poprvé vypuštěn v roce 1999 a od té doby získává důležitá data o povrchu Země. Senzor MODIS umožňuje sledovat mnoho různých povrchových a atmosférických jevů s vysokým rozlišením a to i na globální úrovni, dále získává data o rozloze sněhové pokrývky a ledových ploch, jejich tloušťce a optických vlastnostech. Tyto informace jsou důležité pro předpověď povodní, analýzu klimatických změn a další aplikace.

Historie senzoru MODIS sahá do 90. let, kdy byl vyvinut jako klíčový senzor programu EOS, který byl vytvořen pro lepší pochopení klimatických změn a jejich dopadů na život na Zemi. Senzor byl vyvinut společností Santa Barbara Remote

Sensing (nyní Raytheon) a byl vypuštěn na palubě družice Terra v prosinci 1999. V roce 2002 byla vypuštěna družice Aqua s druhým senzorem MODIS (NASA, 2023a).

Senzor MODIS pracuje v oblasti viditelného a infračerveného spektra a získává snímky Země s vysokým rozlišením. Tyto snímky jsou poté zpracovávány a analyzovány pomocí specializovaných algoritmů, které umožňují vytvářet detailní mapy sněhové pokrývky a kryosféry (Hall, 2019).

Senzor MODIS snímá zemský povrch pomocí 36 různých pásů v rozmezí vlnových délek od 0,4 μm do 14,4 μm , které umožňují snímání v různých rozlišeních. První dvě pásma mají rozlišení 250 metrů, dalších pět pásem snímá v rozlišení 500 metrů a zbylých 29 pásem snímá v rozlišení 1 kilometru (MODIS, 2023).

MODIS zaznamenává data s vysokým rozlišením (250 metrů na pixel) na oblasti o velikosti tisíců kilometrů a může získat data o stejné oblasti až 4x denně. To umožňuje sledovat povrchové a atmosférické jevy v reálném čase. Své snímky pořizuje rychlostí 20,3 otáček za minutu, jeho šířka záběru je 2 330 kilometrů. Váha skeneru MODIS je 228,7 kg, má rozměry 1,0 metr x 1,6 metrů x 1,0 metr a výkon 162,5 wattů. Průměrná rychlost odesílání dat senzoru MODIS je 6,1 megabitů za sekundu (MODIS, 2023).

Senzor MODIS poskytuje širokou škálu datových produktů získaných z jeho snímků. Tyto produkty se využívají v různých oblastech, včetně sledování změn v kryosféře. Mezi datové produkty týkající se sněhové pokrývky spadají například snímky zobrazující rozsah a pokrytí sněhu, jeho teplotu nebo dobu, po kterou se sníh udržuje na daném místě. Zejména se jedná o MODIS Snow Cover Data Products, které jsou vidět v tabulce č. 5, obsahují data o sněhové pokrývce a produkt 10A1 i informace o albedu (NASA, 2023; Hall et al., 2002).

Tab. 5: Sněhové produkty senzoru MODIS (MODIS, 2023).

Název produktové sady	Terra produktový název	Aqua produktový název
MODIS Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m	MOD10_L2	MYD10_L2
MODIS Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid	MOD10A1	MYD10A1
MODIS Snow Cover Daily L3 Global 0.05Deg CMG	MOD10C1	MYD10C1
MODIS Snow Cover 8-Day L3 Global 500m Grid	MOD10A2	MYD10A2
MODIS Snow Cover 8-Day L3 Global 0.05Deg CMG	MOD10C2	MYD10C2
MODIS Snow Cover Monthly L3 Global 0.05Deg CMG	MOD10CM	MYD10CM

Snímky získané senzorem MODIS jsou poskytovány uživatelům prostřednictvím NSIDC (National Snow and Ice Data Center), to zcela zdarma ke stažení či prohlížení online skrze webový prohlížeč a interaktivní mapy.

Landsat

Landsat je satelitní program, zaměřující se na sběr dat o Zemi pomocí satelitních snímků. Tato data poskytují informace o vodě, vegetaci, půdě, ledovcích a dalších zemských povrchových prvcích. Program Landsat poskytuje důležitá data pro monitorování sněhu na Zemi. Díky satelitům programu Landsat je možné zachytit snímky sněhu v různých oblastech Země, které mohou být dále zpracovány a analyzovány. Sněhové oblasti jsou důležitým zdrojem vody pro mnoho regionů, a proto je sledování sněhových vrstev a jejich tání velmi důležité pro předpověď povodní nebo pro zásobování vody. Díky datům z programu Landsat je možné sledovat změny sněhové pokrývky během celého roku, což umožňuje lepší předpovědi a řízení zdrojů vody (Masek et al., 2020).

První satelit programu Landsat byl vypuštěn v roce 1972, od té doby bylo vypuštěno dohromady 9 družic. V současnosti jsou v provozu tři družice Landsat 7, 8 a Landsat 9, který byl vypuštěný 27. září 2021. Landsat 7 je v provozu od roku 1999 a nese modernizovaný senzor z předchozích řad ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), což je pokročilý senzor, který dokáže zachytit obrazy Země s vysokým

rozlišením. Tento senzor je využíván k měření různých spektrálních pásem a umožňuje získávat detailní obrazy Země s rozlišením až 15 metrů (Landsat, 2023).

Přístroj Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) je pevný osmi pásmový multispektrální skenovací radiometr s "metličkovým" uspořádáním, který poskytuje obrazové informace o zemském povrchu s vysokým rozlišením. Na oběžné dráze ve výšce 705 km detekuje spektrálně filtrované záření v pásmech VNIR (viditelného a blízkého infračerveného záření), SWIR (krátkovlnného infračerveného záření), LWIR (dlouhého infračerveného záření) a panchromatického pásma Sluncem osvětlené Země v rozsahu 183 km. ETM+ disponuje celkem 8 pásmy, které umožňují získat informace o různých vlastnostech Země. Družice obsahuje několik pásem, mezi něž patří viditelné, blízké infračervené a střední infračervené pásmo s rozlišením 30 m, termální pásmo s rozlišením 60 m a panchromatické pásmo s rozlišením 15 m (König et al., 2001).

Družice Landsat 8 disponuje dvěma senzory, Senzorem Operational Land Imager (OLI) a Senzorem Thermal Infrared Sensor (TIR). Senzor OLI umožňuje zachytit detaily povrchu Země s rozlišením 15-30 m v RGB spektru a poskytuje také data v blízkém infračerveném spektru s rozlišením 30 m, což umožňuje sledovat povrchovou teplotu i vodní toky. Senzor též zahrnuje pásmo pro detekci vysoké oblačnosti, díky němuž lze snáze rozpoznat sněhovou pokrývku. Senzor TIR disponuje dvěma termálními pásmy, která jsou využívána hlavně pro monitoring teploty na povrchu Země (Landsat, 2023).

Nejnovější družice Landsat 9 obsahuje vylepšené senzory z předchozí generace, a to OLI-2 a TIR-2 (Masek et al., 2020).

Zmíněné družice oběhnou Zemi jednou za 99 minut, za jeden den celkem 14krát. Každý bod na Zemi snímá jednou za 16 dní. Výhodou kombinace družic Landsat 8 a Landsat 9 je časový posun snímání o 8 dní, což umožní získávat aktuální snímky v průběhu celého roku, a to jednou týdně (Landsat, 2023).

Sentinel

Jedním z hlavních cílů mise Sentinel je monitorovat změny v terénu a klimatu pomocí satelitního pozorování Země. Pro sledování sněhové pokrývky jsou na palubě Sentinelů nainstalovány speciální senzory. Evropská kosmická agentura (ESA) vyvinula misi Sentinel pro potřeby programu Copernicus, která zahrnuje dvojici družic pro dosažení lepšího pokrytí a shromáždování většího množství dat (ESA, 2023).

Sentinel-1, první satelit v rámci mise, používá aktivní radarovou technologii SAR, umožňující průzkum oblastí s nízkou oblačností nebo v noci. Senzor na palubě Sentinel-1 umí získávat data o hloubce a struktuře sněhové pokrývky.

Sentinel-2, druhý satelit této mise, má multispektrální senzory pro snímání povrchových vrstev země. Tyto senzory dokážou detekovat různé vlnové délky elektromagnetického záření, což umožňuje měření povrchové teploty a přítomnosti sněhu na zemi. Jedná se o MultiSpectral Instrument (MSI), jenž je senzor pro pozemní i satelitní snímání Země, který je součástí mise Copernicus Evropské kosmické agentury (ESA). MSI je multispektrální senzor, který dokáže snímat různé vlnové délky elektromagnetického záření a umožňuje získávat informace o různých vrstvách povrchu Země. (Sentinel, 2023).

MSI dokáže zaznamenat obrazy ve třinácti spektrálních pásmech, pokrývající vlnové délky od 443 nm (modrá) po 2190 nm (blízká infračervená oblast). Tento rozsah umožňuje měřit povrchovou teplotu, chlorofyl a další biologické pigmenty, obsah vody v půdě i atmosféře a detekovat nebezpečné plyny jako oxid uhličitý nebo oxid siřičitý. MSI má prostorové rozlišení již od 10, 20 nebo 60 metrů na pixel v závislosti na režimu snímání. Ve vysokém rozlišení umožňuje MSI zaznamenat obrazy s vysokým detailním zobrazením (ESA, 2023).

