

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

**KATEDRA APLIKOVANÉ GEOINFORMATIKY A ÚZEMNÍHO
PLÁNOVÁNÍ**



**MONITOROVÁNÍ SUPRA-GLACIÁLNÍCH JEZER
POMOCÍ DRUŽICOVÝCH DAT**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí práce: Mgr. JAN KROPÁČEK, Ph.D.

Diplomant: Bc. IVA BATRLOVÁ

2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Iva Batrlová

Krajinné a pozemkové úpravy

Název práce

Monitorování supra-glaciálních jezer pomocí družicových dat

Název anglicky

Monitoring of supra-glacial lakes by means of remote sensing

Cíle práce

Supra-glaciální jezera vznikají akumulací povrchového odtoku tavných vod v depresích ablačních zón ledovců. Jejich výskyt se zvyšuje s vlivem klimatické změny s rostoucí teplotou. Jejich náhlé odvodnění představuje významné riziko ve velehorských oblastech. Monitoring výskytu a nárůstu těchto jezer je nezbytným předpokladem pro včasné varování. Moderní družicové systémy představují slibný zdroj dat pro monitoring glaciálních jezer. Evropská konstelace dvou družic Sentinel-1A a 1B vykazuje vysoké temporální rozlišení a rychlou dostupnost dat. Potenciál těchto dat pro identifikaci glaciálních jezer bude testován pro vybranou velehorskou oblast.

Metodika

Pro zpracování volně dostupných dat Sentinel-1 budou použity nástroje aplikace SNAP poskytované Evropskou kosmickou agenturou. Budou staženy snímky, tak aby vytvořily časovou řadu umožňující zkoumání sezonních a meziročních změn rozsahu jezer studované oblasti. Po předzpracování zahrnující kalibraci, korekci terénu, georeferenci a filtraci budou pomocí prahování intenzity vylišeny vodní plochy. Zjištěné změny budou kvantitativně a kvalitativně zanalyzovány.

Doporučený rozsah práce

40 – 60 stran

Klíčová slova

glaciální jezera, dálkový průzkum Země, Sentinel-1

Doporučené zdroje informací

Bahr, D. B., Singh, V. P., Singh, P., & Haritashya, U. K. (2011). Encyclopedia of snow, ice and glaciers, Springer Netherlands, ISBN 978-90-481-2642-2, 1253 pages

Čihař, Martin, 2000, Příroda hor a velehor, Karolinum, 148 str., 1. vydání, ISBN 8024601370

Kropáček, J., et al. "Repeated glacial lake outburst flood threatening the oldest Buddhist monastery in north-western Nepal." Natural Hazards and Earth System Sciences 15.10 (2015): 2425-2437.

Quincey, D. J., et al. "Early recognition of glacial lake hazards in the Himalaya using remote sensing datasets." Global and Planetary Change 56.1-2 (2007): 137-152.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FŽP

Vedoucí práce

Mgr. Jan Kropáček, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované geoinformatiky a územního plánování

Elektronicky schváleno dne 11. 3. 2019

doc. Ing. Petra Šímová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 11. 3. 2019

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 29. 03. 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením Mgr. Jana Kropáčka, Ph.D. a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury.

Dále prohlašuji, že tištěná verze této práce se shoduje s verzí odevzdanou přes Univerzitní informační systém.

V Praze 18.04.2019

.....

podpis

Poděkování

Zde bych chtěla poděkovat svému vedoucímu Mgr. Janu Kropáčkovi, Ph.D. za čas, který věnoval mně a svým diplomantům na pořádaných seminářích, za jeho trpělivost při poskytování rad, a především za zprostředkování zajímavého tématu.

Dále poděkování patří všem, kteří mě doprovázeli na mé cestě studiem.

Abstrakt

Radarová data pořízená pomocí vesmírných družic zaznamenala v posledních letech vysoký nárůst frekvence snímání a došlo i ke značnému zlepšení prostorového rozlišení dat, která nejsou závislá na denní době ani počasí, především na oblačnosti. Tyto družice často nabízejí globální pokrytí a díky tomu roste potenciál využití radarových dat pro sledování změn na zemském povrchu i v obtížně dostupných nebo vysokohorských oblastech. Tato práce se věnuje potenciálnímu využití radarových dat z konstelace družic Sentinel-1A a Sentinel 1-B pro identifikaci glaciálních jezer. S vlivem klimatické změny se výskyt glaciálních jezer zvyšuje a při jejich náhlém odvodnění dochází ke škodám na infrastruktuře níže položených sídel. Monitoring výskytu a nárůstu těchto jezer je stěžejní pro včasné varování před možnou katastrofou především ve vysokohorských oblastech.

Zájmovou oblastí této práce je Merzbacherovo jezero, tvořené soustavou jezer Hořejší M. jezero a Spodní M. jezero, ležící mezi ledovci Severní a Jižní Inylček ve východním cípu státu Kyrgyzstánu, které je známé pro svou periodicitu plnění a prázdnění způsobující každoroční ledovcové záplavy (GLOF). Zpracování dat proběhlo v programu SNAP poskytovaném Evropskou kosmickou agenturou, kde bylo hlavním cílem získat data vylišující vodní plochy, která byla následně užita k výpočtu rozloh těchto ploch a jejich porovnání v rámci sledovaného období.

Výsledky analyzovaných dat z období 15.10.2014 - 27.2.2019 potvrzují výše zmíněnou periodicitu. Voda v Hořejším M. jezeru se v pozorovaném období vyskytuje v určité míře celoročně, avšak k plnění Spodního M. jezera dochází dle výsledků až na začátku května s následným vyprázdněním v červenci (2015-2017) nebo v srpnu (2018). Rozsáhlé pozorovací řady již z počátku 20. století prezentují data vyprázdnění Merzbacherova jezera a začátku povodní, ovšem mapováním rozloh vodních ploch tohoto jezera v průběhu jeho plnění a před vyprázdněním je tato práce unikátní. Potenciál radarových dat vykazuje schopnost mapování ledovcových jezer ve velehorských oblastech spolu s vhodně zvolenými metodami jejich zpracování.

Klíčová slova: Sentinel-1, SAR, dálkový průzkum Země, ledovcové záplavy (GLOF), glaciální jezera, ledovcová jezera

Abstract

Space-based radar data has seen a significant increase in scanning frequency over recent years, also there has been a rapid improvement in spatial resolution of data that is not dependent on daytime or weather conditions, especially cloud cover. These satellites often offer global coverage, which increases the potential for radar data to be used in tracking changes on the Earth's surface and in hard to reach or alpine areas. This thesis deals with the potential use of radar data from the Sentinel-1A and Sentinel-1B satellite constellation to identify and monitor glacial lakes. As a result of climate change, the count of glacial lakes is increasing. With a sudden drainage of such lakes, damage to the infrastructure of the lower-situated settlements occurs. Monitoring the occurrence and growth of these lakes is crucial for early warning before a possible disaster, especially in alpine areas.

The area of interest in this thesis is Lake Merzbacher, consisting of a system of two lakes - Upper Lake Merzbacher and Lower Lake Merzbacher, lying in between the South and North Inylchek Glaciers in the eastern part of Kyrgyzstan. Lake Merzbacher is known for its periodic filling and draining which causes annual glacier lake outburst floods (GLOF). The data processing was carried out in the SNAP software provided by the European Space Agency. The main objective was to acquire data of water bodies, which were subsequently used to calculate their areas and compare them within the reference period.

Results of the analysed data from 15.10.2014 - 27.2.2019 confirm this periodicity mentioned above. The water in the Upper Lake Merzbacher occurs in some extent during the observed period in the whole year, however the filling of the Lower Lake Merzbacher occurs only at the beginning of May with subsequent drainage in July (2015-2017) or August (2018). Extensive observation lines from the beginning of the 20th century present the dates of emptying of Lake Merzbacher and the beginning of floods but mapping the water area of this lake during and before its emptying is what makes this thesis unique. The potential of radar data shows the ability to map glacial lakes in mountainous areas along with appropriate processing methods.

Key words: Sentinel-1, SAR, remote sensing, glacial lake outburst flood (GLOF), glacial lakes

Obsah

Seznam použitých zkratk.....	1
1 Úvod.....	2
2 Cíle práce	4
3 Literární rešerše.....	5
3.1 Dálkový průzkum Země – DPZ	5
3.2 Elektromagnetické záření	5
3.3 Mikrovlnné záření	6
3.3.1 Radar	6
3.3.2 Polarizace	8
3.3.3 SAR – Synthetic aperture RADAR.....	8
3.4 Zkreslení reliéfu radarového snímku.....	9
3.5 Sentinel–1.....	10
3.5.1 Sentinel-1 - polarizace.....	12
3.5.2 Sentinel-1 - úrovně zpracování	12
3.5.3 Sentinel-1 využití	13
3.6 Využití SAR pro mapování vodních ploch	13
3.7 Mapování v ledovcových oblastech pomocí systémů SAR	14
3.8 Glaciální - Ledovcová jezera.....	14
3.8.1 Supraglaciální jezera	15
3.8.2 Proglaciální jezera.....	15
3.8.3 Jezera hrazená morénou	16
3.8.4 Jezera hrazená ledovcem.....	16
3.9 Ledovcové záplavy - GLOF	16
3.9.1 Jökulhlaup	17
4 Zájmové území.....	18
4.1 Kyrgyzstán - Ťan-Šan.....	18

4.2	Merzbacherovo jezero	19
5	Metodika	23
5.1	Vstupní data.....	23
5.2	Pre-processing	25
5.3	Processing.....	27
5.4	Post-processing.....	28
5.5	Analýza oblastí výskytu vodních ploch.....	30
6	Výsledky	31
6.1	Sledování vývoje vodních ploch v jednotlivých letech.....	31
6.1.1	2015.....	32
6.1.2	2016.....	33
6.1.3	2017.....	33
6.1.4	2018.....	34
6.2	Vývoj vodních ploch za celé sledované období	35
6.3	Analýza oblastí výskytu vodních ploch.....	38
7	Diskuse.....	40
8	Závěr	43
9	Přehled literatury a použitých zdrojů	44
10	Přílohy	50

Seznam použitých zkratek

ASF DAAC	Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center
DPZ	Dálkový průzkum Země
ESA	European Space Agency
EW	Extra Wide Swath Mode - režim snímání
GLIMS	Global Land Ice Measurements from Space
GLOF	Glacial lake outburst flood
GRD	Ground Range Detected – typ produktu
InSAR	Interferometric SAR
IW	Interferometric Wide Swath Mode – režim snímání
OSN	Organizace spojených národů
PPI RADAR	Plan position indicator RADAR
RADAR	Radio Detection and Ranging
SAR	Synthetic Aperture RADAR
SLAR	Side Looking Airborne RADAR
SLC	Single Look Complex – typ produktu
SM	Strim Map Mode – režim snímání
SNAP	Sentinel Application Network
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
USGS	U.S. Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator - Univerzální transverzální Mercatorův systém souřadnic
WGS84	World Geodetic System 1984 - světový geodetický systém 1984
WV	Wave Mode - režim snímání

1 Úvod

Díky technologickému vývoji roste v posledních letech obliba radarových družicových dat, která jsou nyní snadno dostupná a nabízí uspokojivé časové i prostorové rozlišení. Použití dat z radarových snímků je výhodné především díky tomu, že téměř nejsou ovlivněny počasím, oblačností nebo denní dobou. Jejich využití je vhodné také v těžce dostupných či vysokohorských oblastech, kde je obtížné zprostředkovat terénní měření. V situacích, kdy dojde k přírodní či jiné katastrofě mohou být radarové snímky díky těmto vlastnostem spolehlivějším zdrojem informací než snímky pořízené optickými senzory právě díky výše zmíněným vlastnostem.

Jedním z častých využití tohoto typu dat je mapování vodních ploch na otevřeném povrchu, toto je obecně považováno za snadné a vodní plochy bývají lehce identifikovatelné vzhledem ke svému hladkému povrchu, který rozptýlí radarový signál směrem od antény. V oblastech s vysokou členitostí terénu například ve vysokohorských oblastech je však mapování obtížnější. Často jsou vodní plochy špatně čitelné a především zde dochází k efektu radarového stínu (Duy, 2015). Metodami automatizovaného mapování vodních ploch pomocí SAR snímání se zabývá například Westerhoff et al. (2013), konkrétně extrakcí vodních ploch z dat z družic Sentinel-1 se zabývá Duy (2015) nebo Huang et al. (2018) a mapováním ledovcových jezer z dat družic Sentinel-1 Wangchuk, Bolch et Zawadzki (2019).

Základní problematikou této diplomové práce je monitorování ledovcových jezer prostřednictvím radarových snímků z konstelace družic Sentinel-1A a 1B, která nabízí časovou řadu snímků od roku 2014 až po současnost. Se stávající klimatickou změnou může ledovcových jezer přibývat a následky ledovcových záplav mohou být závažnější, neboť rovnováha stavu ledovcové hmoty je přímo spojena s každoročními atmosférickými podmínkami. Změny v atmosférických podmínkách, především nárůst průměrných teplot v posledních dekádách, významně ovlivňují hmotnostní a energetickou bilanci ledovců, které mají za následek jejich tání a ubývání a s tím spojenou i tvorbu a průvaly ledovcových jezer (Bahr et al., 2011). Monitorování ledovcových oblastí a jezer je důležité nejen pro včasné varování před blížícími se katastrofickými událostmi, ale také pro lepší pochopení těchto jevů.

První část práce se věnuje literární rešerši, která se zabývá pojmy spojenými s problematikou dálkového průzkumu Země a radarového snímání. Dále osvětluje

pojmy spojené s ledovcovými jezery, ledovcovými záplavami (GLOF) a jejich propojení se změnou klimatu.

Druhá část práce je věnována praktické části, která se zabývá předzpracováním a zpracováním získaných dat v programech SNAP a ArcGIS. A dále se zabývá možnostmi využití těchto dat pro monitorování glaciálních jezer a analyzováním zjištěných výsledků ze zájmové oblasti Merzbacherova jezera, především vylišením rozsahů vodních ploch v průběhu jednotlivých let sledovaného období. Tato oblast byla vybrána pro svou specifickou periodicitu plnění a prázdnění Merzbacherova jezera. V důsledku náhlého každoročního prázdnění jezera zde dochází k pravidelným ledovcovým záplavám. Ty následně mohou činit škody na infrastruktuře zasažených oblastí. Pro tuto oblast jsou navíc dostupné i rozsáhlé pozorovací řady začínající již na počátku 20. století (Glazirin, 2010; Kingslake et Ng, 2013).

2 Cíle práce

Hlavním cílem práce je zjistit využitelnost radarových dat z konstelace družic Sentinel-1A a Sentinel-1B pro identifikaci glaciálních jezer. Vzhledem k vysokému temporálnímu rozlišení a rychlé dostupnosti těchto dat je dalším cílem práce posouzení vhodnosti tohoto zdroje dat pro pravidelný monitoring výskytu glaciálních jezer a jejich změn v čase.

Potenciál těchto dat bude testován ve vybrané velehorské oblasti v Kyrgyzstánu na příkladu Merzbacherova jezera. Budou sledovány roční a meziroční změny v rozsahu vodních ploch Spodního a Hořejšího Merzbacherova jezera, které budou kvantitativně a kvalitativně zanalyzovány.

3 Literární rešerše

3.1 Dálkový průzkum Země – DPZ

Dálkový průzkum Země (DPZ), známý jako remote sensing, je v moderní době nepostradatelný nástroj, který má velmi rozsáhlé využití nejen v geografii, ale i v mnoha dalších vědních oborech a odvětvích. Při hledání definice tohoto pojmu lze narazit na více interpretací, jež však mají společný základ. Definováním pojmu DPZ se zabývá například Fussell et Rundquist (1986), který shrnuje mezi autory velmi oblíbenou obecnou definici:

„Dálkový průzkum je získávání informací o objektu bez přímého kontaktu s tímto objektem.“

Podrobnější výklad obsahuje definice užitá Organizací spojených národů (OSN) na plenárním zasedání v roce 1986 (Joseph, 2005):

„Dálkový průzkum Země znamená snímání zemského povrchu z vesmíru s využitím vlastností emitovaných, odražených a ohnutých elektromagnetických vln za účelem zlepšování správy přírodních zdrojů, využití krajiny a ochrany životního prostředí.“

3.2 Elektromagnetické záření

V rámci DPZ hraje elektromagnetické záření hlavní roli při získávání informací o objektech a jevech, které se vyskytují na Zemském povrchu. Kromě absolutně černého tělesa je každý objekt zdrojem elektromagnetického záření a také může odrážet záření emitované jinými objekty. Toto záření se skládá z elektrického a magnetického pole, která se příčně na sebe vlní podél stejné osy. Elektromagnetické záření může být charakterizováno svou vlnovou délkou, amplitudou, frekvencí a fází (Campbell et Wynne, 2011).