Sentinel-3, nejmodernější satelit, který disponuje nejnovějšími senzory pro sledování oceánů a povrchu země (senzor SLSTR). Mezi tyto senzory spadá i oceánický barevný senzor (OLCI), který umožňuje detekovat rozdíly v barevném spektru povrchu země a tím identifikovat sníh. Na palubě této družice se také nachází mikrovlnný radiometr (MWR) a radarový výškoměr (SRAL) (Sentinel, 2023).

AVHRR

AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) je dálkově řízený senzor, který se používá pro sledování Země z vesmíru. Byl vyvinut v roce 1978, první verze byla umístěna na družicích série NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (König et al., 2001).

Senzor AVHRR je schopen zachytit obrazy Země z vesmíru ve viditelném a infračerveném spektru. Dokáže měřit teplotu povrchu, vegetaci, srážky a sněhovou pokrývku. Tyto informace se pak používají k odhadu množství sněhu. Zejména v oblasti sledování sněhové pokrývky má senzor AVHRR široké využití. Použití senzoru AVHRR pro sledování sněhové pokrývky se opírá o jeho schopnost detekovat rozdíly ve spektrální odezvě sněhu i okolního terénu. Díky tomu je možné identifikovat sněhovou pokrývku, sledovat její rozsah a změny v průběhu času (Dietz et al., 2011).

AVHRR poskytuje dvakrát denně globální snímky s rozlišením 1 km (v nadiru) ve viditelném a infračerveném pásmu elektromagnetického spektra. Družice neustále snímá území v širokém pásmu o šířce přibližně 3000 km (1500 km na každou stranu od bodu největšího osvětlení – nadiru) a posílá data v plném rozlišení uživatelům v reálném čase. Základní typ digitálního přenosu dat z AVHRR se označuje jako HRPT (High Resolution Picture Transmission) (Eumetsat, 2023).

Senzor se skládá z pěti detektorů, každý zachycuje energii z různých spektrálních pásem. Tato pásma jsou označována písmeny A-E.

- Pásmo A: přenosný pás, jehož vlnová délka se pohybuje od 0,58 μm do 0,68 μm , je určen pro pozorování krajiny a vodních ploch.
- Pásmo B: jeho vlnová délka se pohybuje od 0,725 μm do 1,10 μm . Využívá se pro pozorování atmosféry a oceánu.
- Pásmo C: vlnová délka od 3,55 μm do 3,93 μm . Je určeno pro měření teploty hladiny moře.
- Pásmo D: vlnová délka od 10,3 μm do 11,3 μm , slouží k měření teploty povrchu země.
- Pásmo E: nejdelší vlnová délka, kterou AVHRR zachytí, pohybuje se od 11,5 μm do 12,5 μm . Využívá se pro měření teploty tropických oblastí.

SEVIRI

SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager) je senzor na palubě družic Meteosat druhé generace, které jsou provozovány Evropskou kosmickou agenturou (ESA) ve spolupráci s Evropskou organizací pro využití meteorologických satelitů (EUMETSAT). Senzor SEVIRI zaznamenává oblast viditelného světla a infračerveného záření, umožňuje sledování počasí v reálném čase s vysokým prostorovým rozlišením.

Tento typ družice se nazývá geostacionární, obíhá kolem Země rychlostí, která odpovídá rychlosti rotace Země kolem své osy. Díky tomu dokáže nepřetržitě sledovat stejné území na zemském povrchu. Geostacionární družice jsou umístěny ve výšce 36 000 km nad Zemí. Senzor tohoto typu družice má velmi vysoké časové rozlišení, dokáže pořizovat snímky každých 15 minut (Eumetsat, 2023).

Senzor SEVIRI umožňuje také sledování sněhové pokrývky. Podobně jako senzor MODIS, senzor SEVIRI měří v několika spektrálních pásmech, které se používají k určení vlastností sněhu, jako je albedo, teplota a množství sněhu. Díky vysokému rozlišení senzoru SEVIRI (1 km) je možné sledovat i méně výrazné změny v sněhové pokrývce (Stengel et al., 2013).

Přístroj SEVIRI obsahuje 12 spektrálních pásmových kanálů, z toho osm kanálů je v tepelné infračervené oblasti a poskytuje mimo jiné trvalé údaje o teplotách mraků, pevniny a mořské hladiny. Jeden z kanálů se nazývá kanál High Resolution Visible (HRV), který má vzorkovací vzdálenost v nejnižším bodě 1 km, na rozdíl od rozlišení 3 km ostatních viditelných kanálů (Eumetsat, 2023).

Kromě senzoru SEVIRI jsou k monitorování sněhové pokrývky využívány i další senzory na palubě družic. Mezi ty nejvýznamnější patří senzor AMSR-E na palubě družice Aqua a senzor SSM/I na palubě družic DMSP. Tyto senzory umožňují sledovat nejen sněhovou pokrývku, ale také množství a výskyt sněhových srážek (Stengel et al., 2013; Eumetsat, 2023).

MERIS

Senzor MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) byl vyvinut Evropskou kosmickou agenturou (ESA) pro družici ENVISAT. Jedná se o spektrometr se středním rozlišením, který umožňuje měřit spektrální charakteristiky zemského povrchu. Hlavním cílem senzoru je získávat data o vodních barvách a koncentraci fytoplanktonu v oceánech, ale také může být využit pro sledování sněhové pokrývky (König et al., 2001).

Senzor MERIS má 15 spektrálních pásů v intervalu od 390 nm do 1040 nm a rozlišení 300 metrů. Pokrývá území o šířce 1150 km a snímá Zemi v čase od 10:30 do 13:30 místního času, což umožňuje měřit změny v přirozeném osvětlení (ESA, 2023).

Nicméně družice ENVISAT přestala vysílat signál, a i přes intenzivní úsilí o obnovení spojení a vyšetřování možných příčin selhání, se nepodařilo navázat kontakt, díky tomu ESA oficiálně ukončila misi. Díky úspěšnému výkonu během deseti let provozu, bylo předpokládáno, že družice Envisat bude pokračovat ve své misi ještě několik let. Evropská kosmická agentura nahradila tuto družici nástupnickými družicemi Sentinel, které jsou popsány více.

VIIRS

Senzor VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) je jedním z hlavních senzorů na palubě družic SNPP a S-NPP, které jsou určeny k monitorování sněhové pokrývky. Senzor VIIRS umožňuje získávat data v oblasti viditelného světla a infračerveného záření s vysokým rozlišením, což umožňuje sledovat změny sněhové pokrývky v reálném čase. (Riggs et al., 2017)

Senzor VIIRS dokáže snímat celou Zemi každých 12 hodin, což z něj činí ideální nástroj pro sledování sněhové pokrývky. Jeho pozorovací schopnosti zahrnují nejenom její snímání, ale i měření teploty povrchu Země nebo znečištění ovzduší a dalších parametrů (NASA, 2023a).

Senzor VIIRS poskytuje data v 22 spektrálních pásmech s vlnovými délkami v rozmezí od 0,4 μm až po 12 μm . Kanály v infračerveném spektru jsou nejvhodnější pro pozorování sněhové pokrývky, protože dokážou detekovat tepelné záření

emitované sněhem. Tyto kanály jsou také velmi citlivé na odražené sluneční záření, což umožňuje měřit přesnost sněhové pokrývky i v oblačných podmínkách (Riggs et al., 2017).

CrIS

Senzor CrIS (Cross-track Infrared Sounder) je vyspělý spektrometr na palubě družice Suomi NPP, který poskytuje důležité informace o atmosférických podmínkách Země. Senzor se skládá z jednoho hlavního a dvou vedlejších zrcadlových systémů, které umožňují snímat oblasti široké až 3 000 km. Senzor je schopen měřit teploty od -120 °C do 2 500 °C. Senzor CrIS zaznamenává spektrum infračerveného záření ze Země

a atmosféry v oblasti vlnových délek 3,9 až 15,4 μm , čímž poskytuje podrobné informace o teplotě a vlhkosti atmosféry. Senzor CrIS je spolu se senzorem VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) součástí systému JPSS (Joint Polar Satellite System), který je společným programem americké NASA a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) pro monitorování počasí a klimatu (NOAA, 2023).

ASTER

Senzor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) je jedním z hlavních senzorů družice Terra, který slouží pro měření teploty povrchu Země, sklonu terénu a spektrálních charakteristik. ASTER dokáže poskytnout informace o sněhové pokrývce vysokého rozlišení, díky čemuž se stal klíčovým nástrojem pro sledování změn v lesních oblastech a vodních zdrojích (NASA, 2023).

Senzor ASTER pracuje v infračerveném a viditelném spektru a umožňuje získávat data s rozlišením až 15 metrů na kanál a s měřicími pásmy o šířkách 15, 30 a 90 metrů. Tento senzor měří také teplotu povrchu Země i umožňuje získávat data o topografii a geologických vlastnostech. Pro sledování sněhové pokrývky se využívají především data z viditelného a infračerveného spektra, které umožňují získávat informace o množství a vlastnostech sněhu na povrchu Země (ASTER, 2023; NASA, 2023).

5. Zpracování dat

Zpracování dat z družicových snímků se zabývá analýzou obrazových dat získaných z družicových pozorování Země. Druhy a formáty dat, které jsou dostupné, zahrnují multispektrální a hyperspektrální snímky, radarová data a termální snímky. Tato práce je zaměřená především na multispektrální data.

5.1 Druhy a typy dostupných dat

Satelitní data jsou obvykle poskytována v multidimenzionálních formátech, nejčastěji formáty GeoTIFF (Geographically Referenced Tagged Image File Format), netCDF (Network Common Data Form) a HDF-EOS (Hierarchical Data Format – Earth Observing System). Tyto formáty formálně ukládají data jako proměnné, přičemž každá proměnná reprezentuje vícerozměrné pole, obsahují data získaná v různých časech nebo v různých výškách. Dalšími typy dat mohou být např. ASCII, GRIB či GIF (Huang, 2014).

5.2 Dostupnost dat

Dostupnost družicových dat pro měření sněhové pokrývky se zlepšila díky rozvoji technologie a zvyšujícímu se množství družic, které tyto data poskytují. Mnoho z těchto dat jsou volně dostupné na internetu, což umožňuje širšímu spektru uživatelů využívat tyto informace. Mezi zdroje dat, které jsou poskytnuty zdarma, patří například webové stránky [USGS Earth Explorer](#), [NASA Earthdata Search](#), [ESA Copernicus Open Access Hub](#), [NSIDC search](#), [EUMETView](#) a [GlobeSnow](#) (společný projekt ESA a Finska, který poskytuje sněhová data, získávaná prostřednictvím různých družicových misí, jako např. EUMETSAT či NASA). Tyto stránky poskytují uživatelům přístup k informacím z různých družicových misí, včetně Landsat, Sentinel a MODIS. Data jsou poskytována v různých formátech, viz kapitola 5.1 a obsahují různé informace o sněhové pokrývce. Dostupnost dat závisí na druhu družice a může být ovlivněna časovými i prostorovými omezeními.

5.3 Využívané programy k analýze dat

Existuje celá řada programů, které se používají k analýze dat z družicových senzorů a zpracování dat o sněhové pokrývce. Některé z nejpoužívanějších programů jsou:

ENVI (Environment for Visualizing Images), SNODAS – sněhový datový a analytický systém, MODIS Snow Cover Tools, ArcGIS Spatial Analyst – nástroj pro analýzu prostorových dat v programu ArcGIS, R package MODISsp. – Balík pro programovací jazyk R, který umožňuje zpracování dat o sněhové pokrývce. Obsahuje nástroje pro výpočet parametrů sněhové pokrývky, včetně výšky sněhu, rozložení sněhového pokryvu a dalších (Busetto et Ranghetti, 2016). Dalším programem pro vizualizaci a analýzu geospatálních dat může být například software Panoply či PCI Geomatica. Dále lze využít nástroj BEAM VISAT či HDFView.

Tyto programy jsou jen některé z mnoha možností pro zpracování dat o sněhové pokrývce a výběr správného programu závisí na konkrétních potřebách a úkolech při analýze dat.

6. Výsledné zhodnocení

Výsledkem této práce je tabelární a grafické zpracování satelitních senzorů a jejich vybraných datových produktů (veličin). Práce se zaměřuje především na porovnání multispektrálních senzorů a jejich sněžových produktů. Mikrovlnným a radarovým senzorům se věnuje spíše okrajově, jejich srovnání ukazuje tabulka č. 7 a obrázek č. 9, který popisuje doby provozu.

6.1 Tabelární porovnání družicových systémů

Tabulka č. 6 srovnává jednotlivé multispektrální senzory. MODIS má největší variabilitu v druhu spektrálních pásem s denní obnovou dat. Senzor CrIS neměří přímo ve spektrálních pásmech, ale pracuje s kontinuálním spektrem v oblasti středního a dalekého infračerveného záření.

Tab. 6: Porovnání vybraných optických senzorů.

Satelitní senzor	Počet pásem	Četnost obnovení dat	Družice	Uvedení do provozu	Výška [km]	Šířka záběru senzoru	Prostorové rozlišení
MODIS	36	1-2 dny	Terra/Aqua	1999/2002	705	2330 km	250-1000 m
ASTER	13	16 dní	Terra	1999	705	187 km	15-90 m
VIIRS	22	1-2 dny	Suomi NPP	2011	824	3040 km	375-750 m
ETM+	9	16 dny	Landsat 7	1999	705	185 km	15-60 m
OLI-2	9	16 dny	Landsat 9	2021	705	185 km	15-30 m
TIR-2	1	16 dny	Landsat 9	2021	705	185 km	100 m
MSI	13	5 dnů	Sentinel-2	2015	786	290 km	10-60 m
MERIS	15	3 dny	Envisat	2002	800	1150 km	300 m
SEVIRI	12	15 minut	Meteosat	2002	36000	3712 km	1-5 km
CrIS	NA	6,4 sekund	Suomi NPP	2011	824	2200 km	14,6 km
MS	28	1-4,5 dne	WorldView-3	2014	617	13,1 km	30-50 cm
AVHRR	5	1-2 dny	NOAA	1978	833	3000 km	1.1-4 km

Tabulka č. 7 srovnává jednotlivé mikrovlnné senzory. Senzory SAR mají nejmenší šířku záběru. Jelikož mikrovlnné senzory pracují s vlnovými délkami a frekvencemi, nemají typicky spektrální pásma v klasickém smyslu jako senzory měřící v infračerveném nebo viditelném spektru. Místo toho se používají pojmy jako "frekvenční pásma" nebo "vlnové délky", aby se popisovala oblast elektromagnetického spektra, ve které daný senzor pracuje. Označení X-pásmo značí konkrétní část mikrovlnného spektra, která se nachází mezi 8 a 12 GHz. C-pásmo se nachází mezi 4 a 8 GHz a L-pásmo se nachází mezi 1 a 2 GHz v oblasti elektromagnetického spektra.

Tab. 7: Porovnání vybraných mikrovlnných senzorů.

Satelitní senzor	Počet pásem	Četnost obnovení dat	Družice	Uvedení do provozu	Frekvence [GHz]	Šířka záběru senzoru	Prostorové rozlišení
SMMR	5	1-2 dny	Nimbus-7	1978	6,6-37	1420 km	30-160 km
SSM/I	5	denně	DMSP	1987	19,3-85,5	1430 km	13-70 km
AMSR-E	12	1-2 dny	Aqua	2002	6,9-89,0	1450 km	5-50 km
SAR-X	X	dle potřeby	TerraSAR-X	2007	9,6	10-100 km	1/3/18 km
SAR	C	dle potřeby	RADARSAT-2	2007	5,4	20-500 km	3-100 m
ASAR	C	3 dny	Envisat	2001	5,3	100/400 km	30/150/1000 m
SAR	L	44 dní	JERS-1	1992	1,275	75 km	18 m

Tabulka č. 8 porovnává časové a prostorové rozlišení jednotlivých produktů senzoru MODIS. Dále udává český a anglický název se zkratkou produktu a jejího identifikátoru, pod kterým lze vyhledávat či nalézt další podrobnosti.

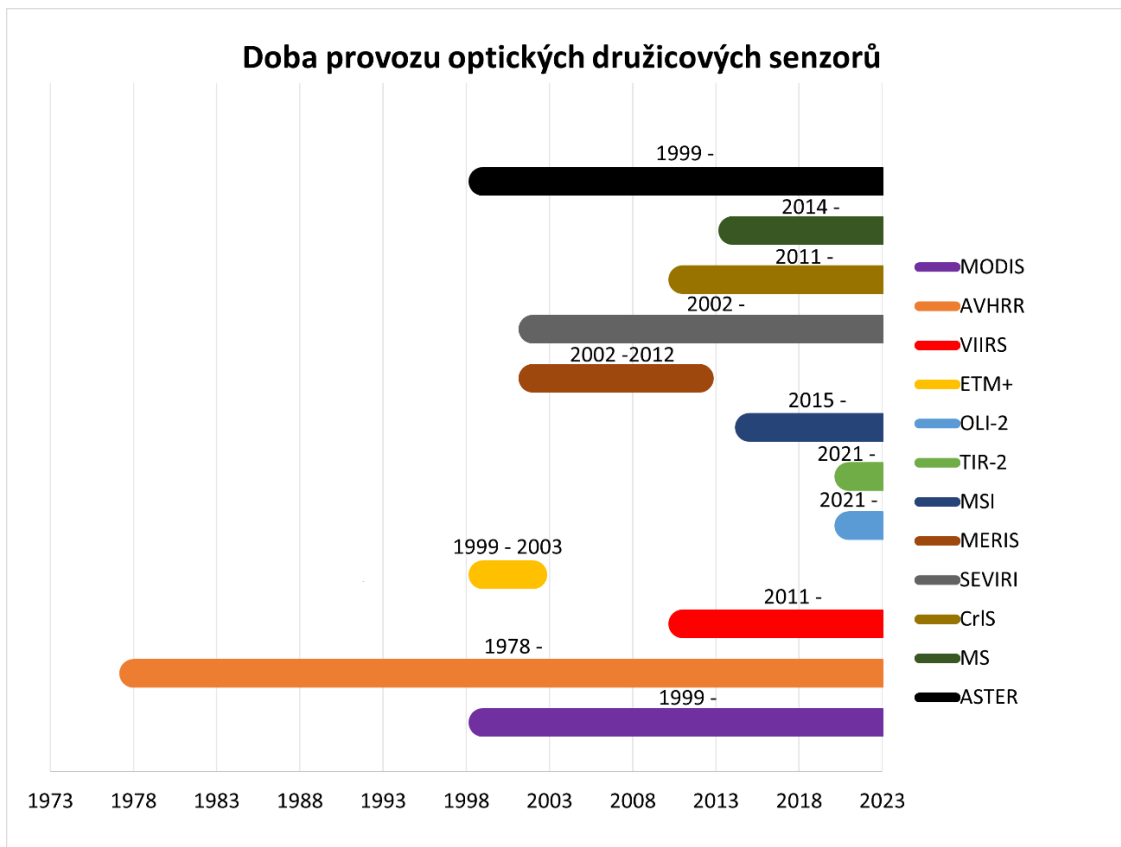
Tab. 8: Porovnání vybraných produktů senzoru MODIS.