Při pozorování objektů má pro člověka největší význam viditelné světlo, na které je lidské oko uzpůsobené. Viditelné světlo však tvoří jen jednu z mnoha částí elektromagnetického spektra, avšak díky moderním technologiím je možné zobrazit i záření jiných vlnových délek (Dobrovolný, 1998). Základní dělení pásem elektromagnetického spektra je uvedeno v tab. 1.

Tab. 1: základní dělení elektromagnetického spektra (Campbell et Wynne, 2011)

Typ záření	Vlnová délka
Gama záření	<0,03 nm
Rentgenové záření	0,03-300 nm
Ultrafialové záření	0,3-0,38 μm
Viditelné světlo	0,38-0,72 μm
Infračervené záření	
Blízké infračervené záření	0,72-1,30 μm
Střední infračervené záření	1,30-3 μm
Dlouhé infračervené záření	7 μm -1 mm
Mikrovlnné záření	1 mm-30 cm
Rádiové záření	>30 cm

3.3 Mikrovlnné záření

U optického snímání nastává řada problémů při pořizování snímků. Nelze je plně využívat v noci nebo například při zvýšené oblačnosti. Tyto problémy však mizí u snímání v mikrovlnné části spektra.

Snímání zemského povrchu v mikrovlnné části spektra umožňují aktivní metody snímání prostřednictvím radaru nebo pasivní metody snímání prostřednictvím mikrovlnného radiometru (Dobrovolný, 1998).

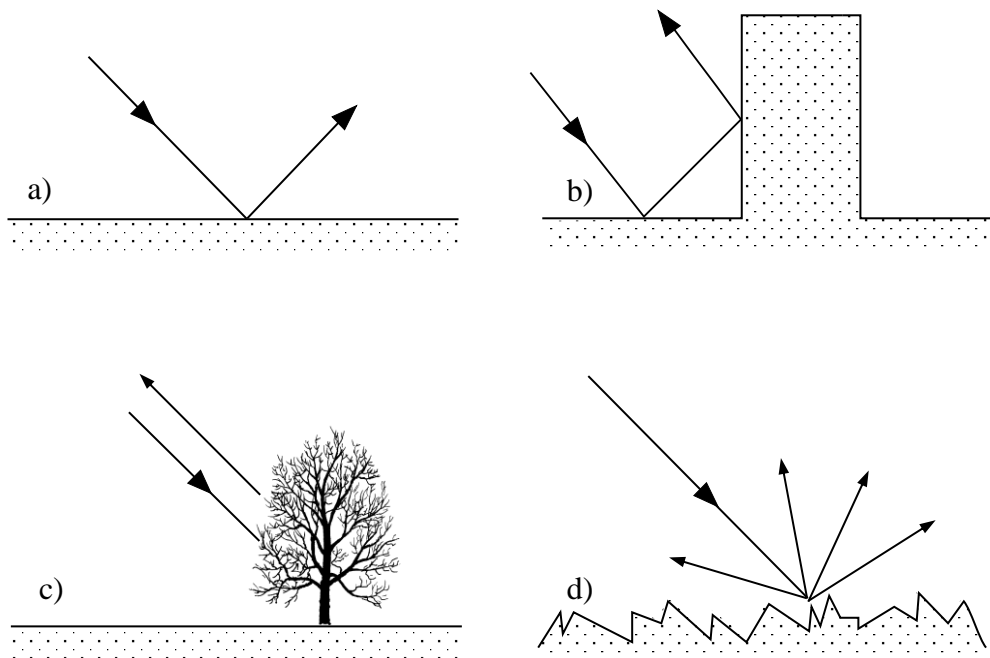
3.3.1 Radar

Radar (Radio Detection and Ranging) je zařízení vybavené vlastním zdrojem záření, které vysílá krátký intenzivní mikrovlnný signál a po sléze zaznamenává navracené části tohoto signálu po odrazu od objektů. Díky této technologii je možné určit přítomnost i polohu objektů v jakoukoliv denní dobu, za jakéhokoliv počasí. Radar je v oblasti mikrovlnného záření schopen pronikat mlhou, jemným deštěm, mraky i smogem (Pavelka et Halounová, 2008). Radarový senzor lze umístit na družice, letadla či na zemský povrch (Dobrovolný, 1998).

Rozlišují se radary:

- zobrazující
 - radar s reálnou aperturou – boční radar (Real aperture radar) SLAR (Side Looking Airborne RADAR) – umístěné na nosičích letadel
 - radar se syntetickou aperturou SAR (Synthetic Aperture RADAR) – umístěné na družicích
- nezobrazující
 - Dopplerův radar – zjišťování rychlosti pohybu vozidel díky Dopplerovu principu frekvenčních posunů ve vyslaném a přijatém signálu (Dobrovolný, 1998).
 - PPI radar (Plan Position Indicator) – využití v meteorologii, při navigaci nebo řízení dopravy, zobrazuje objekty v dosahu rotující antény v rovinném zobrazení (Pavelka et Halounová, 2008).

Míra odrazivosti signálu je závislá na koeficientu odrazivosti daného povrchu. Typ odrazivosti lze rozdělit na spekulární (přímý) a difusní (rozptýlený). Rovné hladké povrchy se chovají jako zrcadlo a odráží signál opačným směrem, nedochází tak k navrácení signálu zpátky k radarovému zařízení a tato místa se poté na snímku zobrazují tmavá až černá. U uměle vytvořených objektů jako jsou například budovy dochází k rohovému odrazu. Tyto objekty svírají se zemským povrchem pravý úhel, tím pádem dochází k přímému odrazu a navrácení celého signálu, který se na snímku projeví výrazně světlou barvou. U vegetačního pokryvu nebo mořského ledu dochází k rozptýlení záření, které navíc vystupuje z mnoha obtížně definovatelných míst v rámci svého objemu, na snímku se tyto povrchy jeví světlejší barvou. Podobně nerovné, drsné povrchy rozptýlí signál do všech směrů, z některých se vrátí zpět k zařízení a na snímku se jeví jako světlé (Richards et Jia, 2006). Jednotlivé typy odrazivosti jsou zobrazeny na obr. č.1.



Obr. 1: a) spekulární odraz od rovné plochy, b) rohový odraz, c) objemový odraz od vegetace, d) difusní odraz od nerovné plochy; upraveno (Richards et Jia, 2006)

3.3.2 Polarizace

Polarizace mikrovlnného záření odpovídá orientaci elektrického pole během šíření signálu a ovlivňuje rozpoznávání typů objektů. Rozeznává se horizontální a vertikální polarizace (Richards et Jia, 2006). Horizontální polarizace se využívá například pro zjištění síly přemrzlého sněhu, protože zde je záření propouštěno povrchovou slupkou, zatímco záření vertikálně polarizované bývá ledovou vrstvou pohlceno. Porovnáním dvou záběrů s různou polarizací lze zjistit, které povrchy se zobrazují odlišně a následně získat informace o drsnosti povrchu nebo pronikání signálu do vrstev sedimentů či vegetace (Pavelka et Halounová, 2008).

3.3.3 SAR – Synthetic aperture RADAR

Radar se syntetickou aperturou je zařízení umožňující pořizování radarových snímků z vesmíru. SAR je ve skutečnosti vybaven krátkou anténou, která je syntetizována využitím pohybu družice po oběžné dráze. Dochází tak k transformaci krátké antény na anténu dlouhou pomocí delšího úseku dráhy (Dobrovolný, 1998).

SAR snímek je složen z informace o amplitudě a fázi navracené z dané oblasti. Amplituda ukazuje odrazivost, zatímco fáze okamžitou vzdálenost od senzoru k ozářenému bodu (Salvi et al., 2012).

V rámci zpracování radarových dat vznikla radarová interferometrie neboli InSAR (Interferometric SAR). Jedná se o technologii měřící topografii zemského povrchu a její změny v čase (Rosen et al., 2000). Již od 90. let 20. století se využívá například při analyzování terénních deformací. Fázový rozdíl ze dvou nebo více radarových snímků pořízených se stejnou záznamovou geometrií lze využít k výpočtu třírozměrného modelu povrchu Země. InSAR najde široké využití například v seismologii, hydrogeologii, vulkanologii nebo glaciologii a jiných vědách (Salvi et al., 2012).

3.4 Zkreslení reliéfu radarového snímku

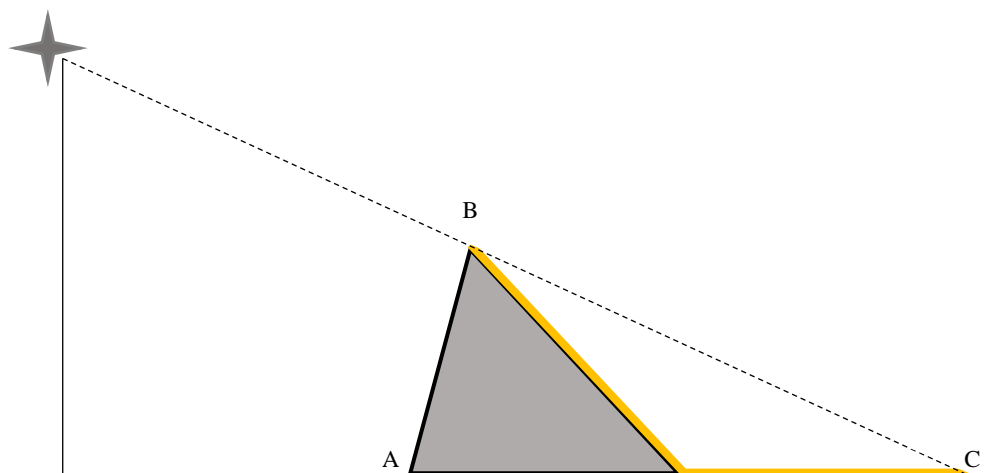
Jelikož u radarového snímání dochází k měření vzdálenosti objektů od antény, může v některých případech docházet k pozičním chybám sledovaných objektů. Mezi nejčastější zkreslení ve vysokohorských oblastech patří zhuštění signálu, zpětný překryv a radarový stín. Tyto jsou schematicky znázorněny na obr. 2.

Ke zpětnému překryvu (layover) dochází, pokud radarový signál zachytí nejdříve vrchol objektu a až poté jeho základnu. Signál z vrcholu objektu bude přijat dříve a vrchol objektu se potom jeví blíže a překrývá tak svou základnu. Taková místa jsou pak na snímku vylišena výrazně světlou barvou.

Zhuštění signálu (foreshortening) je v podstatě opakem zpětného překryvu. Vzniká, když radarový signál dosáhne dříve spodní části sledovaného objektu, než dojde k jeho vrcholu. U objektů jako jsou hory se může jejich svah jevit kratší a bude zobrazen nesprávně. Místa, kde došlo ke zhuštění signálu budou mít na snímku také světlou barvu (CCRS, 2014).

Radarový stín (radar shadow) je často následkem zpětného překryvu a zhuštění signálu. Jedná se o oblasti, které jsou pro radarové paprsky nedosažitelné, může se jednat například o odvrácené strany terénních vrcholů, příkrých svahů, nebo budov. V těchto oblastech nedochází k návratu vyslaného signálu a tyto oblasti se pak na

výsledném snímku jeví jako černé. Rozsah radarového stínu je ovlivněn úhlem dopadu radarového signálu (Kropatsch et Strobl, 1990).



Obr. 2: terénní zkresení radarového snímku; oblast na obrázku mezi body B a C odpovídá oblasti radarového stínu nezasáženého radarovým signálem, pokud signál dorazí nejdříve k bodu A a poté k bodu B, jedná se o tzv. zhuštění signálu, pokud signál dorazí nejdříve k bodu B a potom k bodu A, jedná se o efekt zpětného překryvu

3.5 Sentinel-1

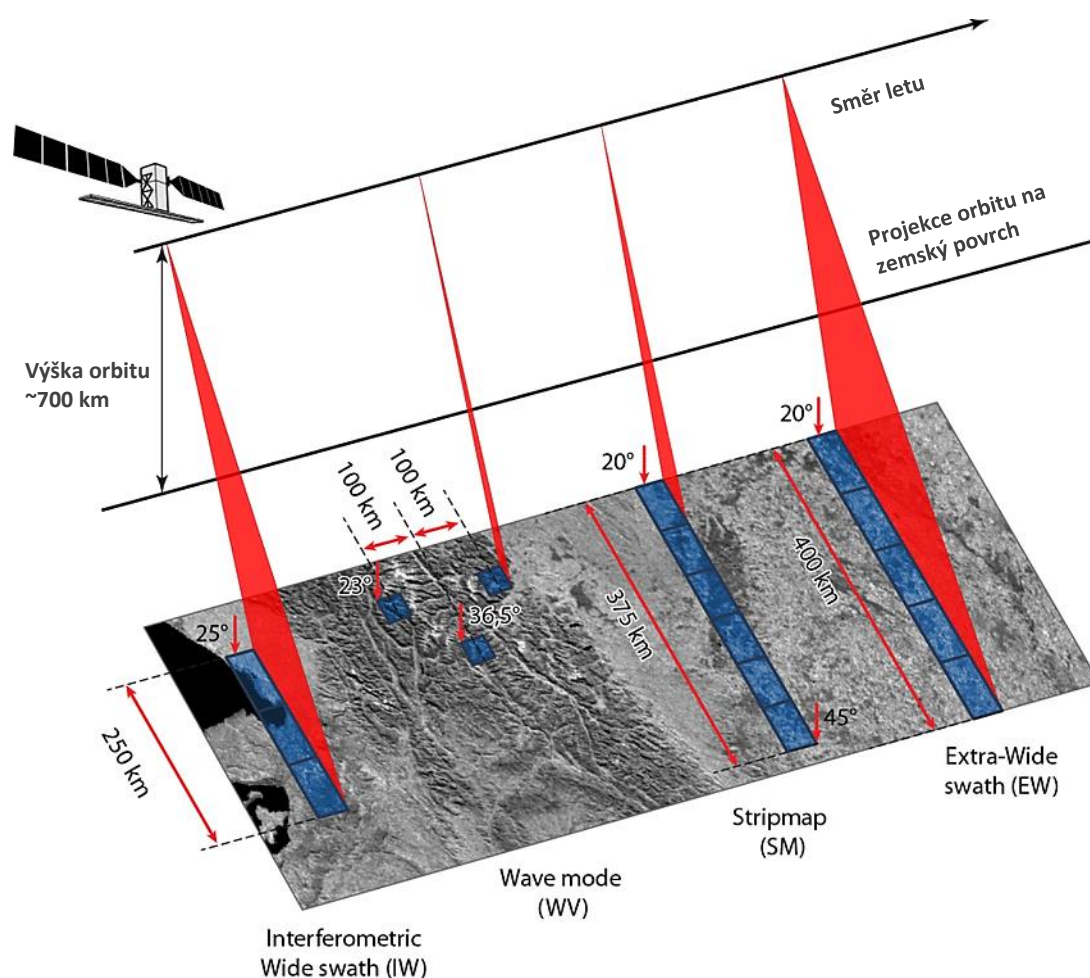
Sentinel-1 je mise kontinuálního radarového snímání zemského povrchu se syntetickou aperturou (SAR) v pásmu C skládající se z konstelace družic Sentinel-1A a Sentinel-1B (Torres et al., 2012).

Sentinel-1A se v dubnu 2014 stala první družicí programu Copernicus vedeným Evropskou kosmickou agenturou (ESA - European Space Agency), v dubnu 2016 byl doplněn o družici Sentinel-1B, která obíhá stejnou dráhu s posunem o 180° (ESA, 2016). Temporální rozlišení každé družice nad rovníkem je 12denní cyklus o 175 orbitech. V konstelaci dvou družic činí časové rozlišení pouze 6 dní. Sentinel-1A a Sentinel-1B společně zajišťují globální pokrytí a kontinuální poskytování dat pro uživatelské služby ESA a Copernicus (Torres et al., 2012). Data z družic Sentinel-1 jsou veřejně dostupná po krátké registraci na webových stránkách <https://sentinels.copernicus.eu> do 24 hodin od snímání.