Produkty senzoru MODIS					
Český název	Anglický název	Zkratka	Prostorové rozlišení	Četnost obnovy dat	Identifikátor vrstvy
Rozsah sněhové pokrývky	Snow Cover	SC	250/500 m	1-2 dny	MOD10A1
Podíl plochy pokryté sněhem	Snow Cover Fraction	SCF	500/1000 m	8 dní	MOD10_L2
Vodní hodnota sněhu	Snow Water Equivalent	SWE	500/1000 m	8 dní	MOD10A2
Sněhové extrémy	Snow Extent Anomalies	SEA	500/1000 m	8 dní	MOD10CM
Albedo sněhu	Snow Albedo	SA	500 m	30 dní	MOD43B3
Výška sněhové pokrývky	Snow Depth	SD	500/1000 m	8 dní	MOD10A1
Teplota sněhu	Snow Temperature	ST	500 m	8 dní	MOD10_L2

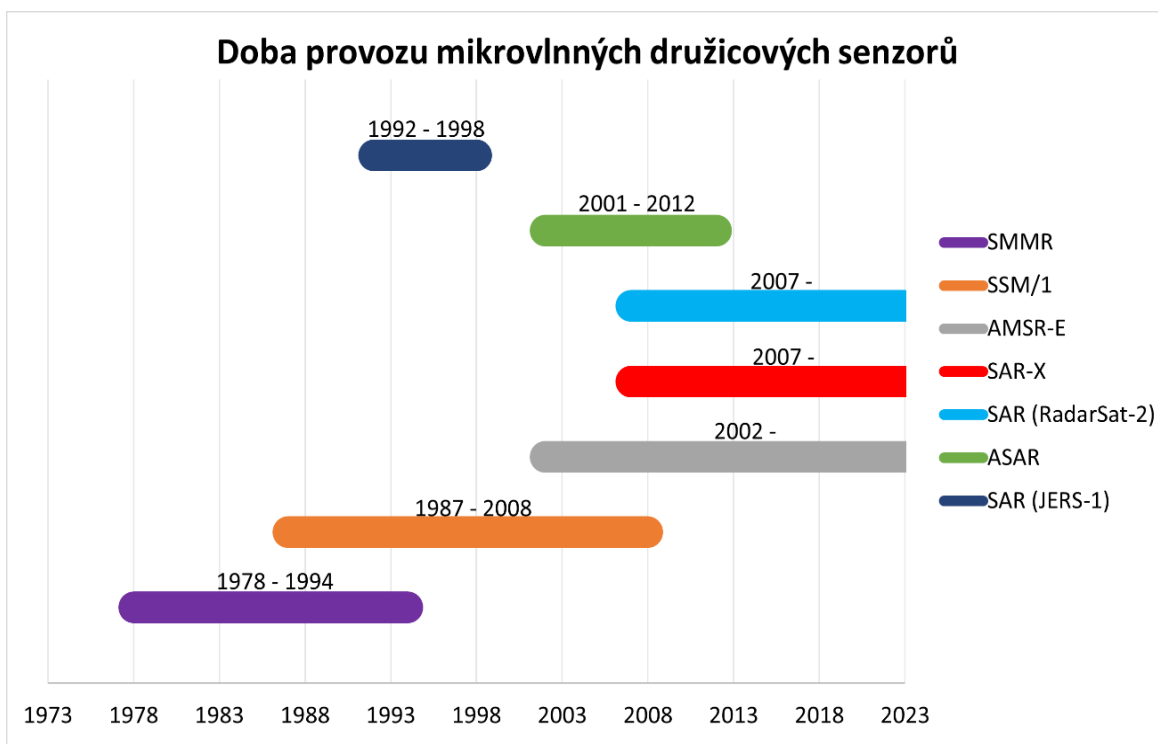
6.2 Grafické porovnání družicových systémů

Obrázek č. 11 popisuje dobu provozu multispektrálních senzorů, přesné roky provozu jsou uvedeny nad daným senzorem. Z obrázku č. 11 je vidět, že senzor AVHRR je nejdéle fungující optický senzor v této studii. Senzor ETM+ ukončil svůj provoz v roce 2003 kvůli poruše senzoru. Senzor MERIS přestal být funkční po 10 letech, z důvodu ztracení spojení s družicí Envisat. Ostatní senzory jsou plně v provozu a lze získávat jejich data z různých platforem pospaných v kapitole 5.

Jak je vyobrazeno na obrázku č. 12 prvně vypuštěný satelit Nimbus-7 nesený senzor SMMR byl v provozu od roku 1978 do roku 1994. Následoval senzor SSM/1, který byl schopný provozu v letech 1987-2008. Senzor SAR umístění na družici JERS-1 poskytoval data po dobu 7 let. Dnes můžeme využít mikrovlnné senzory jako AMSR-E, SAR-X či SAR nesený družicí RadarSat-2.



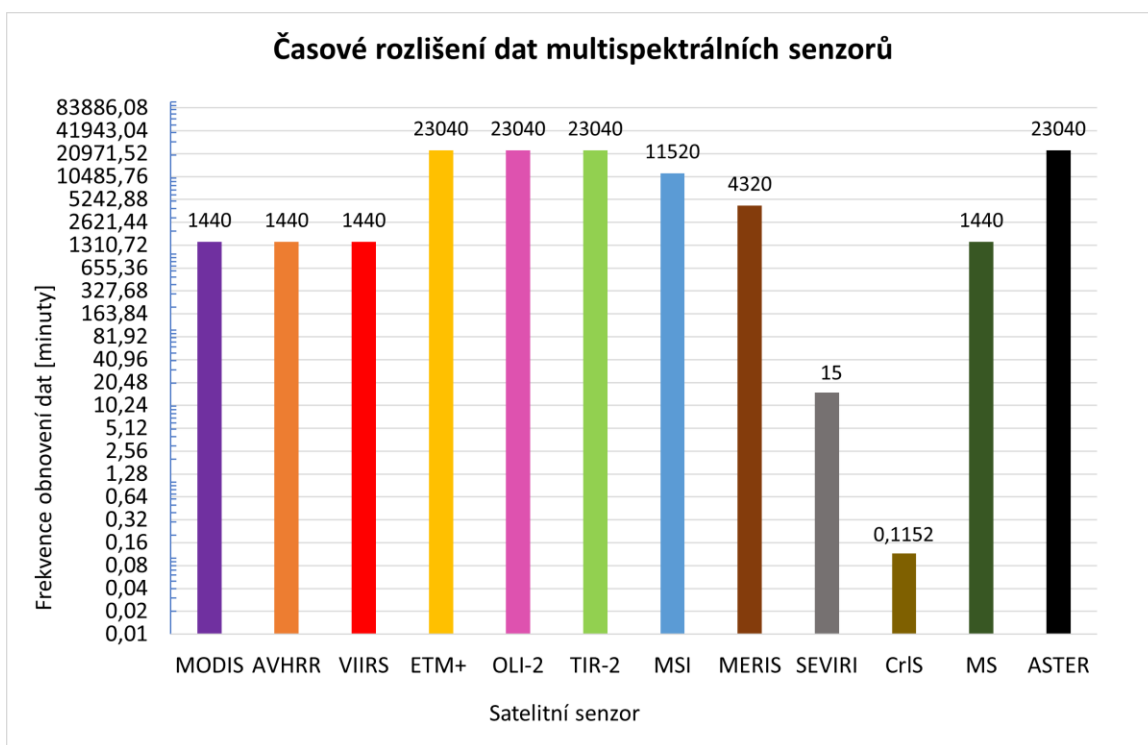
Obr. 11: Srovnání doby provozu u optických družicových senzorů.