Družice Sentinel-1 operují ve 4 režimech snímání (obr.3) při různém rozlišení:

Tab. 2: Sentinel-1, režimy snímání; (Bourbigot et al., 2016)

Režim snímání	Způsob využití	Prostorové rozlišení [m]	Šířka záběru [km]
Strip Map Mode (SM)	monitorování krizových událostí	5 x 5	80
Interferometric Wide Swath Mode (IW)	hlavní režim snímání nad pevninou, částečně i nad mořem a polárním oblastmi	5 x 20	250
Extra Wide Swath Mode (EW)	režim snímání částečně nad mořem a polárním oblastmi	20 x 40	400
Wave Mode (WV)	hlavní režim pro snímání nad mořem	prostorové rozlišení 5 m ve čtvercích 20 x 20 km každých 100 km, snímáno pod dvěma různými úhly	



Obr. 3: Sentinel-1, režimy snímání; upraveno (Čotar et al., 2016)

3.5.1 Sentinel-1 - polarizace

Anténa družice Sentinel-1 umožňuje vysílat i přijímat série pulzů v horizontální (H) i vertikální (V) lineární polarizaci. Produkty s jednoduchou polarizací jsou získány pomocí radaru se stejnou polarizací (H nebo V) na vysílači i přijímači, zatímco produkty s duální polarizací jsou získány provozem radaru s jednou polarizací (H nebo V) na vysílači a obou polarizací současně na přijímači. Produkty s duální polarizací jsou poskytovány ve formě dvou snímků, kde každý odpovídá jinému polarizačnímu kanálu (HH, VV, HV nebo VH), sdílí však stejné produktové charakteristiky (Bourbigot et al., 2016).

3.5.2 Sentinel-1 - úrovně zpracování

Produkty družic Sentinel-1 jsou poskytovány ve třech úrovních zpracování a to SAR Level-0, Level-1 a Level-2.

Produkty Level-0 obsahují komprimovaná nezpracovaná originální data, která je nutné zpracovat a dekomprimovat prostřednictvím SAR procesoru.

Level-1 produkty jsou dostupné v typu Single Look Complex (SLC) a Ground Range Detected GRD a patří mezi nejčastěji využívané. Level-1 SLC produkty jsou georeferencovány pomocí dat o poloze a výšce družice na oběžné dráze a zachovávají údaje o amplitudě a fázi snímku. Tyto produkty jsou v nulové Dopplerově (zero-Doppler) orientaci, kde každá řada pixelů představuje body podél přímky kolmé na sub-satelitní dráhu. Produkty Level-1 GRD obsahují georeferencovaná data pomocí referenčního zemského elipsoidu (WGS84) a byl na ně aplikován tzv. multilooking, kdy je využito vícenásobné snímání jednoho místa pro složení hotového snímku. U těchto snímků dochází k redukci šumu na úkor mírně sníženého prostorového rozlišení.

Level-2 OCN (Ocean) jsou již geolokalizované a geofyzikální produkty získané z úrovně Level-1. Jsou využívány například při sledování mořského větru, vln nebo mořských proudů (ESA, 2019b).

3.5.3 Sentinel-1 využití

Sentinel-1 snímá zemský povrch skrze mraky i srážky nezávisle na počasí či denní době, proto najde vhodné uplatnění například v polárních oblastech, kde je velkou část roku tma, nebo v tropických oblastech pod vrstvou oblačnosti. Nad moři a oceány se využívá především pro vytváření map mořského ledu a ledovců, pro bezpečnou plavbu nebo sledování ropných skvrn. Pořízená data poskytují i informaci o mořských větrech, vlnách a proudech. Nad pevninou se data z družic Sentinel-1 využívají pro sledování změn krajinného pokryvu a mapování přírodních katastrof jako jsou povodně nebo zemětřesení (ESA, 2016).

3.6 Využití SAR pro mapování vodních ploch

Při monitorování povodňových událostí s využitím radarového snímání dochází k odrazu signálu z hladké vodní hladiny a na snímku jsou pak tyto plochy vidět pod tmavou barvou. Úspěšná detekce vodních ploch však závisí na vlnách, povětrnostních podmínkách nebo na silném dešti, kdy může docházet k narušování vodní plochy a tím pádem k odlišným hodnotám zpětného rozptylu signálu v takových místech. Obtížně identifikovatelné mohou být vodní plochy skryté vegetací nebo plochy v zástavbě (Čotar et al., 2016).

Přesné a včasné informace z povodňových oblastí jsou důležité jako základ například pro záchranáře, krizový management nebo pro pojišťovny. Běžným měřením z povrchu Země však nelze získat komplexní informace, pokud se jedná o povodňové události velkého měřítka. Zde je nejvhodnější užití SAR systémů zejména pro jejich schopnost snímání za jakýchkoliv podmínek počasí a v jakoukoliv denní dobu (Marzahn et al., 2018).

V posledních letech je také stále častější využití automatizovaných procesů pro mapování vodních ploch (Westerhoff et al., 2013; Duy, 2015), jelikož využití SAR systémů a automatizovaného mapování vodních ploch může výrazně zkrátit časový interval poskytování informací o vzniklé krizové situaci a je i vhodným nástrojem pro včasné varování před blížící se katastrofou (Twele et al., 2016).

3.7 Mapování v ledovcových oblastech pomocí systémů SAR

Dálkový průzkum je v rámci mapování v ledovcových oblastech klíčový, vzhledem k velkým rozlohám těchto útvarů a vzhledem k jejich nedostupnosti. Možnost využití SAR systémů pro mapování v ledovcových oblastech byla zkoumána již v 80. letech 20. století. (Rott et Matzler, 1987), ale doposud byla k mapování v těchto oblastech využívána téměř výhradně data z optických senzorů (Winsvold, 2017). Zhodnocením jednotlivých metod mapování ledovců pomocí optických dat z družice Landsat se zabývá například Paul (2000).

Pomocí radarové interferometrie je možné zkoumat například pohyb povrchu ledovců (Fatland et Lingle, 1998). Dalším využitím SAR systému je monitorování tání sněhu (Koskinen et al., 1997) nebo mapování ledovcových jezer (Strozzi et al., 2012). Výjimkou není ani kombinování SAR systému se spektrálními systémy, díky kterému je snazší mapovat jak čisté ledové plochy, tak plochy pokryté suti (Robson et al., 2015). Se zvyšující se úrovní SAR systémů by však mělo docházet k rozvoji dalších nových metod mapování (Winsvold, 2017).

Užití SAR systému může být ale stále problematické především v oblastech s velmi členitým reliéfem (Rott et Matzler, 1987). V ledovcových oblastech nemusí být mapování také vždy jednoznačné. Sníh, firn a led mohou mít podobné hodnoty zpětného rozptylu, jelikož mokřý sníh, nebo různá drsnost ledu, které jsou ovlivněny například počasím, mohou mít vliv na absorpci a odrazivost signálu. Dalším problémem při mapování ve velehorských ledovcových oblastech je efekt radarového stínu, zpětného překryvu a zhuštění signálu. (Winsvold et al., 2018)

3.8 Glaciální - Ledovcová jezera

Ledovcové jezero je tvořeno vodní masou, která se vyskytuje v dostatečném množství v ledovci, pod ledovcem, před ledovcem nebo vedle ledovce a/nebo jeho původ souvisí s aktivitou ledovců (Campbell, 2005). Formování ledovcových jezer se odvíjí od ledovcové aktivity, která je ovlivněna klimatickými podmínkami, nadmořskou výškou, orientací ke světovým stranám, srážkami, teplotou, radiací nebo množstvím suťového pokryvu (Vuichard et Zimmermann, 1987). Obecně se ledovcová jezera vyskytují v ledovcových oblastech a v různých formách. Zdrojem vody těchto jezer může být tavná voda z hradícího ledovce nebo sousedních ledovců a jejich velikost

může dosahovat od několika čtverečních metrů až do stovek kilometrů čtverečních. Pro klasifikaci jednotlivých typů ledovcových jezer zatím není stanoven žádný ucelený systém, tato práce se bude dále zaměřovat na tyto typy jezer: supraglaciální, proglaciální, jezera hrazená morénou a jezera hrazená ledovcem.

Díky klimatické změně a celosvětovému fenoménu ústupu ledovců došlo během 20. století k nárůstu počtu ledovcových jezer, přesto v některých oblastech ze stejných důvodů došlo naopak k jejich zániku (Bahr et al., 2011). Ledovcová jezera se nacházejí po celém světě, ta největší na světě leží v Severní Americe. I v České republice se nachází 6 jezer ledovcového původu (Pavelková Chmelová et Frajer, 2013).

Ledovcová jezera představují potenciální nebezpečí, pokud dojde k jejich průvalu. Ten má za následek ledovcové záplavy, které budou detailněji popsány dále v této práci (Bahr et al., 2011).

3.8.1 Supraglaciální jezera

Supraglaciální jezera se vytvářejí na povrchu ledovce nejčastěji na povrchu ablační zóny sutí pokrytého ledovce a jejich rozsah se během roku může rychle měnit (Xiaojun et al., 2018). Charakteristickým rysem supraglaciálních jezer je jejich přemísťování, spojování nebo vyprazdňování. Při spojování a rozšiřování těchto jezer může docházet k hromadění velkého množství vody s vysokou potenciální energií (Campbell, 2005) a pokud dojde k propojení těchto jezer s drenážním systémem ledovce může dojít k rychlému vyprázdnění vody vedoucímu k ledovcovým záplavám (Xiaojun, et al., 2018).

3.8.2 Proglaciální jezera

Proglaciální jezera se mohou vyskytovat před horskými ledovci nebo po jejich stranách a nejčastěji jsou hrazena ledem, skalním podložím, morénou nebo sesuvem půdy. Vznik a vývoj těchto jezer jsou spojeny s dynamikou ledovců, povahou okolního prostředí, a především klimatickou změnou, která má za následek tání ledovců. Typ přehrazení těchto jezer má vliv na charakter odvodnění jezera a selhání hráze pak často vede k ledovcovým záplavám (Carrivick et Tweed, 2013).

3.8.3 Jezera hrazená morénou

Ustupující ledovce začínají odtávat ve své nejnižší části na ledovcovém jazyku. V případě jezer hrazených morénou jsou tato místa obklopena čelní nebo boční morénou. Vznikají zde jezírka, která se propojují a zvětšují, jejich objem narůstá tavnou a dešťovou vodou. Morénová hráz zde může být v podobě morény s ledovým jádrem, po odtání zbylého ledu je jezero hrazenou pouze podloží a morénou (Campbell, 2005). Častým mechanismem vzniku záplav z těchto jezer bývají ledové laviny nebo pád kusu skály přímo do jezera (Bahr et al., 2011) respektive selhání morénové hráze, která bývá složena z různorodého materiálu a často může být nestabilní (Mayer et al., 2008).

3.8.4 Jezera hrazená ledovcem

Jezera hrazená ledovcem vznikají na místech, kde se postupující ledovec střetává s ledovcem z přilehlého údolí nebo naopak. Na stranách ledovce se pak tvoří přítoky, které se následně zachycují v ledovcovém údolí a vznikají jezera (Xiaojun et al., 2018). Taková jezera jsou většinou malá a méně náchylná k ledovcovým záplavám (Campbell, 2005). Voda z těchto jezer odtéká kanály uvnitř ledovce, proto u těchto jezer závisí na především na propustnosti ledovce. V případě že jezero je velké může docházet ke zvyšování tlaku na odvodňovací kanály a následně k náhlému odtoku vody, který může způsobit ledovcové záplavy (Jánský, 2006). Jezera hrazená ledovcem mívají krátkou životnost, přežívají pouze v řádu několika měsíců až let. Tato jezera se plní relativně rychle a vyprazdňují se především v létě v období největšího tání (Bahr et al., 2011).

3.9 Ledovcové záplavy - GLOF

Pojem ledovcové záplavy neboli GLOF (glacial lake outburst floods) popisuje náhlý únik velkého množství tavné vody z ledovcového jezera, který může končit katastrofickými záplavami. Tyto záplavy se objevují v ledovcových krajinách a mohou mít různé podoby i spouštěcí mechanismy (Bahr et al., 2011). Nejčastěji se tyto záplavy projevují sezónně v letních měsících nebo na začátku podzimu, kdy dochází k největšímu oteplení a tání ledovců (Richardson et Reynolds, 2000).

K ledovcovým záplavám dochází nejčastěji u hrazených ledovcových jezer. Mechanismem jejich vzniku může být pád laviny do jezera, seismická aktivita, odvodnění pod hrází, přeplnění hráze nebo její degradace (Cook et al., 2018). Výška a složení hráze, objem jezera, a stejně tak i morfologie terénu nebo druh či absence vegetace na spodním sedimentu směrem po proudu hráze jsou faktory ovlivňující průběh ledovcových záplav (Richardson et Reynolds, 2000). K průvalu vody nejčastěji dochází vnitřními ledovcovými kanály nacházejícími se pod hrází nebo uvnitř hráze, jejichž velikost se může v průběhu záplav rapidně zvětšovat (Ng et Liu, 2009). Jak vyprazdňování jezera postupuje, dochází ke snížení tlaku v těchto kanálech a k jejich rychlému uzavření a ukončení průvalu vody (Walder et Costa, 1996).

Ledovcové záplavy mívají velmi rychlý průběh a často přicházejí bez varování v rámci několika minut až dní. Vzhledem k síle a nepředvídatelnosti ledovcových záplav mohou tyto mít ničivé následky na přilehlé infrastruktury jako jsou cesty a silnice, budovy nebo vodní elektrárny, ale také na půdu, majetek a v nejhorším případě na lidské životy (Richardson et Reynolds, 2000).

Jejich vznik také ovlivňuje morfologii a dynamiku řek nebo celé krajiny. Stále teplejší klima má vliv na formování ledovcových jezer a zvyšování přísunu tavné vody. To má za následek vznik ledovcových záplav v dříve nezasazených oblastech nebo jejich častější vznik a ničivost v oblastech, kde již byl zaznamenán jejich výskyt (Cook et al., 2018). V současné době se zkoumání ledovcových jezer a s ním spojeného vzniku a příčiny ledovcových záplav věnuje mnoho vědců a stále častěji je k tomuto účelu využíváno jak spektrálních tak radarových dat dálkového průzkumu Země (Huggel et al., 2002; Kropáček et al., 2015).

3.9.1 Jökulhlaup

Termínu „jökulhlaup“ je užíváno v kontextu ledovcových záplav. Je poměrně běžné, že se používá jako synonymum pro jakékoliv katastrofické ledovcové záplavy. Původně však tento termín vznikl na Islandu a označoval ledovcové záplavy, které vznikají právě zde vlivem vulkanické aktivity (Bahr et al., 2011).

4 Zájmové území

4.1 Kyrgyzstán - Ťan-Šan

Kyrgyzstán, ležící ve střední Asii, sousedí na severní hranici s Kazachstánem, na jihu a východě s Čínou, na jihu Tádžikistánem a na západě s Uzbekistánem. Většina hranic Kyrgyzstánu je tvořena horskými hřebeny, stejně tak reliéf této země je především hornatý. Největší vrchol, Victory Peak v pohoří Ťan-Šan, dosahuje výšky 7 439 m n. m. (Allworth et Sinor, 2019). Průměrná výška reliéfu je 2 750 m n. m., ve výšce do 1 000 m n. m. leží pouze necelých 6 % státu (Šobr, 2008). Klimatické podmínky v Kyrgyzstánu jsou poměrně variabilní. Pouště a planiny na severu, západě a jihovýchodě státu kontrastují s rychlou změnou reliéfu v hornatém středu státu, kde dochází k výraznému zvýšení množství srážek a snížení teploty s rostoucí nadmořskou výškou. (Allworth et Sinor, 2019).

V Kyrgyzstánu se nachází přes 8 000 ledovců, jejichž plocha dohromady pokrývá okolo 8 000 km² což tvoří více než 4 % rozlohy státu. Nachází se zde cca 1 500 jezer, která mají rozlohu větší než 1 ha, z toho je 300 jezer považováno za potenciálně nebezpečná a 25 jako velmi nebezpečná (Šobr, 2008).

Zemí prochází pohoří Ťan-Šan neboli „Nebeské hory“, které pokračuje východním směrem do Číny. Celková délka pohoří Ťan-Šan je okolo 2 400 km, z čehož se dvě třetiny rozsahu nachází na území Číny, šířka pohoří dosahuje od 350 do 500 km (McColl, 2014). Pohoří se rozprostírá v nadmořských výškách 2 800 – 7 439 m n. m. a jímá jedny z největších nepolárních ledovců na světě, přes 7 500 ledovců pokrývá plochu okolo 13 270 m² a jsou zdrojem pitné vody pro více než 50 milionů obyvatel (Bahr et al., 2011).

Klima v této oblasti je charakteristické velkými teplotními rozdíly mezi létem a zimou. Typická vyprahlost obklopujících pouští a planin absorbuje sluneční záření, zatímco s nadmořskou výškou rychle klesá teplota a zvyšuje se vlhkost vzduchu v porovnání se suchem okolních pouští. Průměrné letní teploty v údolních oblastech se pohybují v rozmezí 23 – 34°C, ve vysokohorských oblastech je to však okolo 5°C. Průměrné zimní teploty v údolních oblastech se pohybují okolo -4°C, ve vysokohorských oblastech okolo -23°C, mohou se však vyskytovat i teploty až -50°C. Ve výškách nad 2 750 m n. m. se v rozsáhlé míře vyskytuje permafrost. Většina srážek spadá na

návětrné západní a severozápadní svahy v množství 700 – 2 000 mm. Ve vnitřních oblastech pohoří se srážkový úhrn snižuje na 100 – 400 mm (Allan et al., 2019).

Hlavním faktorem ovlivňujícím režim ledovců v pohoří Ťan-Šan je teplota, která následně ovlivňuje typ srážek, dobu trvání a intenzitu tání sněhu a ledu v jednotlivých výškových pásmech. Zejména od poloviny 70. let 20. století byl zaznamenán nárůst teplot vzduchu v této oblasti, díky kterému se prodlužuje doba tání nejen v ablačních oblastech, ale i v horních akumulacích oblastech ledovců. Následkem tání ztratily ledovce v pohoří Ťan-Šan 8,5% své rozlohy (Bahr et al., 2011).

4.2 Merzbacherovo jezero

Zájmovým územím této práce je Merzbacherovo jezero ležící ve východním cípu státu Kyrgyzstán v pohoří Ťan-Šan. Jedná se o soustavu dvou jezer, kterou tvoří Hořejší a Spodní Merzbacherovo jezero. Mezi jezery se nachází území zvané „Peremitschka“ (neboli „plocha mezi jezery“) (Glazirin, 2010). Jezera jsou lokalizovaná mezi ledovci Severní Inylček a Jižní Inylček (obr. 6 a obr. 7), které tvoří největší ledovcový systém v pohoří Ťan-Šan (Kingslake et Ng, 2013). Hořejší Merzbacherovo jezero leží v místě bývalé terminální morény ledovce Severní Inylček. Tavné vody z tohoto ledovce odtékají skrz Hořejší Merzbacherovo jezero do Spodního Merzbacherova jezera (Mayer et al., 2008).

Merzbacherovo jezero nese jméno po svém německém objeviteli Gottfriedu Merzbacherovi (1843-1926), jenž ho objevil náhodou na své expedici do pohoří Ťan-Šan v létě v roce 1903. Podle původní Merzbacherovy studie se jezero nacházelo ve výšce 3 600 m n. m. a dosahovalo rozměrů přibližně 4 x 1,2 km. Jezero, ze stran obklopeno strmými skalními stěnami o výšce 1,2 km, popisoval jako ledovcové jezero plné modré vody, ve které plavaly tisíce malých ker a kusů ledu rozličných tvarů (Merzbacher, 1905). Celá detailní mapa vytvořená při expedici Gottfrieda Merzbachera znázorňující centrální část pohoří Ťan-Šan je uvedena v příloze 1. Zákres Merzbacherova jezera na výřezu z této mapy je zobrazen na obr. 4.

Dle nynějších přesnějších měření je Spodní M. jezero položeno ve výšce 3 300 m n. m. a Hořejší M. jezero o 100 výškových metrů výše. Spodní M. jezero odpovídá typu proglaciálního ledovcového jezera hrazeného ledovcem. Spodní M.

jezero je ve své spodní části hrazené Jižním ledovcem Inylček. Díky pravidelnému systému naplňování a vyprazdňování, který má za následek každoroční ledovcové záplavy je toto jezero předmětem dlouhodobého pozorování (Kingslake et Ng, 2013).



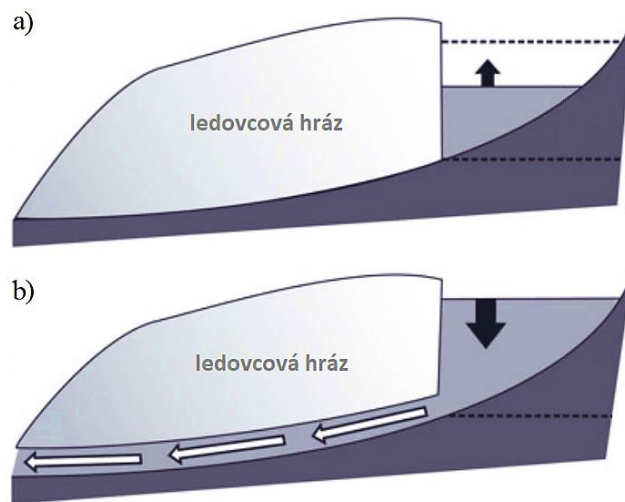
Obr. 4: výřez z mapy vytvořené při Merzbacherově expedici v pohoří Ťan-Šan zobrazující Severní a Jižní ledovce Inylček a záznam Merzbacherova jezera; červené čáry označují trasu Merzbacherovy expedice v letech 1902-1903; (Merzbacher, 1905)

Spodní M. jezero má nyní rozlohu kolem 4 km² a jeho maximální hloubka dosahuje 80-100 m u ledovcové hráze, když je jezero plné. K vyprazdňování Spodního M. jezera dochází pravidelně, a to každý rok nejčastěji v období července nebo srpna (Shan et al., 2018). K průvalu jezera dochází, jestliže je hladina vody tak vysoká, že se velká část ledovcové hráze ledovce Jižní Inylček začne na vodě vznášet, tím dojde k otevření englacíálních kanálů, kterými začne proudit voda z jezera pryč (obr. 5) (Glazirin, 2010). Ledový povrch se může vznést až o 20 m, přičemž dochází k telení ledovce a některé z těchto úlomků zůstanou plavat v jezeře (Helm et al., 2008), což při svém objevení jezera pozoroval i Merzbacher (1905).

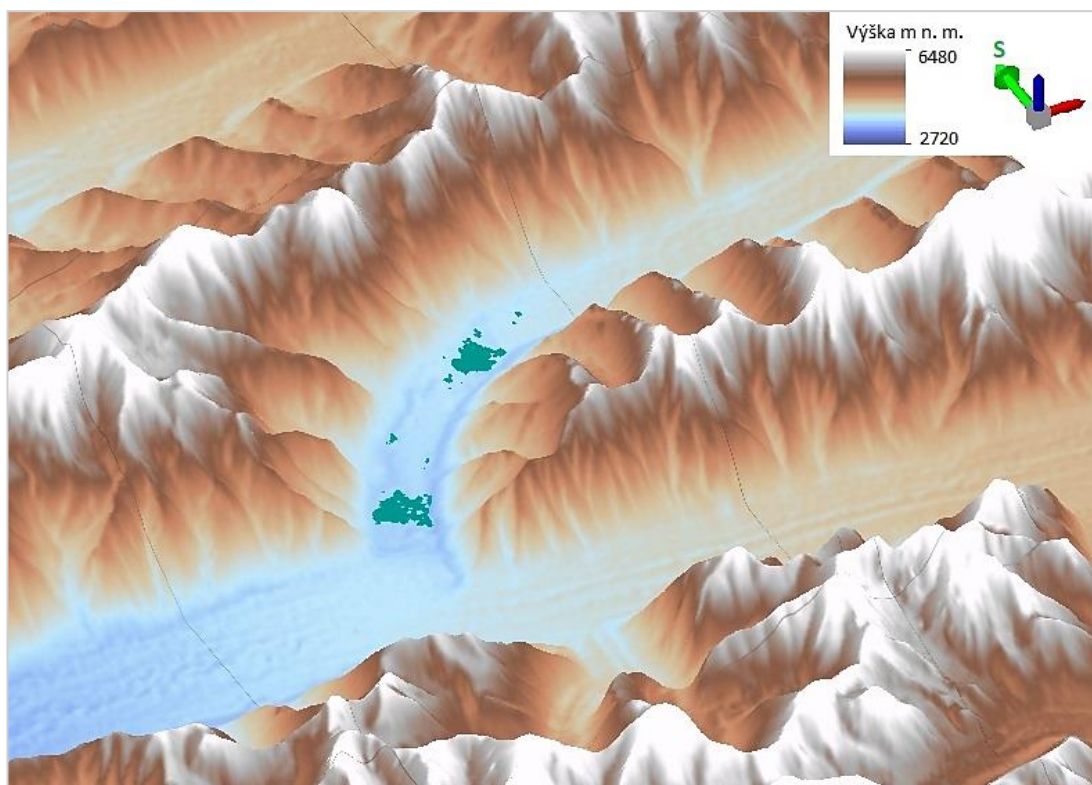
Následkem náhlých průvalů vody z jezera dochází k ledovcovým záplavám (GLOF) (Bormudo et al., 2012). Glazirin (2010) uvádí, že příčina otevření englacíálních kanálů není jasná, neboť se neprokázala shoda v objemu jezera v průběhu let před

vyprázdněním. Z výzkumu Bormudoj et al. (2012) však vyšlo najevo, že k průvalům jezera nejspíše dochází při nárůstu teploty povrchu nad 10°C.

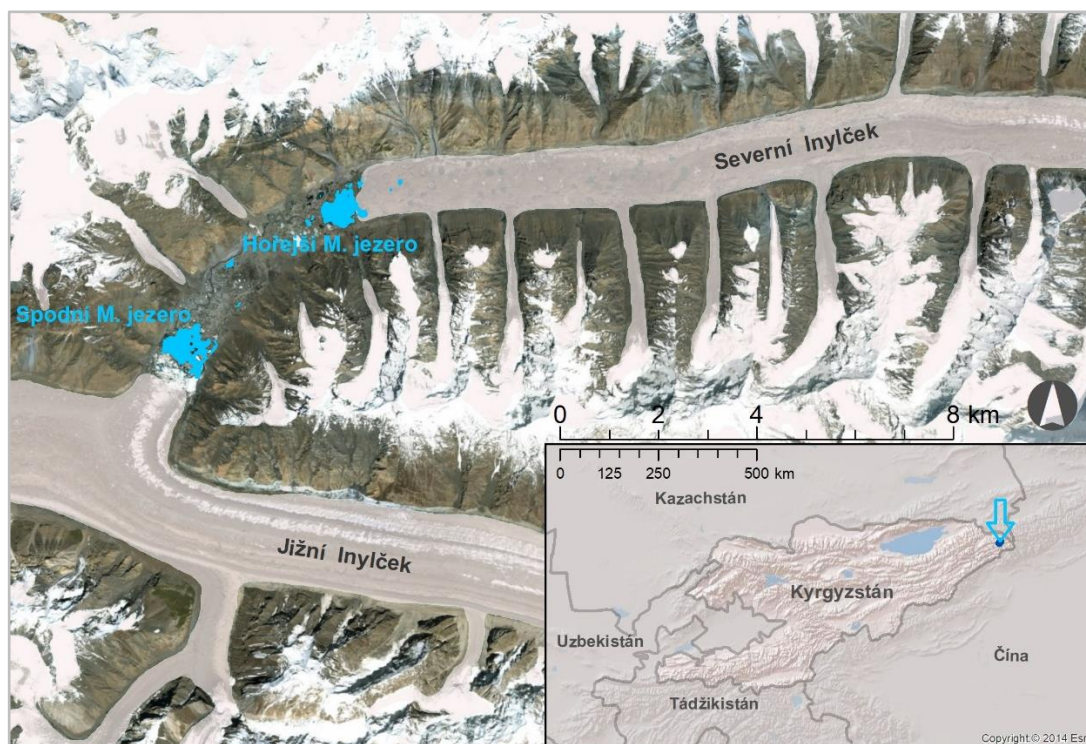
Rychlost úniku vody při vyprazdňování jezera dosahuje až 1 000 m³/s. Voda z těchto ledovcových záplav vstupuje do řeky Inylček, která pokračuje po proudu do Číny. Zvýšený stav vody v řece Inylček pak vede k ničení mostů nebo jiných infrastruktur poblíž břehu řeky (Bormudoj et al., 2012). V posledních dekadách dochází k masivnímu nárůstu povodňových událostí způsobených ledovcovými záplavami z Merzbacherova jezera a působí ničivé škody na infrastruktuře regionů situovaných pod ledovcem Inylček (Helm et al., 2008).



Obr. 5: systém plnění a prázdnění Merzbacherova jezera: a) plnění jezera, b) prázdnění jezera, upraveno (Kingslake et Ng, 2013)



Obr. 6: 3D model zájmového území vizualizován z dat SRTM30 v prostředí ArcScene



Obr. 7: zájmové území, lokalizace Spodního a Hořejšího Merzbacherova jezera mezi ledovci Severní a Jižní Inylčec (podkladová data: GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space), Esri basemap – imagery, terrain)

5 Metodika

5.1 Vstupní data

Stěžejním zdrojem dat této práce byly radarové snímky z družic Sentinel-1A a Sentinel-1B. Data ze všech družic Sentinel jsou po registraci dostupná ke stažení na webu evropského programu Copernicus přes interaktivní rozhraní Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus>).

K rychlému hromadnému stažení snímků byla využita volně dostupná aplikace Aria2 (<https://aria2.github.io>) umožňující stahování dat pomocí takzvaných Metalinků.

Dále byla z webu U.S. Geological Survey (USGS) Earth Explorer získána globální výšková data Shuttle radar topography mission v rozlišení 1 úhlové vteřiny (SRTM30) pro účely vizualizace. Data z webu USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>) je možné stahovat po registraci.

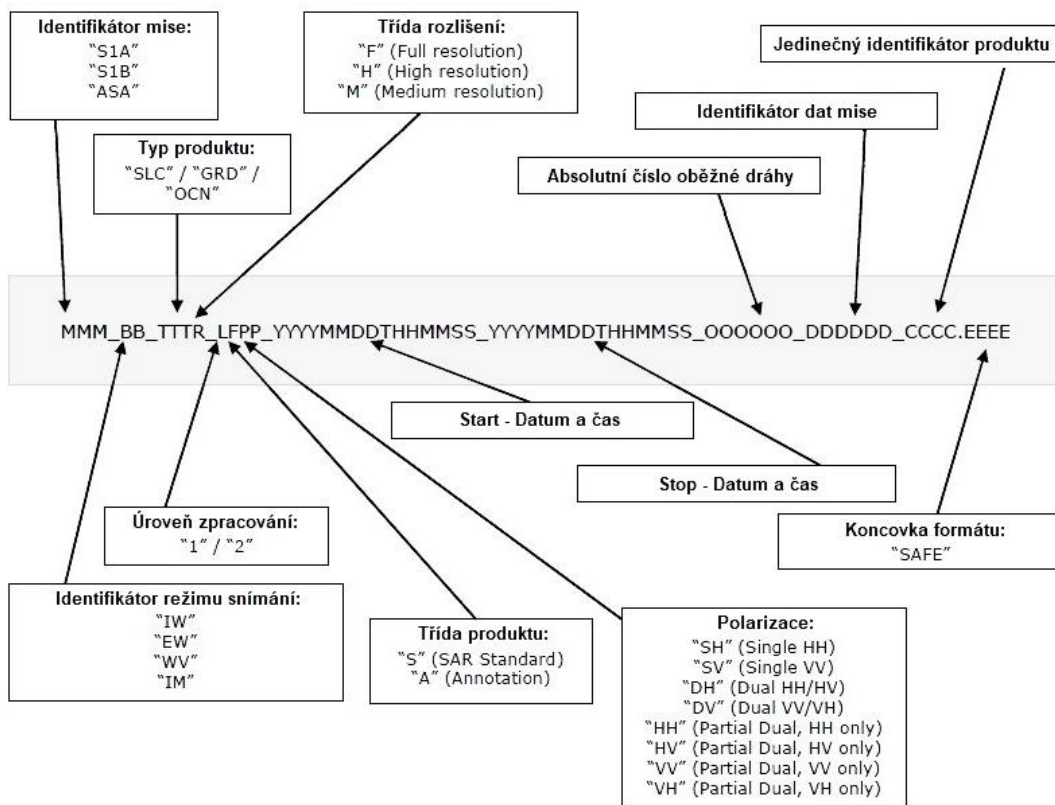
Pozn.: Od roku 2019 byly snímky z počátku roku 2018 a starší dlouhodobě archivovány a označeny statusem „Offline“, tyto snímky by měly být po inicializaci stahování zpřístupněny po určité době všem uživatelům, nicméně jejich stažení se i přesto nepodařilo. Data, která byla přesunuta do archivu však lze po registraci stáhnout na datovém portálu Vertex zařízení Alaska Satellite Facility (ASF) Distributed Active Archive Center (DAAC) (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu>).