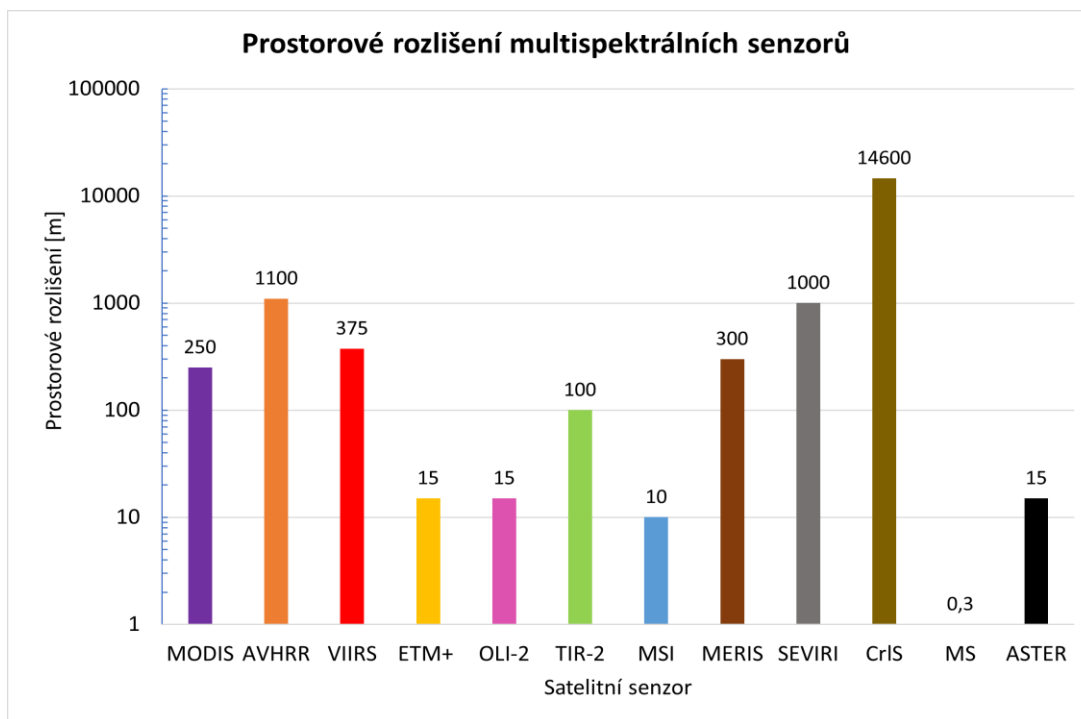
Obr. 12: Srovnání doby provozu u mikrovlnných družicových senzorů.

Obrázek č. 13 vyobrazuje časové rozlišení multispektrálních senzorů. Kvůli vykreslení je zobrazeno logaritmické měřítko, udávající frekvenci obnovení dat v minutách. Nejdelší obnovovací frekvenci mají senzory ETM+ a ASTER a to jednou za 16 dní. Senzory OLI-2 a TIR-2 se sice obnovují také jednou za 16 dnů, ale pozorovatel má aktuální data jednou za 8 dní, z důvodu propojení s Landsat 8 a senzory OLI a TIR. Téměř kontinuální obnovu dat nabízí senzor CrIS se svojí aktualizací každých cca. 7 s. Senzor SEVIRI se obnovuje jednou za 15 min.

Prostorovém rozlišení se zabývá obrázek č. 14, kde CrIS snímá pixel o velikost 14,6 km. Na druhé straně senzor MS dokáže zaměřit plochu i 30 cm. Velmi dobré rozlišení mají také senzory MSI, OLI-2 a ASTER. MODIS dokáže zachytit 250; 500 či 1000 m a senzor MERIS 300 m.



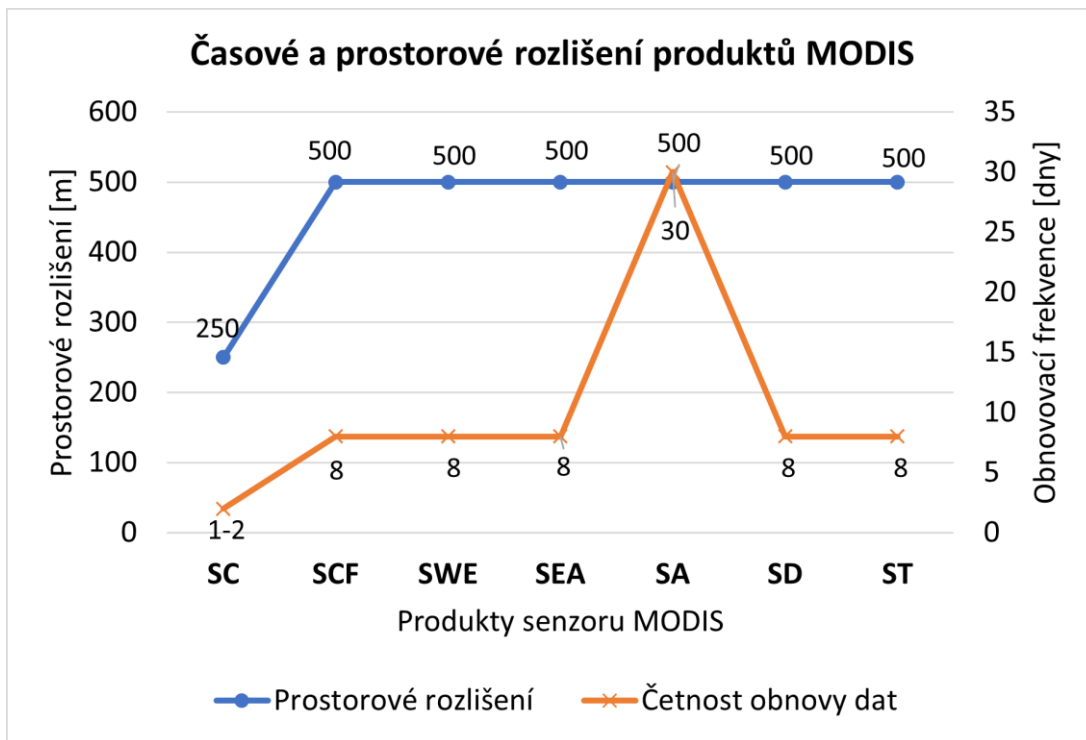
Obr. 13: Četnost obnovení dat senzorů v optické části spektra.



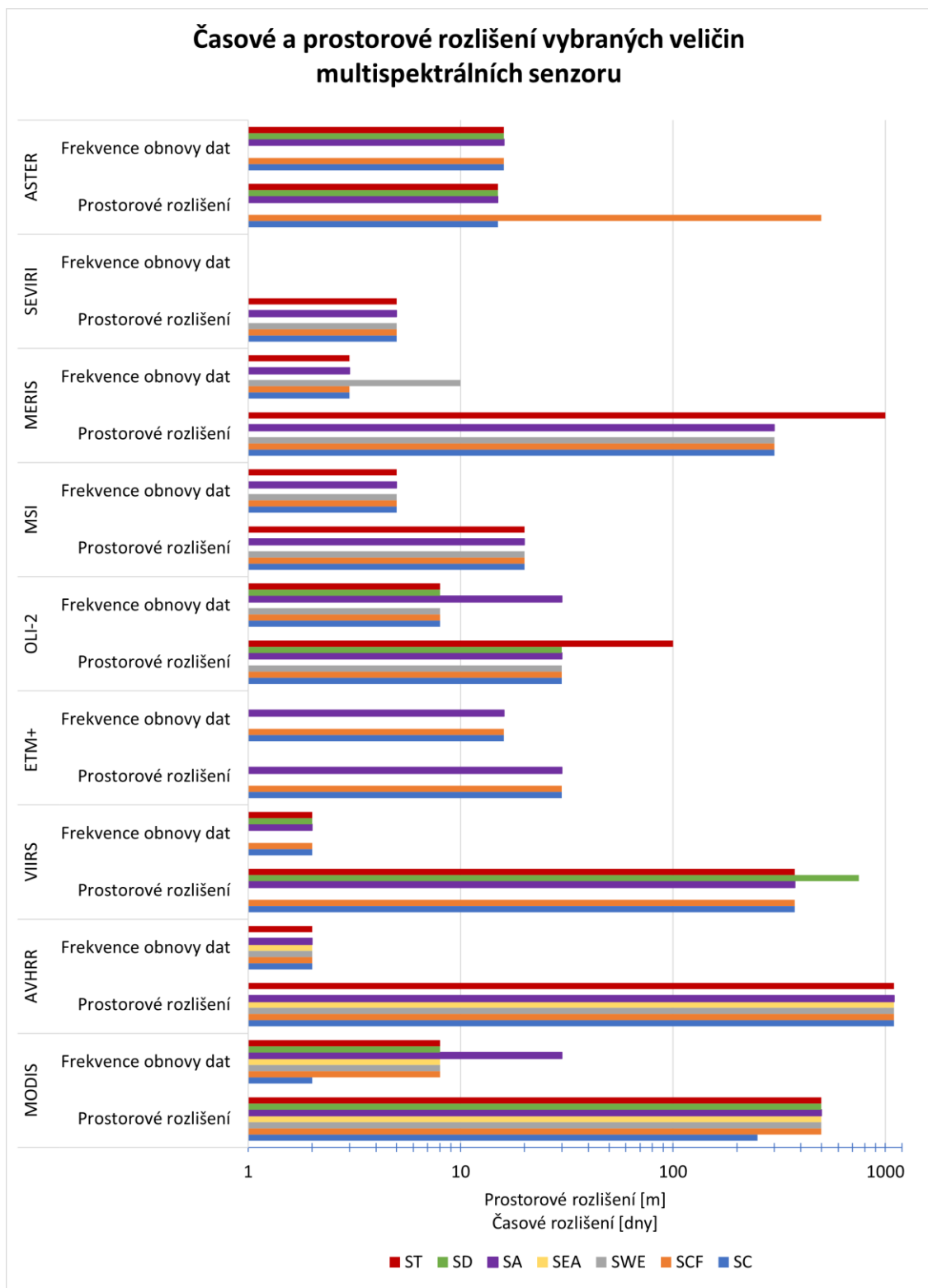
Obr. 14: Prostorové rozlišení dat senzorů v optické části spektra.