Pro účely této práce byly z datového zdroje Sentinel-1 zvoleny produkty Level-1 typu GRD, v režimu snímání IW, s relativním orbitem 136, se sestupnou drahou přeletu. Případné mezery v časové řadě byly doplněny produkty s relativním orbitem 158 se vzestupnou drahou přeletu. Další charakteristiky vstupních dat jsou uvedeny v tab. 3. Celkem bylo získáno 100 snímků z let 2014–2019. V letech 2015 a 2016 bylo získáno 18 respektive 14 snímků, v letech 2017 a 2018 bylo získáno 23 respektive 27 snímků, tento rozdíl je způsoben především pozdějším startem družice Sentinel-1B. V zájmové oblasti je frekvence snímání pro každý relativní orbit 12 dní, to odpovídá dvěma až třem snímkům za měsíc.

Na obr. 8 je znázorněn mechanismus tvorby názvu snímků družic Sentinel-1, ze kterého lze následně vyčíst například dobu pořízení snímku, ale i typ produktu, úroveň zpracování nebo třídu rozlišení.

Tab. 3: přehled základní charakteristiky vstupních dat z družic Sentinel-1

Družice	Sentinel-1
Senzor	SAR-C
Typ produktu	GRD
Režim snímání	IW
Relativní orbit	136
Doplnění časové řady	158
Směr přeletu	sestupná dráha (descending)
Doplnění časové řady	vzestupná dráha (ascending)
Polarizace	VV, VV+VH
Zdrojová pásma	Amplitude VV, Intensity VV, Amplitude VH, Intensity VH
Rozlišení	HR (10 x 10 m)
Časová řada	15. 10. 2014 - 27. 2. 2019

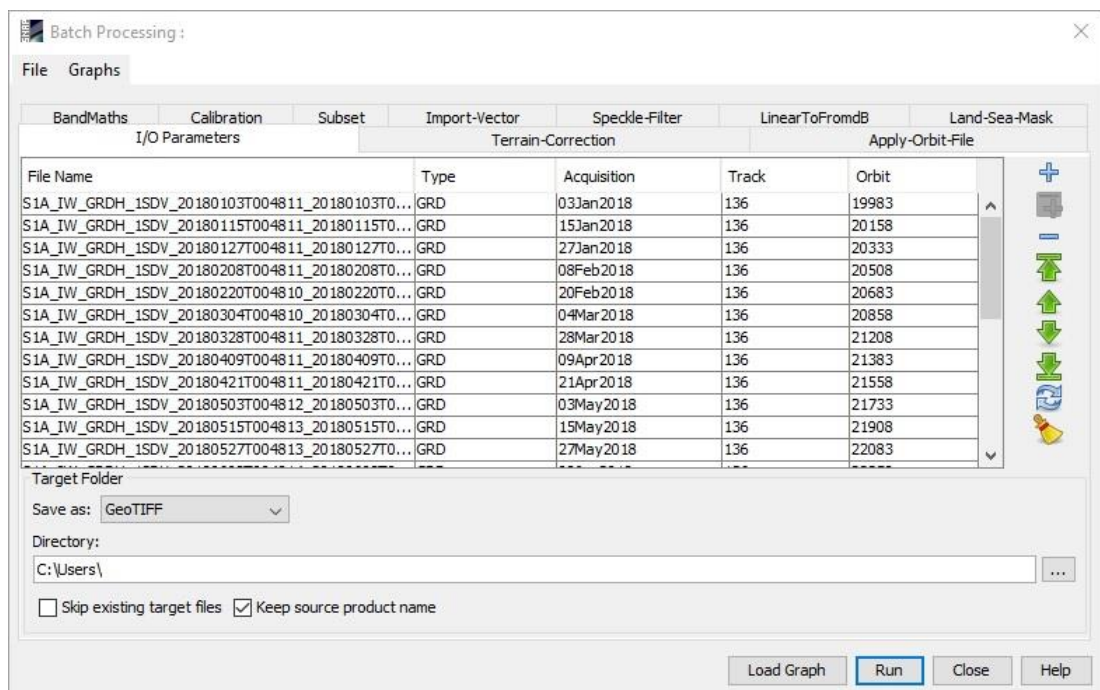


Obr. 8: způsob tvorby názvu jednotlivých produktů Sentinel-1, upraveno podle (ESA, 2019a)

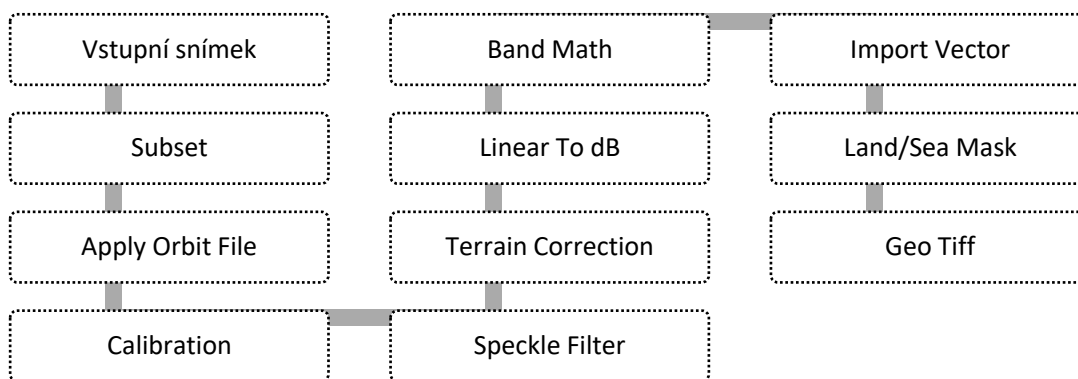
5.2 Pre-processing

Příprava dat neboli pre-processing probíhala ve volně dostupném programu SNAP Desktop 6.0 (Sentinel Application Platform) agentury ESA. Při instalaci programu byl rovněž nainstalován balíček Sentinel-1 Toolbox.

Pro zpracování snímků byl vytvořen sled funkcí pomocí nástroje *Graph Builder*. Všechny snímky byly zpracovány najednou po jednotlivých letech v automatizovaném procesu využitím nástroje *Batch Processing* po vložení vytvořeného sledu funkcí (obr. 9). Proces přípravy a zpracování dat je znázorněn na obr. 10.



Obr. 9: prostředí funkce *Batch Processing*



Obr. 10: Sled jednotlivých funkcí u přípravy a zpracování snímků z družice Sentinel-1 v programu SNAP

Z družicových snímků byl nejdříve vytvořen výřez zájmové oblasti pro zmenšení objemu zpracovávaných dat pomocí funkce *Subset*. K oříznutí snímků byl zvolen polygon definovaný geografickými souřadnicemi, aby byl výřez ze všech snímků stejný. V nastavení funkce bylo zaškrtnuto pole *Copy Metadata*.

Jelikož původní metadata snímku nemusí být vždy přesná, je třeba je zpřesnit pomocí aktualizace informací o oběžné dráze družice z dat, která jsou dostupná od několika dní či týdnů po pořízení daného produktu. K tomu byla využita funkce *Apply Orbit File*. Vektor oběžné dráhy byl zvolen Sentinel Precise (Auto Download).

Poté byla použita funkce *Calibration*, jedná se o radiometrickou korekci, díky které budou hodnoty pixelů zastupovat hodnoty zpětného rozptylu. V nastavení funkce byla zvolena polarizace VV a výstupní pásmo sigma0. Nově vzniklé pásmo neslo název Sigma0_VV.

Dále byla užita funkce *Speckle Filter*. Vstupním pásmem bylo pásmo Sigma0_VV, se zvoleným filtrem Lee Sigma. V nastavení funkce byla velikost okna ponechána 7x7, hodnota sigma 0,9 a velikost cílového okna 3x3. Filtr byl aplikován k odstranění efektu „soli a pepře“, který vzniká vzájemným ovlivňováním složek rozptýleného signálu, po aplikaci filtru dojde ke zlepšení kvality a k vyhlazení snímků.

Konečně, je nutné upravit snímky tak, aby reprezentace terénu co nejvíce odpovídala skutečnosti, a došlo tak k odstranění zkreslení vzdáleností a topografických rozdílů, toho bylo dosaženo pomocí funkce *Terrain Correction*. Vstupním pásmem bylo pásmo Sigma0_VV, zvolený výškový model byl SRTM 3sec (Auto Download) a jako metoda převzorkování byla užita bilineární interpolace. Mapová projekce po tomto kroku byla

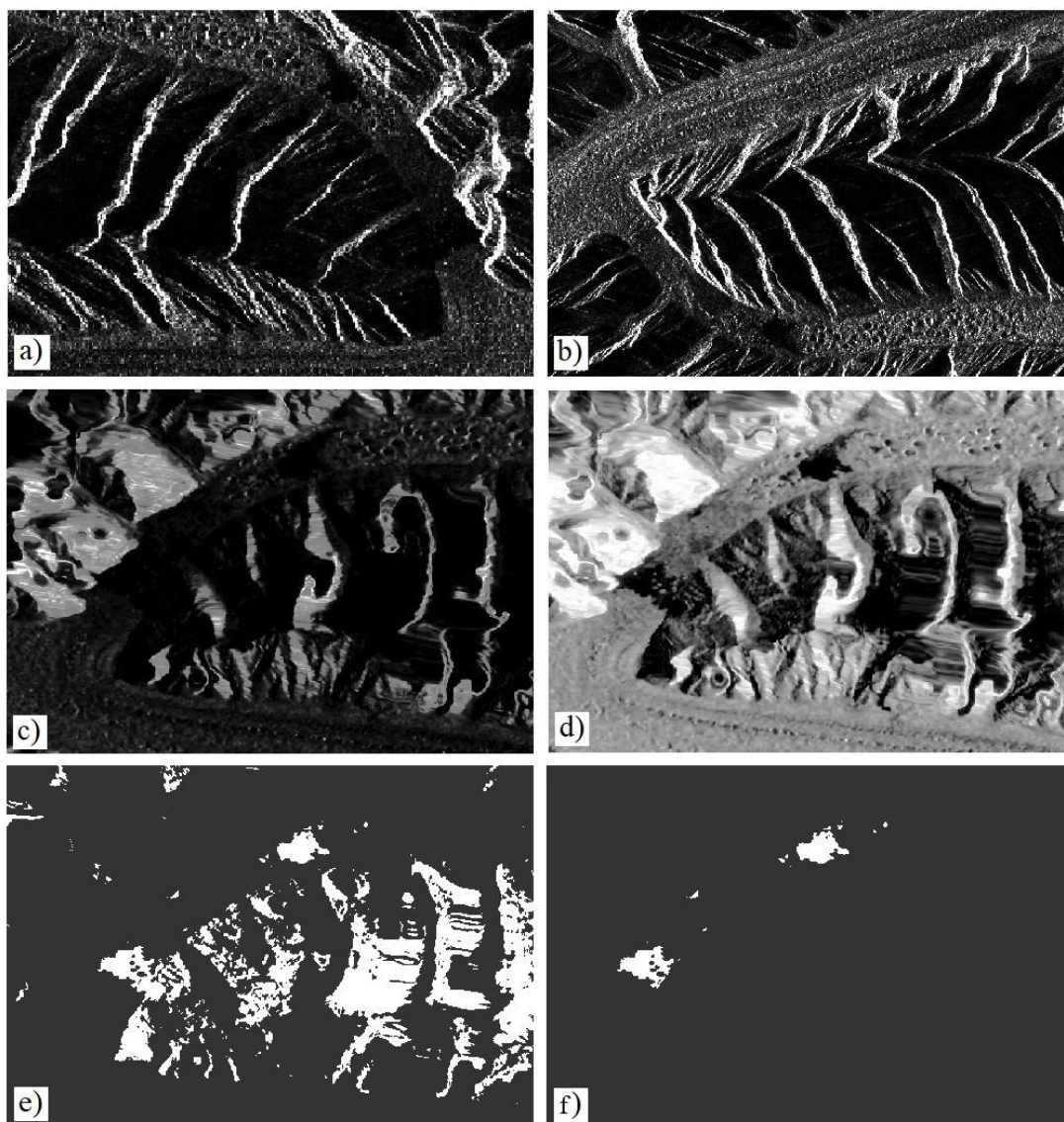
WGS84(DD) o velikost pixelů snímků 10x10 m. Vizualizace snímku po všech krocích předzpracování je zobrazena na obr. 10, c).

5.3 Processing

Po předzpracování dat byly však snímky stále špatně čitelné a vodní plochy nebyly příliš patrné. Snímky proto byly následně pomocí nástroje *Linear To/From dB* konvertovány z lineárního zobrazení na logaritmické, které je v jednotkách decibelů (dB). Dojde tak k získání lepšího kontrastu a ke zvýraznění struktur v tmavých částech snímků, které se tak stávají lépe čitelné (obr. 11, d)). Vstupním pásmem bylo pásmo Sigma0_VV a výstupním pásmem bylo pásmo Sigma0_VV_db.

Po přípravě dat byl na snímky aplikován nástroj *Band Math* pro vylišení ploch s hodnotou nižší než prahová hodnota -17,5 dB. Pro snímky pořízené pro doplnění časové řady s odlišným směrem přeletu byla tato hodnota stanovena na -15 dB. Tyto hodnoty byly zvoleny jako hraniční hodnoty v intervalu cca -25 až 25 dB (liší se u jednotlivých snímků), podle vizuální interpretace snímků a interpretace histogramů hodnot. Pro vylišení vodních ploch byl použit výraz $\text{Sigma0_VV_db} < -17.5$ (respektive -15). Buňky s hodnotou nižší než tato prahová hodnota by měly zobrazovat vodní hladinu, zatímco buňky s vyšší hodnotou než prahová hodnota budou považovány za ne-vodní plochy. Výsledkem použití tohoto nástroje bylo nové pásmo *Vodni_plochy* s binární strukturou, představující vodní a ne-vodní plochy (obr. 11, e)). Bílé plochy, nejvíce patrné v pravé části snímku, ale nepředstavují vodní plochy, jde o takzvaný radarový stín způsobený vysokou členitostí terénu.

Proto byla následně pomocí nástroje *Import Vector* importována vektorová vrstva, ve formátu shp, překrývající pouze zájmovou oblast výskytu jezer. Tento vektor byl posléze aplikován jako maska v nastavení nástroje *Land/Sea Mask*. Vstupním pásmem v tomto kroku bylo zvoleno pásmo *Vodni_plochy* a v nastavení nástroje byla zvolena možnost *Use Vector as Mask* - zde byla aplikována dříve importovaná vektorová vrstva. Konečně binární mapy, ukazující pouze vodní plochy v potenciální oblasti výskytu jezer (obr. 11, f)), byly uloženy do formátu Geo Tiff.



Obr. 11: jednotlivé mezikroky předzpracování a zpracování snímků v programu SNAP: a) snímek před zpracováním (směr přeletu – descending), b) snímek před zpracováním (směr přeletu – ascending), c) snímek po předzpracování d) zvýraznění vodních ploch po aplikaci funkce Linear To dB, e) binární rozdělení hodnot po aplikaci funkce Band Math, bílá barva – vodní plochy, šedá – ne-vodní plochy f) výsledné vodní plochy (bílá barva) v oblasti zájmu po aplikaci masky

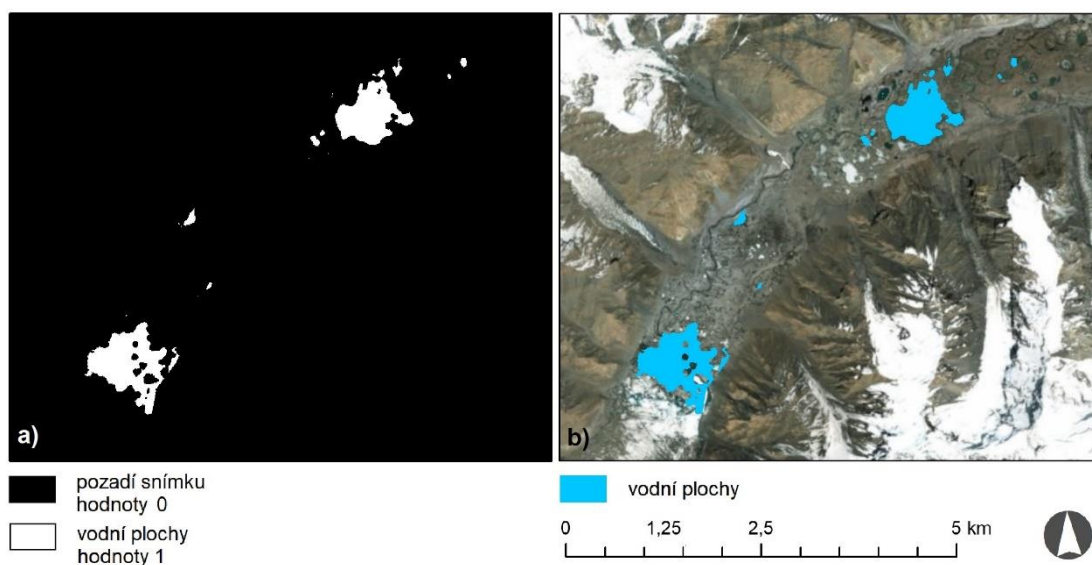
5.4 Post-processing

Konečné zpracování dat proběhlo v programu ArcGIS Desktop 10.6, licence k tomuto programu je pro studenty dostupná zdarma. Podobně jako při zpracování dat v programu SNAP, byla v tomto programu využita možnost automatizovaného zpracování sledu jednotlivých kroků pomocí aplikace *Model Builder*. Zjednodušený sled kroků zpracování dat je zobrazen na obr. 13, kompletní model je zobrazen v příloze 2.