Obrázek č. 15 zobrazuje časové a prostorové rozlišení jednotlivých veličin senzoru MODIS. K orientaci v produktových zkratkách slouží tabulka č. 8. Rozsah sněhové pokrývky je MODIS schopen snímat pixelem o rozlišení 250x250m každý den. Další veličiny jako sněhové frakce, vodní hodnotu sněhu, sněhové extrémy, albedo, hloubku sněhu a teplotu sněhu snímá v prostorovém rozlišení 500 m s aktualizací 1x za 8 dní. S výjimkou sněžného albeda, které má obnovovací frekvenci na měsíční bázi.

Sloupcový graf na obrázku č. 16 zobrazuje srovnání jednotlivých produktů multispektrálních senzorů s časovým a prostorovým rozlišení. Seznam zkratk s českým a anglickým názvem poskytuje tabulka č. 8. Z grafu je patrné, že rozsah sněhové pokrývky je dostupný u všech porovnávaných multispektrálních senzorů. U senzoru SEVERI se četnost obnovení dat nezobrazuje z důvodu velmi malých hodnot, aktualizace dat totiž probíhá každých 15 minut. Některé veličiny zcela chybí z důvodu, neposkytování tohoto datového setu daným senzorem.



Obr. 15: Časové a prostorové rozlišení produktů senzoru MODIS.



Obr. 16: Časové a prostorové rozlišení veličin multispektrálních senzorů.

Vysvětlivky: ST (teplota sněhu), SD (výška sněžové pokrývky), SA (albedo sněhu), SEA (sněžové extrém), SWE (vodní hodnota sněhu), SCF (podíl plochy pokryté sněhem), SC (rozsah sněžové pokrývky)

7. Diskuse

V dnešní době existuje nespočet různých metod, typu měření a nejrůznějších výpočetních modelů studující sněhovou pokrývku. Není možné se v rámci jedné práce zaměřit na všechny možnosti a technologie zabírající se tímto tématem. Ve výsledcích této práce jsou shrnuty nejpoužívanější družicové senzory a porovnání jejich datových produktů. Z hodnocených multispektrálních senzorů se nejčastěji k mapování sněhu a ledu využívají data právě ze senzoru MODIS, VIIRS, AVHRR, OLI-2 a MSI. V praxi se běžně využívá kombinace několika metod například spolupráce NASA (MODIS) a NOAA (VIIRS), která vznikla v roce 2011, kdy byla vypuštěna první družice s přístrojem VIIRS.

Distanční metody měření a mapování sněhové pokrývky jsou poměrně mladou disciplínou, která se neustále zdokonaluje. Modernizace a digitalizace je vidět i v tomto odvětví. Vyhodnocení a interpretace dat je stále zpřesňována a nalézá širšího uplatnění. Dle Dietza et al. (2011) je spolehlivost dat ze senzoru MODIS okolo 95 %. Důležité je propojení těchto metod s pozemním měřením, díky kterému lze provádět korekce a úpravy jednotlivých modelů a výpočetních procesů. Příkladem pozorovacích sítí může být SNOTEL v USA a Kanadě, či ČHMÚ v rámci ČR.

S využíváním satelitních dat pro monitorování různých aspektů Země se pojí některé omezení a nepřesnosti. Jedním z hlavních faktorů je nemožnost poskytnout detailní informace o určité oblasti z důvodu komplexního terénu. Satelity mohou zachytit jen určité množství detailů, což může vést k chybám a nepřesnostem. Dalším problémem může být oblačnost, která může znemožnit zachycení obrazu v určitém spektrálním pásu. Pokud jsou oblačnosti vysoké, mohou být některá data zcela ztracena či nepoužitelná. Senzorové zařízení na satelitech mohou mít někdy technické problémy a selhání, což také může ovlivnit kvalitu dat. Přestože satelitní data mají své omezení, stále jsou velmi cenným prvkem pro mapování sněhové pokrývky a sledování jejích změn. S rozvojem technologií však pravděpodobně dojde ke zlepšení kvality satelitních dat a umožní nám získávat více přesných informací.

DPZ a hydrologické modelování v rámci studování sněhové pokrývky je velmi podstatným tématem. Tyto metody mohou sloužit jako doplňkové metody k pozemním měřením a lze jich využít na místech, která jsou špatně dostupná či provádění výzkumu v globálních měřítkách.

V České republice se stále aktivně využívá staničního a experimentálního měření v rámci sítě ČHMÚ, distanční metody monitorování sněhové pokrývky v rámci území ČR se zatím nevyužívají. Do budoucna je vidět značný prostor pro implementaci distančních prvků měření a tím i doplnění dat o sněhové pokrývce. Vhodný by k tomu byl senzor MODIS umístění na družici Aqua a Terra, který poskytuje denní obnovu dat nebo satelitní mise Sentinel nesoucí senzor MSI či senzor OLI-2 v rámci programu Landsat, který dokáže monitorovat plochu od rozlohy desítek metrů.

Podobné srovnání lze najít i ve článku od Dietze et al. (2011), který se zabývá přehledem metod distančního snímání sněhu a poskytuje zhodnocení dostupných metod. Autoři článku shrnují, jak různé druhy senzorů mohou být využity pro měření různých vlastností sněhu, jako je hloubka, pokrytí a vlhkost. Dále se také diskutují výhody i nevýhody různých metod a jaké jsou výzvy při jejich použití. Dietz et al. (2011) shrnuje, že vzdálené snímání sněhu přináší mnoho výhod, jako je široké pokrytí, nízké náklady a možnost monitorovat sněh v obtížně přístupných oblastech. Nicméně, také ukazuje, že každá metoda má své vlastní výhody a nevýhody a vyžaduje specifické podmínky pro použití. Protože různé senzory měří různé vlastnosti sněhu, autoři také shrnují, že kombinace několika metod může poskytnout více komplexní a přesnější výsledky.

Další podobné srovnání metod popisuje Dong (2018), který shrnuje vývoj a využití metod vzdáleného snímání, hydrologického modelování a pozemního pozorování v oblasti výzkumu sněhového pokryvu. Autor se zaměřuje na srovnání výhod a omezení těchto tří přístupů. Diskutuje, jak mohou být kombinovány k dosažení přesnějších výsledků. V závěru článku autor shrnuje, že kombinace vzdáleného snímání, hydrologického modelování a pozemního pozorování může vést ke zlepšení úrovně pochopení sněhového procesu. Výhodou této kombinace je, že může poskytnout celkově lepší odhady sněhového pokryvu, jeho vlastností a vlivu na hydrologické procesy. Dong (2018) také uvádí, že stále existuje velká nejistota v inverzních algoritmech dálkového

průzkumu parametrů sněhu, čímž zůstává potenciálně značný prostor pro zlepšení a zpřesnění ve vývoji dálkově snímaných sněhových produktů.

Využitím satelitních dat o výšce sněhu a sněhovém pokryvu v kombinaci s hydrologickým modelem na Aljašce se zabývá práce Lie et al. (2013), kde autoři zmiňují, že jejich metodika výzkumu by mohla vést k vytvoření vylepšených sněhových map a předpovědí. Dále by mohla být využita i v jiných oblastech s podobnými sněhovými podmínkami. Tedy, využití satelitních dat a hydrologického modelování může být obecně aplikováno i v jiných regionech, které mají podobné podmínky.

Výzkumem v Alpách se zabýval Weber et al. (2021). Článek popisuje hodnocení potenciálu globálních datových produktů pro účely hydrologického modelování v neoznačených vysokohorských povodích. Autoři článku, zkoumají použití různých produktů v kombinaci s terénními daty pro modelování sněhové hydrologie v alpských oblastech. Výsledky ukázaly, že kombinace globálních veličin s terénními daty může být úspěšně použita pro hydrologické modelování sněhu v neoznačených vysokohorských povodích. V závěru Weber et al. (2021) zdůrazňují důležitost používání kombinace globálních datových produktů a terénních dat pro hydrologické modelování.