Pro správný a efektivní průběh modelu byly přidány nástroje *Iterate Rasters* a *Parse Path*. Nástroj *Iterate Rasters* umožňuje spustit model pro všechny rastrové vrstvy v dané složce, jeho výstupem je jedna z vrstev a její jméno (Name). Použití nástroje *Parse Path* zaručí, že jména výstupních vrstev budou nést název vrstev vstupních, dojde tak k zachování informace o názvu snímku, která obsahuje datum jeho pořízení. Pro tento nástroj byl nastaven Parse type – NAME, jako vstup se použil název vstupní rastrové vrstvy (Name) a výstupem byla textová hodnota obsahující tento název (Value).

Zpracované snímky v rastrové reprezentaci v geografickém souřadnicovém systému WGS84(DD) byly nejprve převedeny do mapové projekce UTM zone 43N pomocí nástroje *Project*. Tento krok byl zapotřebí především proto, aby následné výpočty byly prováděny v metrech, mapovou jednotkou WGS84 jsou totiž stupně. Zvolená zóna UTM zone 43N byla vybrána dle polohy Kyrgyzstánu.

Následně byly snímky reklasifikovány pomocí nástroje *Reclassify* tak, aby výsledná vrstva obsahovala pouze hodnoty představující vodní plochy nikoliv pozadí snímku. Buňky s hodnotou 0, představující ne-vodní plochy, byly proto reklasifikovány na hodnoty NoData a došlo tak k jejich odebrání. Tyto nové rastrové vrstvy byly poté převedeny na vrstvy polygonové nástrojem *Raster to polygon* (obr. 12).



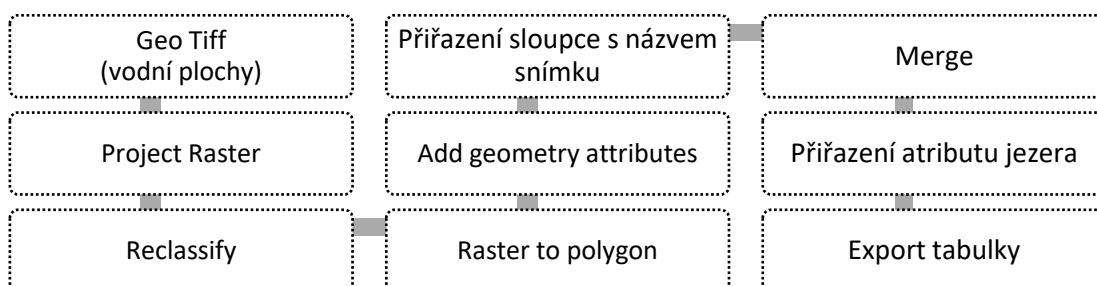
Obr. 12: a) snímek ve formátu GeoTiff před reklasifikací, b) vektorová polygonová vrstva vodních ploch po reklasifikaci a převodu do polygonové vrstvy na podkladu fotografického snímku Esri Basemap

Dalším krokem byl výpočet rozloh jednotlivých vodních plošek v každé vrstvě pomocí nástroje *Add geometry attributes* se zvolenou možností Area Geodesic. Tím byl přidán do jednotlivých vrstev nový sloupec s informací o výměře vodních ploch v metrech čtverečních.

Následně bylo nutné ke všem vrstvám přiřadit název daného snímku, který obsahuje informaci o datu pořízení. Toho bylo docíleno přidáním nového sloupce do tabulky vrstvy pomocí funkce *Add field*, pro tento sloupec pak byla použita funkce *Calculate field* s výrazem: "%Name%" a typem výrazu VBScript.

Pomocí nástroje *Copy Features* byly jednotlivé výsledné polygonové vrstvy uloženy do zvolené výstupní složky. Vstupní hodnotou tohoto nástroje byla hodnota názvu vstupní rastrové vrstvy (Value) a vrstva byla pojmenována jako %Value%.shp.

Poté byly všechny polygonové vektorové vrstvy vodních ploch sloučeny do jedné vrstvy pomocí nástroje *Merge*, za účelem získání tabulky, obsahující hodnoty všech vodních ploch ze všech snímků za sledované období. Data z výsledné tabulky byla dále analyzována v programu Microsoft Excel a použita pro kvantitativní a kvalitativní vyhodnocení výsledků.



Obr. 13: Sled jednotlivých kroků u zpracování dat v programu Arc Map

5.5 Analýza oblastí výskytu vodních ploch

Pro zjištění nejčastějších oblastí výskytu vodních ploch za celé sledované období byla použita funkce *Cell statistics*. Vstupními vrstvami této funkce byly všechny reklasifikované rastrové vrstvy za celé období. V nastavení funkce *Overlay statistic* byla vybrána možnost SUM. Rastrové buňky z jednotlivých vrstev byly poskládány na sebe a sečteny. Vznikla nová rastrová vrstva, obsahující informaci o četnosti každé buňky, představující nejméně a nejvíce časté výskyty vodních ploch.

6 Výsledky

6.1 Sledování vývoje vodních ploch v jednotlivých letech

Na obr. 14 - 17 je zobrazen vývoj Spodního a Hořejšího Merzbacherova jezera v období největších změn plnění či prázdnění jezer v jednotlivých letech. Každý obrázek má přiřazeno datum pořízení snímku a celkovou rozlohu vodních ploch obou jezer. Roky 2014 a 2019 byly z vizualizace vynechány. Kompletní tabulka s rozlohami vodních ploch za celé sledované období pro jednotlivé snímky s údajem o velikosti ploch Hořejšího i Spodního M. jezera je uvedena v příloze 4. Přehled dat pořízení snímků, na kterých je patrné začátek plnění a vyprázdnění Spodního M. jezera v letech 2015-2018 je uveden v tab. 4. Maximální velikosti vodních ploch Spodního a Hořejšího M. jezera i pro celý systém Merzbacherova jezera jsou uvedeny v tab. 5.

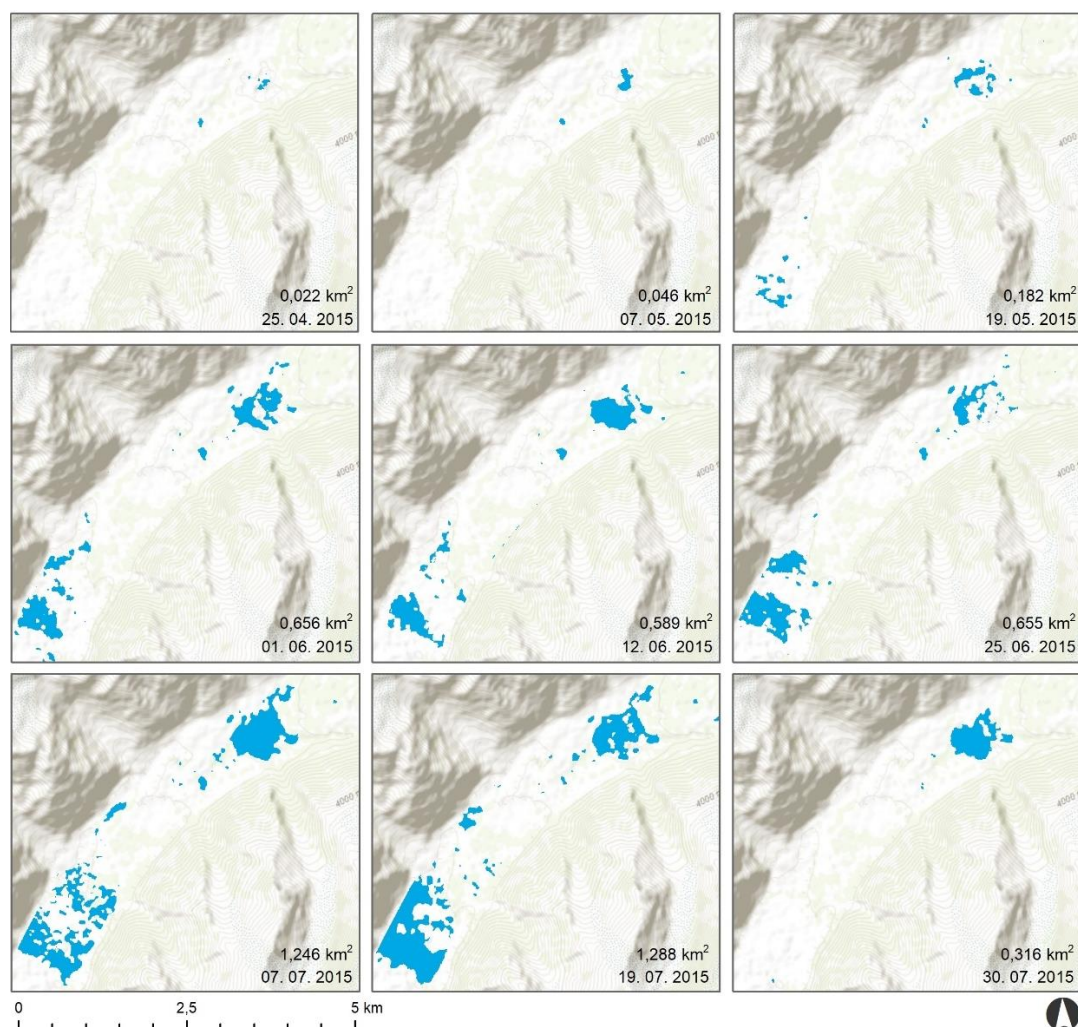
Tab. 4: přehled dat pořízení snímků, na kterých je patrné začátek plnění a vyprázdnění Spodního M. jezera v letech 2015-2018

rok	přelet na začátku plnění	přelet, na kterém bylo jezero prázdné
2015	19. 05.	30. 07.
2016	01. 05.	01. 07.
2017	20. 05.	08. 07.
2018	03. 05.	19. 08.

Tab. 5: souhrn maximálních rozloh vodních ploch Hořejšího M. jezera, Spodního M. jezera a celého systému Merzbacherova jezera v letech 2015-2018 s odpovídajícím datem pořízení snímku.

rok	Hořejší M. jezero		Spodní M. jezero		celý systém M. jezera	
	datum	plocha [km ²]	datum	plocha [km ²]	datum	plocha [km ²]
2015	07. 07.	0,538	19. 07.	0,852	19. 07.	1,288
2016	25. 07.	0,612	07. 06.	0,968	07. 06.	1,488
2017	08. 07.	0,668	01. 06.	0,574	25. 06.	0,733
2018	07. 08.	0,442	07. 08.	0,538	07. 08.	0,981

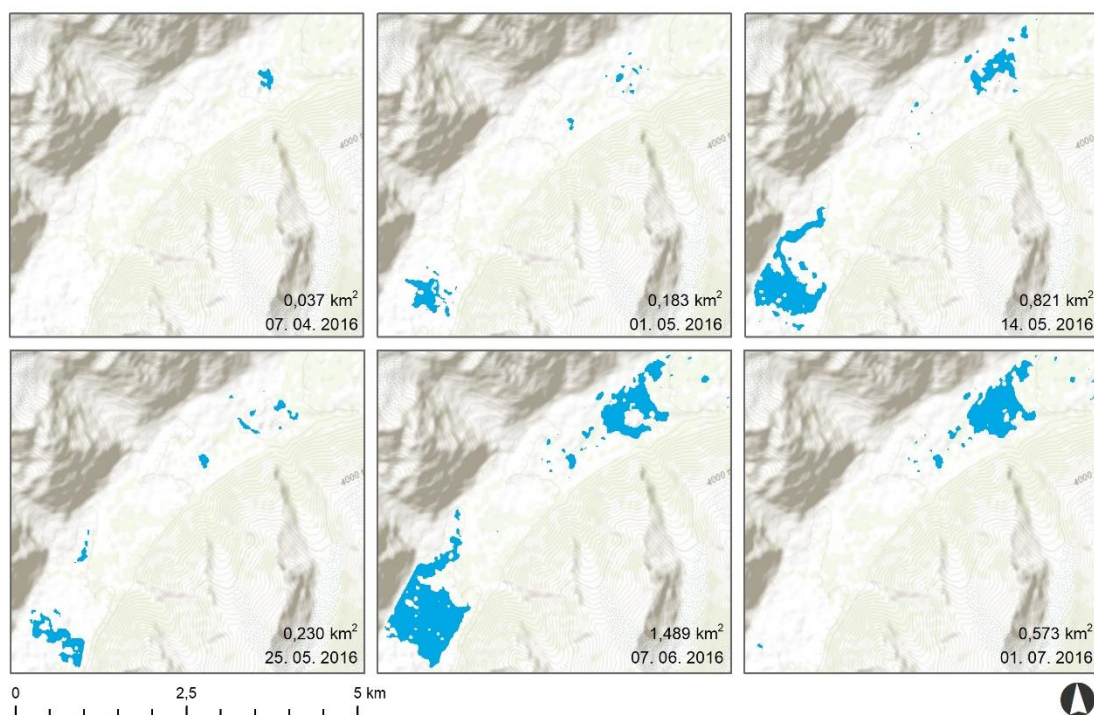
6.1.1 2015



Obr. 14: plnění a prázdnění Spodního M. jezera v roce 2015, na obrázku je zaznamenáno období od počátku plnění Spodního M. jezera až po snímek, na kterém je jezero již prázdné; rozlohy jednotlivých snímků se vztahují na součet vodních ploch Spodního i Hořejšího M. jezera.

Obr. 14 zobrazuje vývoj plnění a prázdnění jezer v roce 2015. První záznam o rozvoji vodní plochy Spodního M. jezera byl patrný z dat pořízených 19. května., na dalších obrázcích v pořadí je patrné zvětšování vodní plochy Spodního M. jezera a stoupající hodnota celkové rozlohy vodních ploch až do 19. července. 30. července už nebyla v místě Spodního M. jezera zaznamenána téměř žádná vodní plocha, lze tedy předpokládat, že mezi 19. a 30. červencem došlo k průvalu jezera. V tomto roce dosahovala maximální plocha jezer 1,288 km².

6.1.2 2016



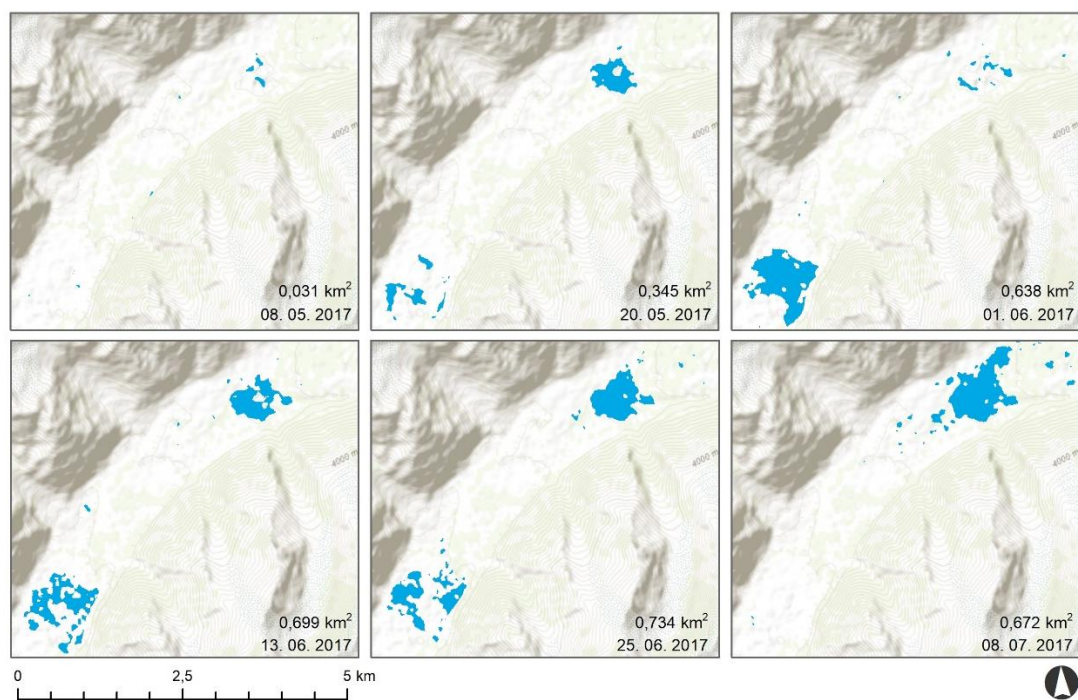
Obr. 15: plnění a prázdnění Spodního M. jezera v roce 2016, na obrázku je zaznamenáno období od počátku plnění Spodního M. jezera až po snímek, na kterém je jezero již prázdné; rozlohy jednotlivých snímků se vztahují na součet vodních ploch Spodního i Hořejšího M. jezera.