I nadále bych se chtěl věnovat tomuto důležitému tématu. Rád bych se více zaměřil na metody UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Metody mapování terénu, které využívají bezpilotních letounů či dronů pro sběr dat a informací v různých oblastech. Jejich výhodou je rychlost a snadná dostupnost dat, což umožňuje rychlou a efektivní práci. Drony také mohou přistupovat k místům, kam by jinak bylo obtížné se dostat, což zvyšuje jejich využitelnost v extrémních podmínkách.

8. Závěr a přínos práce

Závěrem této práce na téma Analýza metod monitoringu sněhové pokrývky lze konstatovat, že existuje mnoho různých metod pro sběr dat o sněhové pokrývce a jejich vlastnostech. Tyto metody se liší v závislosti na jejich účelu, přesnosti, nákladech a dostupnosti. V práci byly popsány nejčastěji používané pozemní i distanční metody a porovnány satelitní distanční metody.

Cílem práce bylo shrnutí jednotlivých poznatků o metodách a technologiích zabývajících se mapováním sněhové pokrývky. Tabelárně a graficky porovnat multispektrální senzory a jejich datové produkty.

Problematika měření sněhové pokrývky pomocí systémů DPZ je v teoretické části velmi složitá a zahrnuje širokou škálu znalostí z různých disciplín. V této práci nebylo možné zahrnout všechny aspekty a možnosti těchto metod. Z dostupné literatury se jako nejlepší zdroje pro popis sněhové pokrývky za využití dálkového snímání jeví práce Reese (2006) a Seidela et Martinece (2004). Pro monitoring sněhové pokrývky jsou obecně nejlepší části elektromagnetického spektra blízko-infračervená (NIR), krátkovlnná infračervená (SWIR) oblast v kombinaci s mikrovlnou částí. V těchto oblastech spektra má sníh nejvýraznější charakteristické vlastnosti, které umožňují jeho snadnější detekci a umožňují získat informace o jeho rozloze, hloubce, vodní hodnotě sněhu, teplotě, textuře a dalších parametrech.

Práce také poskytuje informace o nových technologiích a trendech v oblasti monitoringu sněhové pokrývky, které mohou přinést významné inovace a zlepšení v této oblasti. Je důležité se tomuto tématu více věnovat, protože sníh, jako zásobárna vody má klíčový význam pro řízení vodních zdrojů, a dále je podstatné monitorovat vodní hodnotu sněhu v období tání z důvodu možných záplav. Změny ve sněhové pokrývce jsou také jedním z důsledků klimatických změn a mohou mít významné dopady na vodní režim, ekosystémy a lidské aktivity v oblastech s vysokohorským a polárním klimatem. Proto je důležité sledovat a monitorovat sněhovou pokrývku a využívat nejlepší dostupné metody pro sběr a analýzu dat, což může být právě synergie metod, která zdůrazňuje křížovou integraci měření sněhu pomocí pozemního měření, dálkového snímání a asimilace vylepšených dat dálkového průzkumu do hydrologických modelů. Využití synergického

rámce může poskytnout komplexní pohled na problematiku, která by nebyla dosažena použitím jednotlivých metod nebo nástrojů samostatně.

Nejvíce výhod přináší senzor MODIS, díky němuž lze monitorovat sněhovou pokrývku na denní bázi, což je důležité zejména během jarního tání, kdy se jednotlivé vlastnosti sněhu mění velice rychle. Pro detailnější mapování lze využít senzor MSI nesoucí družicí Sentinel-2, či senzor OLI-2, který je schopný mapovat sněhovou pokrývku ve velice přesném rozlišení.

Přínosy této práce spočívají v poskytnutí uceleného přehledu o metodách monitoringu sněhové pokrývky a v jejich srovnání, což může být užitečné pro odborníky v oblasti hydrologie, meteorologie a klimatologie. Práce také může sloužit jako základ pro další výzkum v této oblasti, a to zejména vzhledem k aktuálnímu vývoji technologií pro sběr a analýzu dat.

9. Přehled literatury a použitých zdrojů

AKYÜREK Z. et SÖZEN Ş., 2021. Assessment of snow cover monitoring using different spectral indices in a mountainous region: A case study in the eastern Black Sea region of Turkey. *International Journal of Remote Sensing*. 42(2), 498-518.

ASTER, ©2023: Aster Satellite Sensor (online) [cit. 2023-03-17], dostupné z <<https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/aster/>>.

BERCHA Š., JIRÁK L., DUCHÁČEK V., VAJSKEBR J., POBŘISLOVÁ P., KIMLOVÁ M., 2017: Využití profilových manuálních a automatických měření sněhu pro výpočet zásob vody ve sněhové pokrývce. In: *Český hydrometeorologický ústav: Oddělení aplikované hydrologie*. ČHMÚ, Praha: 1-20.

BULYGINA O., RAZUVAEV V., ALEKSANDROVA T., SHVETS A., 2011: Changes in snow cover characteristics over Northern Eurasia since 1966. *Environmental Research Letters*. 6(4).

BUSETTO L., et RANGHETTI L., 2016: MODISstsp: an R package for preprocessing of MODIS Land Products time series. *Computers & Geosciences*. 97, 40-48.

CARROLL T., CLINE D., FALL G., NILSSON A., LI L., ROST A., 2001: NOHRSC operations and the simulation of snow cover properties for the coterminous US. In: *69th Annual Meeting Western Snow Conference*. Western Snow Conference, Kalifornie: 1-14.

Copernicus, ©2023: Program Copernicus (online) [cit. 2023-03-14]. dostupné z <<https://copernicus.gov.cz/>>.

CSA, ©2023: Canadian Space Agency - Satellites (online) [cit. 2023-03-13]. dostupné z <<https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/>>.

CSL, ©2023: Cryospheric Sciences Laboratory (online) [cit. 2023-03-13]. dostupné z <<https://science.gsfc.nasa.gov/earth/cryosphere/>>.

ČHMÚ, ©2022: Český hydrometeorologický ústav (online) [cit. 2023-03-03]. dostupné z: <<https://www.chmi.cz/>>.

DEWALLE D. et RANGO A., 2011: *Principles of snow hydrology*. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 9780521290326.

DIETZ A., KUENZER C., GESSNER U., DECH S., 2011: Remote sensing of snow – a review of available methods. *International Journal of Remote Sensing*. 33 (13), 4094-4134

DINGMAN S., 2015: *Physical Hydrology*. Third Edit. Waveland Press, Inc. Chicago. ISBN 978-1-4786-1118-9.

DONG Ch., 2018: Remote sensing, hydrological modeling and in situ observations in snow cover research: A review. *Journal of Hydrology*. 561, 573-583.

DOZIER J., et PAINTER T., 2004: Remote sensing of snow in visible and near-infrared wavelengths. In: *Snow and Climate Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling*. Cambridge University Press, Cambridge: 263-284.

DOZIER J., 2009: Remote sensing of snow and ice: past, present, and future. *Journal of glaciology*. 192 (55), 3-11.

EGLI L., JONAS T., MEISTER R., 2009: Comparison of different automatic methods for estimating snow water equivalent. *Cold Regions Science and Technology*. (57), 107-115.

ENGEL Ch., HASTINGS R., GIOVANDO J., DAHL T., GABEL E., DUNCAN C., 2022: *Summary of Ground-Based Snow Measurements for the Northeastern United States*. ERDC, Vicksburg.

EOS, ©2023: *Earth Observing System* (online) [cit. 2023-03-13]. dostupné z <<https://eosps.nasa.gov/>>.

ESA, ©2023: *Evropská kosmická agentura* (online) [cit. 2023-03-14]. dostupné z <<https://www.esa.int/>>.

Eumetsat, ©2023: *Meteosat series* (online) [cit. 2023-03-17]. dostupné z <<https://www.eumetsat.int/>>.

FIERZ C., ARMSTRONG R., DURAND Y., ETCHEVERS P., GREENE E., MCCLUNG D., 2009: *The International Classification for Seasonal Snow on the Ground*. UNESCO-IHP, Paříž.

FLOREO, ©2023: *FLOREO* (online) [cit. 2023-03-16]. dostupné z <<http://floreo.cz/>>.