V roce 2016 byl rozvoj Spodního M. jezera poprvé patrný 1. května (obr. 15), poté došlo k náhlému nárůstu plochy 14. května na 0,821 km² s následným poklesem 25. května na 0,230 km². Tento pokles byl opět následovaný rychlým nárůstem plochy na 1,489 km² o 13 dní později. 1. července nebyla v oblasti Spodního M. jezera zaznamenána žádná vodní plocha. Je možné, že v tomto roce mohlo k vyprázdnění Spodního M. jezera dojít dvakrát, nebo se může jednat o přítomnost kusů ledu plovoucích na hladině jezera či o zdrsnění povrchu způsobeného silným větrem.

6.1.3 2017

Obr. 16 sleduje vývoj jezer v roce 2017. K prvnímu záznamu o vodní hladině opět dochází v květnu, konkrétně 20. května. Na obrázku z 1. června se akumuluje stále více vody ve Spodním M. jezeru, v Hořejším jezeru se však rozloha vodních ploch zmenšila a k jejímu nárůstu došlo opět 13. června. Maximální rozlohy 0,734 km²

dosáhly vodní plochy 25. června, na dalším dostupném snímku z 8. července nebylo již Spodní M. jezero patrné. Od 1. června do 8. července docházelo k postupnému zvětšování rozlohy Hořejšího M. jezera.



Obr. 16: plnění a prázdnění Spodního M. jezera v roce 2017, na obrázku je zaznamenáno období od počátku plnění Spodního M. jezera až po snímek, na kterém je jezero již prázdné; rozlohy jednotlivých snímků se vztahují na součet vodních ploch Spodního i Hořejšího M. jezera.

6.1.4 2018

Vývoj Spodního M. jezera v roce 2018 (obr. 17) je patrný již 3. května. V tomto roce je vidět postupné zvětšování jak Spodního, tak Hořejšího M. jezera až do 7. srpna, kdy celková plocha jezer dosahovala 0,981 km². 19. srpna již voda ve Spodním M. jezeru nebyla zaznamenána. Mezi 7. a 19. srpnem tak nejspíše došlo k průvalu Spodního M. jezera.



Obr. 17: plnění a prázdnění Spodního M. jezera v roce 2018, na obrázku je zaznamenáno období od počátku plnění Spodního M. jezera až po snímek, na kterém je jezero již prázdné; rozlohy jednotlivých snímků se vztahují na součet vodních ploch Spodního i Hořejšího M. jezera.

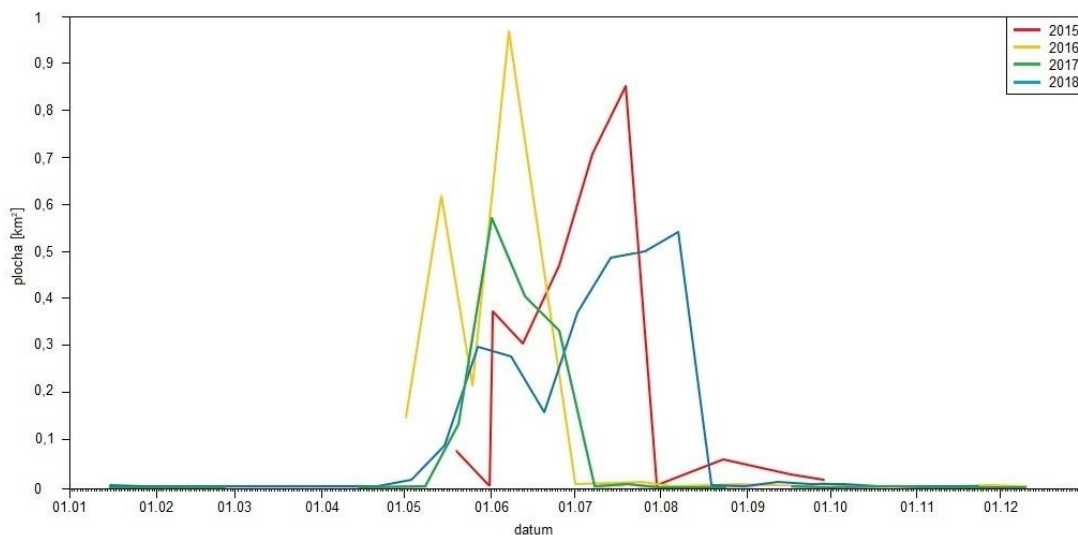
6.2 Vývoj vodních ploch za celé sledované období

Na obr. 19 je zobrazen vývoj vodních ploch Hořejšího i Spodního M. jezera za celé sledované období 15.10.2014 – 27.2.2019 pomocí plošného grafu. Hořejší M. jezero, podle interpretace výsledných dat, přetrvává celoročně ať už v podobě otevřeného

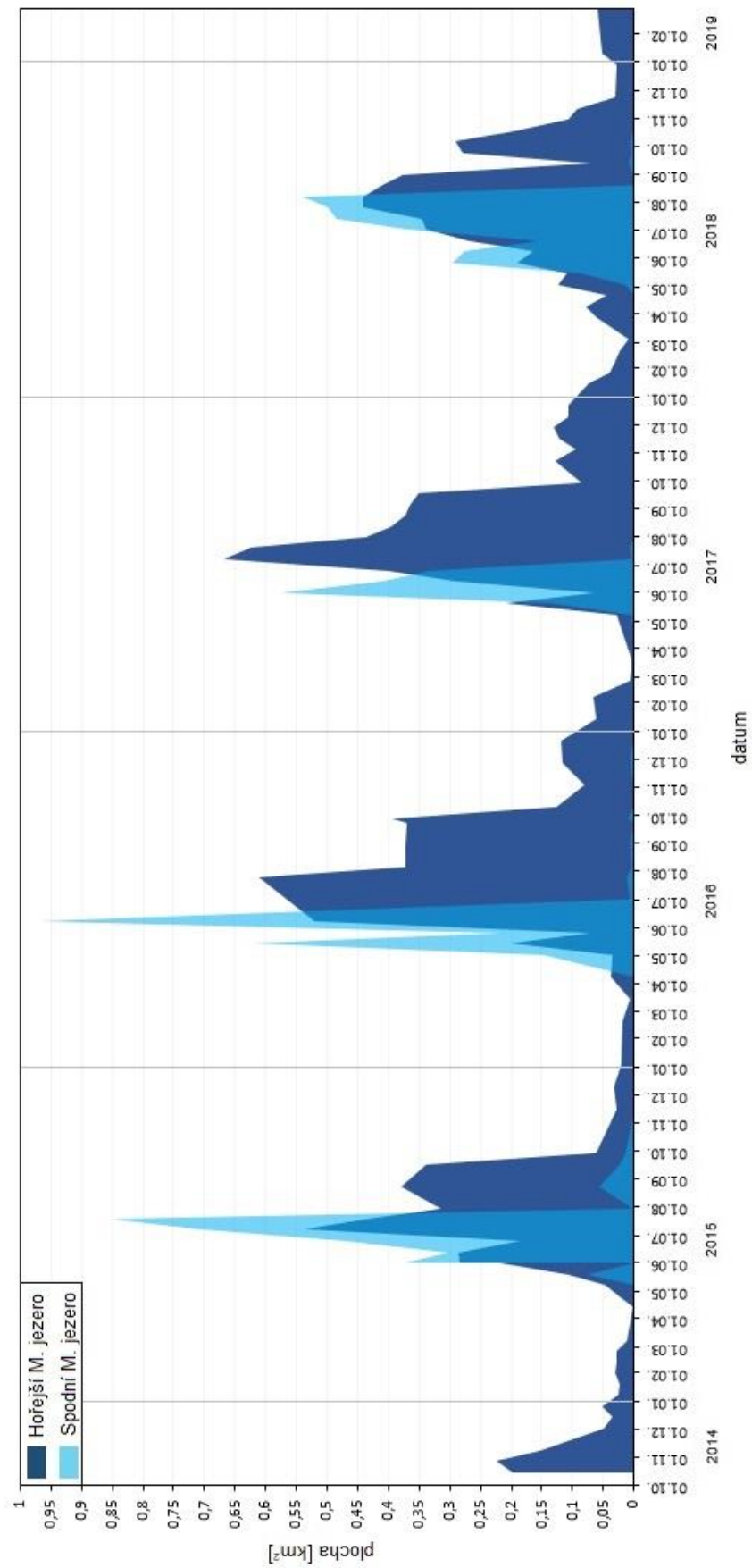
hladiny nebo hladiny zamrzlé, avšak největší rozsah vodních ploch je zaznamenán v období od června do října až listopadu. Největších rozloh vodních ploch dosahuje Hořejší M. jezero těsně před nebo po vyprázdnění Spodního M. jezera. Nejmenší rozlohy jezera byly zaznamenány v období března a dubna.

U Spodního M. jezera lze i z malého počtu sledovaných let pozorovat určitý trend, k plnění jezera dochází na začátku nebo v polovině května a na začátku července nebo srpna dojde k vyprázdnění veškeré identifikované vody. Hodnoty rozlohy vodních ploch Spodního M. jezera dosahují svého maxima vždy bezprostředně před vyprázdněním jezera, i když se každý rok tyto hodnoty liší. V roce 2016 byl zaznamenán významný pokles v rozloze vodní hladiny 25. května následovaný opětovným nárůstem. To může značit, že tento rok došlo k průvalu jezera dvakrát, může se však také jednat o přítomnost plovoucích ker a nebo o efekt větru, který zvýší hodnoty zpětného rozptylu.

Doplňující zobrazení grafu vývoje vodních ploch Spodního M. jezera v průběhu let v období 2015-2018 je uvedeno na obr. 18.



Obr. 18: graf porovnávající rozlohy vodních ploch Spodního M. jezera v průběhu roku v letech 2015-2018



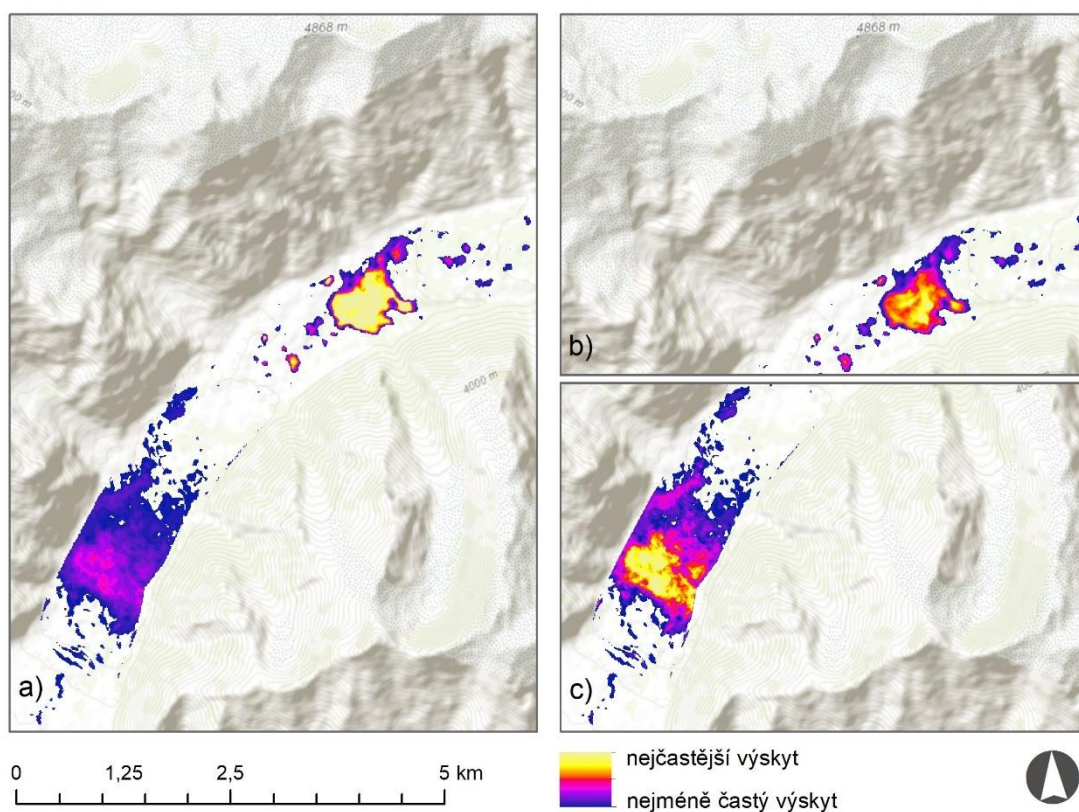
Obr. 19: zobrazení vývoje rozloh vodních ploch Hornějšího a Spodního M. jezera na časové ose ve sledovaném období let 2014 - 2019

6.3 Analýza oblastí výskytu vodních ploch

Na obr. 20 je znázorněna četnost výskytu buněk vodních ploch v průběhu sledovaného období 15.10.2014 – 27.2.2019. Hořejší M. jezero má tendenci přetrvávat ve velké míře téměř celoročně každý rok, zatímco ve Spodním M. jezeru se voda akumuluje pouze v letním období, proto je četnost výskytu vody v tomto místě nižší (obr. 20 a)).

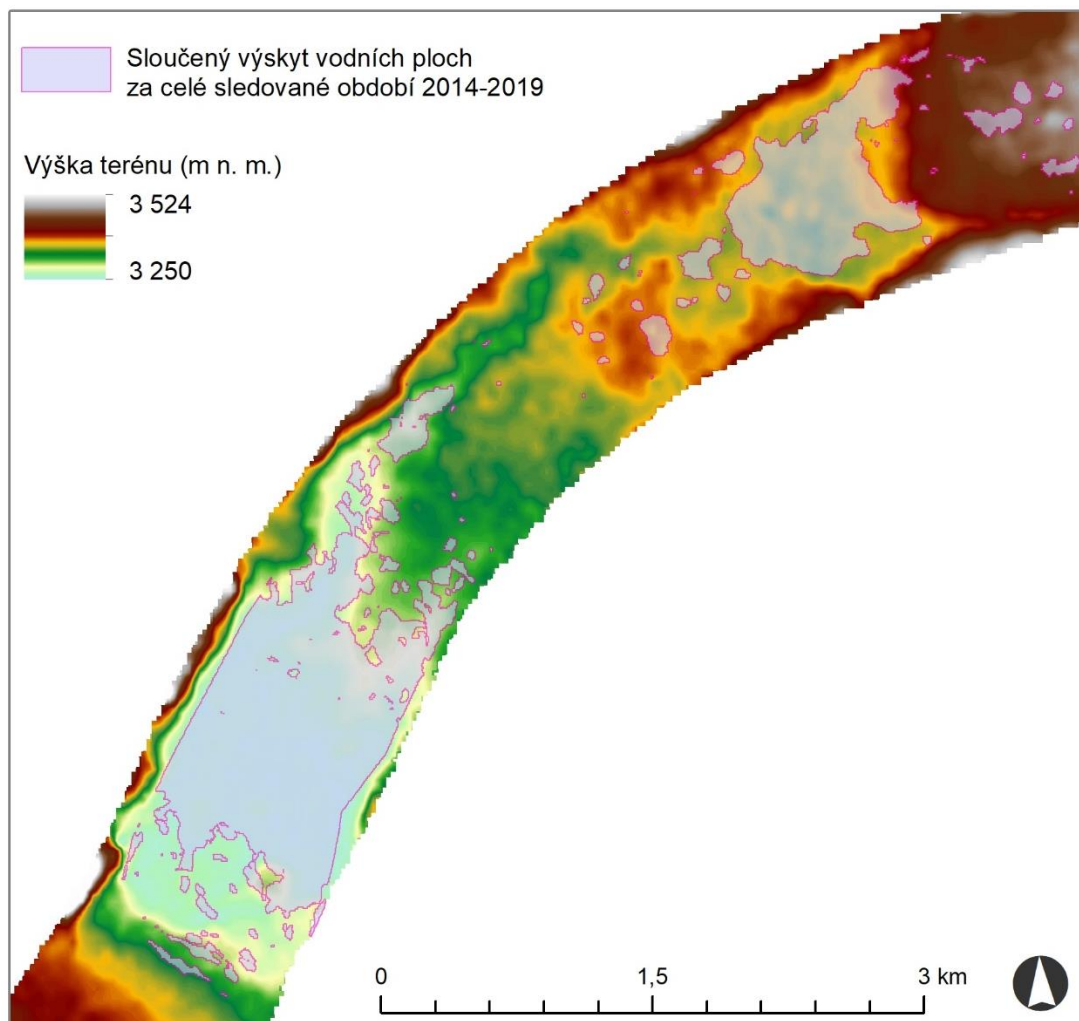
Obr. 20 b) a c) zobrazují četnost výskytu vodních ploch pouze v jednom z jezer nezávisle na sobě, pro lepší vizuální porovnání. Je patrné, že u Hořejšího M. jezera se voda akumuluje téměř v celém rozsahu jezera, nejčastěji však ve středové části, k rozlévání jezera do krajů pak dochází minimálně. Stejně tak menší vodní plošky v okolí jezera se vyskytují velmi často, častěji však v jižní části pod jezerem, jen s rozdílem svého rozsahu.