- FREI A., TEDESCO M., LEE S., FOSTER J., HALL D., KELLY R., ROBINSON D., 2012: A review of global satellite-derived snow products. *Advances in Space Research*. 50 (8), 1007-1029.
- GARDNER A. S., et SHARP M. J., 2010: A review of snow and ice albedo and the development of a new physically based broadband albedo parameterization. *JGR Earth Surface*. 115 (F1).
- GIULIANI M., CASTELLETTI A., FEDOROV R., FRATERNALI P., 2016: Using crowdsourced web content for informing water systems operations in snow-dominated catchments. *Hydrology and Earth System Science*. (20), 5049-5062.
- HALL D. K., 1995: Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*. 54(2), 127-140.
- HALL D. K., RIGGS A. R., SALOMONSON V. V., DIGIROLAMO N. E., BAYR K. J., 2002: MODIS snow-cover products. *Remote Sensing of Environment*. 83(1-2), 181-194.
- HALL D. K., KELLY K., FOSTER J., CHANG A., 2005: Estimation of Snow Extent and Snow Properties. In: *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd, New Jersey: 811-830.
- HALL D. K., RIGGS G., DIGIROLAMO N., ROMÁN M., 2019: Evaluation of MODIS and VIIRS cloud-gap-filled snow-cover products for production of an Earth science data record. *Hydrology and Earth System Sciences*. 23(12), 5227-5241.
- HAVLÍK, J., 2008. *Možnosti dpz a gis pro zhodnocení parametr sněžové pokrývky*. Vysoká škola báňská. Technická fakulta. Hornicko-geologická fakulta. 129 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep. DSpace VŠB-TUO.
- HRUŠKOVÁ, K., 2006. *Modelování odtoku z tajícího sněhu v povodí horního Hronu*. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. 106 s. (disertační práce). „nepublikováno“. Dep. IS MU v Brně.
- HUANG, W., 2014: Using Ncl to Visualize and Analyse of NASA/NOAA Satellite Data in Format of Netcdf, Hdf, Hdf-Eos. *American Geophysical Union*. (19), 3751-3774.

JELÍNEK, J., 2008. *Akumulace a tání sněhové pokrývky v povodí Rokytky v hydrologických letech 2007 a 2008*. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta. Katedra fyzické geografie a geoekologie. 85 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep. DS Space CUNI.

KAWANISHI T., SEZAI T., ITO Y., IMAOKA K., TAKESHIMA T., INSHIDO Y., SHIBATA A., MIURA M., INAHATA H., SPENCER R., 2003: The Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System (AMSR-E), NASDA's contribution to the EOS for global energy and water cycle studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 41 (2), 184-194.

KING M. D., et PLATNICK S, 201.: 1.02 - The Earth Observing System (EOS). In: *Comprehensive Remote Sensing*. Elsevier, Amsterdam: 7-26. ISBN 9780128032213.

KOCH F., HENKEL P., APPEL F., 2019: Retrieval of Snow Water Equivalent, Liquid Water Content, and Snow Height of Dry and Wet Snow by Combining GPS Signal Attenuation and Time Delay. *Water Resources Research*. (55), 4465-4487.

KÖNIG M., WINTHER J., ISAKSSON E., 2001: Measuring snow and glacier ice properties from satellite. *Rev. Geophys*. 39 (1), 1-27.

KŘÍSTEK Š.,URBAŇCOVÁ N., HOLOUŠA J., TOMEČEK P., 2011: *Měření vlastností sněhové pokrývky v lese a mimo les: certifikovaná metodika*. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti. Lesnický průvodce, Strnady. ISBN 978-80-7417-044-7.

Landsat, ©2023: Landsat Science (online) [cit. 2023-03-17]. dostupné z <<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>>.

LATERNER, M. Ch., 2002: *Snow and avalanche climatology of Switzerland*. ETH Zürich, Zürich: 140.

LIE Y., PETERS-LIDARD CH., KUMAR S., FOSTER J. L., SHAW M., TIAN M., FALL G. M., 2013: Assimilating satellite-based snow depth and snow cover products for improving snow predictions in Alaska. *Advances in Water Resources*. 54, 208-227.

Light, ©2023: Light. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. Wikimedia Foundation, San Francisco. (online) [cit. 2023-03-30]. dostupné z <<https://en.wikipedia.org/wiki/Light>>.

LYU S., HUANG H., LI Z., WANG L., SUN X., LIU S., 2020: Evaluation of Forest Snow Cover Mapping Performance of Landsat-8 and Sentinel-2A Using NDFS and NDSI. *Remote Sensing*. 12 (4), 601.

MASEK J. G., WULDER M. A., MARKHAM B., MCCORKEL J., CRAWFORD C. J., STOREY J., JENSTROM D., 2020: Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity. *Remote Sensing of Environment*. 248(1), 1-13.

MODIS, ©2023: MODIS web (online) [cit. 2023-01-29]. dostupné z <<https://modis.gsfc.nasa.gov>>.

NAKAYA, U., 1954: *Snow Crystals*. Harvard University Press, Massachusetts.

NASA, ©2023a: MODIS and VIIRS Snow and Ice Global Mapping Project. (online) [cit. 2023-03-16]. dostupné z <<https://modis-snow-ice.gsfc.nasa.gov/>>.

NASA, ©2023: *Terra*. (online) [cit. 2023-01-29]. dostupné z <<https://terra.nasa.gov/>>

NĚMEC, L., 2006: *Zhodnocení spolehlivosti a účinnosti systému měření výšky sněhové pokrývky a její vodní hodnoty*. In. Vyhodnocení jarní povodně 2006 na území ČR. ČHMU, Praha: A38-A53.

NOAA, ©2023: STAR JPSS Cross-Track Infrared Sounder (CrIS). (online) [cit. 2023-03-17]. dostupné z <<https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/CrIS.php>>.

NOHRSC, ©2023: National Operational Hydrologic Remote Sensing Center (online) [cit. 2023-03-13]. dostupné z <<https://www.nohrsc.noaa.gov/>>.

Norut Geo Viz, ©2023: Norut Geo Viz (online) [cit. 2023-03-13]. dostupné z <<http://ngv.norut.no/>>.

NSIDC, ©2023: National Snow & Ice Data Center (online) [cit. 2023-03-31]. dostupné z <<https://nsidc.org/home>>.

PARSONS M., CHAPIN III F., LAZZARA M., 2019: NSIDC: Advancing snow and ice data stewardship and discovery. *Polar Geography*. 42 (3), 175-189.

POMEROY, J. W. et BRUN E., 2001: *Physical properties of snow: Snow Ecology*. 45.126 s.

QUELLE G. et RICHTER R., 2019: Introduction to Remote Sensing. In: THENKABAIL, P. *Remote Sensing Handbook, Three Volume Set*. 1st Edition. CRC Press, Florida: 1-22. ISBN 9780429188190.

REES, W. G., 2006: *Remote Sensing of Snow and Ice*. CRC Press, Florida. ISBN 978-0-415-29831-5.

RIGGS G.A., HALL D. K., ROMÁN M. O., 2017: Overview of NASA's MODIS and Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) snow-cover earth system data records. *Journal of Earth System Science*. 9 (2), 765-777.

SEIDEL K. et. MARTINEC J., 2004: *Remote Sensing in Snow Hydrology*. XXII. Springer, Berlín. ISBN 978-3-540-40880-2.

Sentinel, ©2023: Sentinel User Guides (online) [cit. 2023-03-17]. dostupné z <<https://sentinels.copernicus.eu/>>.

SHARMA R. et PANDEY P. C., 2018: Mapping of snow cover using remote sensing data: A review. *Journal of Earth System Science*. 127(5), 73.

SINGH P. et SINGH V., 2001: *Snow and glacier hydrology*. Kluwer Academic Publishers. Boston.

SLF, ©2023: About the SLF (online) [cit. 2023-03-14]. dostupné z <<https://www.slf.ch/en/index.html>>.

SNEHMANI , SINGH M., GUPTA R. D., BHARDWAJ A., JOSHI P., 2015: Remote sensing of mountain snow using active microwave sensors: a review. *Geocarto International*. 30 (1), 1-27.

SOMMER. 2016: *Product Leaflet Snow Pack Analyser SPA*. SOMMER GmbH, Koblach, 4. dostupné z <<https://www.sommer.at/en/>>.

SOUKUPOVÁ, J., 2011: *Atmosférické procesy: (základy meteorologie a klimatologie)*. Vyd. 6. Česká zemědělská univerzita, v Praze. ISBN 978-80-213-2234-9.

STENGEL M., 2013: The SEVIRI high-resolution visible (HRV) channel: Characterisation and applications. *Atmospheric Research*. 125 (1), 16-32.

STRUM M., TARAS B., LISTON G., DERKSEN C., JONAS T., LEA J., 2010: Estimating Snow Water Equivalent Using Snow Depth Data and Climate Classes. *Journal of Hydrometeorology*. 11 (6).

SYKE, ©2023 Mapping snow and Winter Resources (online) [cit. 2023-03-13]. dostupné z <<https://www.syke.fi/en/>>.

ŠPATOVÁ, Z., 2010. Využití dat dálkového průzkumu země pro určování vodní hodnoty sněhu. Univerzita Karlova. Přírodovědecká fakulta. Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. 121 s. (diploková práce). „nepublikováno“. Dep. DS Space CUNI.

TEDESCO, M., 2019: *Remote Sensing of Snow and Ice*. CRC Press, Florida. ISBN 978-1-138-05010-5.

THÉPAUT J., DEE D., ENGELEN R., PINTY B., 2018: The Copernicus Programme and its Climate Change Service. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, Valencia: 1591-1593.

WEBER M., KOCH F., BERNHARDT M., SCHULZ K., 2021: The evaluation of the potential of global data products for snow hydrological modelling in ungauged high-alpine catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*. 25, 2869-2894.

ZHANG X., WU L., LI J., ZHANG L., 2021: A multi-index fusion algorithm for snow cover mapping in the eastern Tianshan Mountains. *International Journal of Remote Sensing*. 42 (3), 952-973.