U Spodního M. jezera je výskyt spíše sporadický, voda se zde akumuluje pouze v letním období. K nejčastějšímu výskytu vody ve Spodním M. jezeru dochází nejvíce v jižní části u ledovcové hráze.



Obr. 20: znázornění oblastí výskytu vodních ploch v letech 2014 – 2019, a) celková četnost výskytu vodních ploch pro celou oblast zájmu, b) četnost výskytu vodních ploch pouze v Hořejším M. jezeru, c) četnost výskytu vodních ploch pouze ve Spodním M. jezeru

Na obr. 21 je znázorněn sloučený výskyt všech vodních ploch soustavy Merzbacherova jezera za celé sledované období 15.10.2014 – 27.2.2019. Vrstva vodních ploch je podložena výškovým modelem terénu SRTM30. Z obrázku lze vyčíst, že oblasti vodních ploch se vyskytují především v oblastech terénních depresí. Lokace identifikovaných jezer tedy odpovídá morfologii terénu.



Obr. 21: zobrazení výskytu vodních ploch soustavy Merzbacherova jezera za celé sledované období let 2014-2019 na podkladu terénních výškových dat SRTM30

7 Diskuse

Po zpracování dat z družic Sentinel-1A a Sentinel-1B byly identifikovány vodní plochy v zájmovém území soustavy Merzbacherova jezera, které byly dále rozlišovány na plochy Hořejšího a Spodního M. jezera, přičemž k průvalům vody, které způsobují ledovcové záplavy dochází u Spodního M. jezera.

Z výsledků vyplývá, že k začátku plnění Spodního M. jezera došlo ve všech pozorovaných letech (2015-2018) v měsíci květnu. V letech 2016 a 2017 bylo plnění zaznamenáno již na snímcích z počátku května, v letech 2015 a 2018 až ve druhé polovině měsíce (obr. 18; obr. 19; tab. 4). V letech 2016 a 2017 dosahovalo jezero největších rozloh již na snímcích pořízených na začátku června a vyprázdnění jezera bylo pozorováno na snímcích z počátku července. V roce 2015 však dosahovalo jezero svého maxima až na snímku z druhé poloviny července a vyprázdnění bylo patrné na snímku pořízeném na konci července. V roce 2018 byla největší plocha jezera zaznamenána až na snímku z počátku srpna a vyprázdnění jezera bylo patrné na snímku z 19. srpna (tab. 4; tab. 5).

Díky více než stoleté řadě záznamů o datech průvalu Merzbacherova jezera, které shromáždil a publikoval Glazirin (2010), lze porovnat výsledná data vyprázdnění Spodního M. jezera z této práce (tab. 4) s daty v minulých desítkách let (příloha 3). Od počátku časové řady (1902-2005) docházelo od roku 1902 až do roku 1978 dle záznamů k průvalu jezera nejčastěji na začátku října nebo září, v srpnu nebo červenci došlo jen k několika málo průvalům. Ovšem od roku 1982 do roku 2005 docházelo k průvalům jezera nejčastěji v srpnu, od roku 2000 potom stále častěji již i v červenci. Kingslake et Ng (2013) doplňují časovou řadu údajů o průvalech o roky 2005 – 2008, ke kterým došlo také v červenci. Výsledky této práce tak navazují na tyto řady. V letech 2015-2017 bylo zřejmé vyprázdnění Spodního M. jezera již na snímcích pořízených v červenci a v roce 2018 v srpnu. Ani jeden z autorů však neuvádí rozlohy ploch Merzbacherova jezera před vyprázdněním, v čemž spočívá unikátnost této práce.

U rozloh vodních ploch Hořejšího M. jezera docházelo dle výsledků k obdobnému trendu, kdy největší vodní plochy byly zaznamenány v průběhu letních měsíců (obr. 19), ale na rozdíl od Spodního M. jezera byly vodní plochy v oblasti Hořejšího M. jezera identifikovány na všech snímcích celého sledovaného období

15.10.2014 – 27.2.2019. V případě chladných měsíců může jít například o zamrzlou vodní hladinu, jejíž plocha však může být ovlivněna drsností ledu, nebo sněhovou pokrývkou. Maximální plochy vodních hladin Hořejšího M. jezera v letech 2015 - 2017 byly zaznamenány na snímcích z průběhu měsíce července, jen v roce 2018 bylo maximum zaznamenáno až na počátku srpna. K významnému poklesu rozloh identifikovaných vodních ploch Hořejšího M. jezera došlo v letech 2015-2017 na počátku října a v roce 2018 v první polovině září s opětovným zvětšením rozlohy a následným snížením rozlohy na začátku listopadu.

Je nutné podotknout, že výsledné vodní plochy byly identifikovány především na základě stanovených prahových hodnot a výsledek by se mohl s každou desetinou lišit. Ideální by bylo nastavit prahovou hodnotu pro každý snímek zvlášť, nicméně při zpracovávání velkého objemu dat se ukázalo jako dostačující stanovit unikátní prahové hodnoty pro každý relativní orbit. Pro snímky s relativním orbitem 136 byla prahová hodnota nastavena na -17,5 dB a pro snímky s relativním orbitem 158 na -15 dB. Rozdíl v těchto hodnotách je především díky tomu, že tyto relativní orbity mají jiný směr přeletu a díky tomu i jiné rozložení hodnot zpětného rozptylu. Jelikož tato oblast není ovlivněna lidskou činností je jisté, že nemohlo dojít k chybné interpretaci vodních ploch například s umělými povrchy jako jsou asfaltové povrchy a podobně. Například v publikaci Wangchuk et al. (2019) byla průměrná prahová hodnota pro mapování ledovcových jezer stanovena na -14,52. Ale všeobecně platí, že různé krajinné oblasti ve světě budou mít odlišné hodnoty zpětného rozptylu, tudíž následně i rozdílné prahové hodnoty. U jiných autorů se lze setkat také s plně automatizovaným určováním prahových hodnot při mapování vodních ploch pomocí dat z družic Sentinel-1 (Twele et al., 2016; Duy, 2015). Ovšem u tohoto přístupu se lze setkat s obtížemi například při mapování ve specifických lokalitách, kde může docházet například právě k interpretaci oblastí radarového stínu jako vodních ploch nebo k záměně specifického šumu snímku za vodní plochy (Duy, 2015).

Při posuzování výsledků především u Spodního M. jezera musí být brán zřetel na možnou přítomnost ker a kusů ledu plovoucích na hladině, které jsou pro toto jezero typické. Tyto jsou díky jiné hodnotě zpětného rozptylu identifikovány jako ne-vodní plochy, i když se pod nimi voda může nacházet. Tato práce se věnovala pouze identifikaci otevřených vodních ploch, pro získání přesnějších výsledků by bylo vhodné vylíšit i plochy, kde se vyskytují kry nebo kusy ledu, pokud tam nějaké jsou,

a ty zohlednit při interpretaci již zjištěných vodních ploch. Dalším faktorem ovlivňujícím výslednou velikost a podobu vodních ploch může být silný vítr, který může mít za následek zvlnění vodní hladiny a zdrsnění jejího povrchu (Bioresita et al., 2018).

Použití dat z družic Sentinel-1 se jeví jako spolehlivá metoda pro identifikaci a mapování stavu supraglaciálních jezer. Hlavní výhodou je především nezávislost těchto dat na denní době nebo na výskytu oblačnosti, která je ve vysokohorských oblastech častým jevem. Vysoké temporální rozlišení dat z družic Sentinel-1 umožňuje mapování v pravidelných intervalech cca 6-12 dnů, s ohledem na vybranou oblast, a je vhodné jak pro dlouhodobé mapování a sledování změn nebo pro sledování stavu po katastrofické události. Pro zájmovou oblast této práce je frekvence snímání 12 dnů. Výsledky pozorování by výrazně zpřesnilo, kdyby se na tomto území snímalo s 6ti denní frekvencí podobně jako se snímá například území Evropy.

Výsledky analyzovaných dat však mohou být znatelně ovlivněny stanovením prahové hodnoty (Twele et al., 2016) nebo přítomností objektů na vodní hladině. Vliv na identifikaci vodních ploch může mít také silný vítr, který ovlivňuje drsnost povrchu (Čotar et al., 2016). Dalším charakteristickým problémem při použití těchto a dalších SAR dat především ve vysokohorských oblastech je vznik takzvaného radarového stínu na odvrácené straně horských vrcholů. Neboť hodnoty v tomto stínu jsou velmi nízké a po použití prahových hodnot jsou identifikovány jako vodní plochy. Tomu se lze vyhnout vhodným zvolením masek v dané oblasti.

8 Závěr

Diplomová práce se zabývala možnostmi využití radarových snímků z konstelace družic Sentinel-1A a 1B, pro monitorování ledovcových jezer. Za tímto účelem byla opatřena časová řada 100 snímků (15.10.2014 – 27.2.2019) typu GRD s režimem snímání IW pro vybranou velehorskou oblast v pohoří Ťan-Šan s hlavní zájmovou lokalitou soustavy Merzbacherova jezera v ledovcovém systému Severní a Jižní Inylček. Po předzpracování dat, byly pomocí určené prahové hodnoty intenzity (-17,5 respektive -15 dB) vylíšeny vodní plochy. Tyto byly následně zkoumány a změny v rozsahu Spodního a Hořejšího M. jezera v jednotlivých letech i v rámci celého sledovaného období byly kvantitativně a kvalitativně zanalyzovány.

Zjištěná data plnění a prázdnění Spodního M. jezera byla porovnána z rozsáhlými řadami pozorování z minulosti. Byla potvrzena periodicitu tohoto jevu, který má za následek ledovcové záplavy. K těmto záplavám dochází každoročně v letních měsících kvůli tání ledovců. Po porovnání výsledků této práce s časovou řadou průvalů jezera v minulém století vyšlo najevo, že k průvalu jezera dochází v dlouhodobém měřítku stále o něco dříve. Stávající klimatická změna má negativní vliv na tání ledovců, které souvisí s plněním a tvorbou ledovcových jezer, proto je důležité takové oblasti monitorovat například z důvodu včasného varování před hrozící katastrofou.

Významným faktorem ovlivňujícím výsledky pozorování je stanovení prahové hodnoty pro vylíšení vodních ploch, výsledky mohou být dále ovlivněny povětrnostními podmínkami, které mohou zdrsnit vodní hladinu, nebo přítomností objektů na hladině jako jsou například plovoucí kusy ledu. Pro zpracování dat a zjištění rozsahu vodních ploch je vhodné zvolit automatizovaný postup, který je možno replikovat při pravidelném monitorování zájmové oblasti.

Radarová data z konstelace družic Sentinel-1A a 1B vykazala potenciál pro mapování a identifikaci ledovcových jezer ve velehorských oblastech, kde může být obtížné zprostředkovat terénní měření, nebo kde je nsnadné získat vhodná data z družic s optickými senzory, především kvůli výskytu oblačnosti nebo nutnosti pořizování snímků přes den. Vysoké temporální rozlišení a rychlá dostupnost dat zajišťují datům z družic Sentinel-1 stále větší oblibu mezi uživateli a otevírají tak dveře novým možnostem v dálkovém průzkumu Země.

9 Přehled literatury a použitých zdrojů

- Allan, N. J. R., Bruk, I. S, Rantsman Y. Y., 2019: Tien Shan (online) [cit. 2019.11.02], dostupné z: <<https://www.britannica.com/place/Tien-Shan>>
- Allworth, E., Sinor, D., 2019: Kyrgyzstan (online) [cit. 2019.10.02], dostupné z: <<https://www.britannica.com/place/Kyrgyzstan>>
- Bahr, D. B., Singh, V. P., Singh, P. et Haritashya, U. K., 2011: Encyclopedia of snow, ice and glaciers. Springer, Netherlands.
- Bioresita, F., Puissant, A., Stumpf, A. et Malet, J., 2018: A Method for Automatic and Rapid Mapping of Water Surfaces from Sentinel-1 Imagery. Remote Sensing, 10(2), 217. <https://doi.org/10.3390/rs10020217>
- Bormudoi, A., Shabunin, A., Hazarika, M. K., Zaginaev, V. et Samarakoon, L., 2012: Studying the outburst of the Merzbacher Lake of in Ylchek glacier, Kyrgyzstan with remote sensing and field data. 33rd Asian Conference on Remote Sensing 2012, ACRS 2012, 1.
- Bourbigot, M., Harald, J. et Riccardo, P., 2016: Sentinel-1 Product Definition. ESA Unclassified.
- Campbell, J. G., 2005: Inventory of Glaciers, Glacial Lakes and the Identification of Potential Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) Affected by Global Warming in the Mountain of India, Pakistan and China/Tibet. Sustainable Development, 48.
- Campbell, J. B., Wynne, R. H., 2011: Introduction to remote sensing. The Guilford Press, New York, 31-34.
- Carrivick, J. L. et Tweed, F. S., 2013: Proglacial lakes : character , behaviour and geological importance. Quaternary Science Reviews, 78, 34–52. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.028>
- CCRS, 2014: Fundamentals of Remote Sensing. (T. C. C. for Remote & Sensing, Eds.). Natural Resources Canada, Vancouver.
- Cook, K. L., Andermann, C., Gimbert, F., Adhikari, B. R. et Hovius, N., 2018: Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya. Science, 362(6410), 53–57.

- Čotar, K., Oštir, K. et Kokalj, Ž., 2016: Radar satellite imagery and automatic detection of water bodies. *Geodetski glasnik*, 50(47), 5–15.
- Dobrovolný, P., 1998: *Dálkový průzkum Země*. Brno.
- Duy, N. B., 2015: Automatic detection of surface water bodies from Sentinel - 1 SAR images using Valley - Emphasis method. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 37, 328–343.
- ESA – Sentinel Online, 2019 a: Level-1 Product Formatting (online) [cit. 2019.15.03], dostupné z: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-product-formatting>>
- ESA – Sentinel Online, 2019 b: Product Types and Processing Levels (online) [cit. 2019.13.03], dostupné z: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels>>
- ESA, 2016: Sentinel-1. (online) [cit. 2018.15.10], dostupné z: <http://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/Sentinel-1_sheet_170321.pdf>
- Fatland, D. R. et Lingle, C. S., 1998: Analysis of the 1993-95 Bering Glacier (Alaska) surge using differential SAR interferometry. *Journal of Glaciology*, 44(148), 532–546. <https://doi.org/10.1017/S0022143000002057>
- Fussell, J. et Rundquist, D., 1986: On defining remote sensing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(9), 1507–1511.
- Glazirin, G. E., 2010: A century of investigations on outbursts of the ice-dammed lake merzbacher (Central Tien Shan). *Austrian Journal of Earth Sciences*, 103(2), 171–179.
- Helm, A., Wetzell, H. U., Falck, C., Michajljow, W., Bens, O., Mayer, C., ... Rothacher, M., 2008: The 2005 Lake Merzbacher GLOF event and status of future planned activities in the Tien Shan region. *Geophysical Research Abstracts*, 10, 3–5.
- Huang, W., DeVries, B., Huang, C., Lang, M. W., Jones, J. W., Creed, I. F. et Carroll, M. L., 2018: Automated Extraction of Surface Water Extent from Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 10(797), 1–18. <https://doi.org/10.3390/rs10050797>

- Huggel, C., Kääb, A., Haeberli, W. et Teyssiere, P., 2002: Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts : a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316–330. <https://doi.org/10.1139/T01-099>
- Joseph, G., 2005: *Fundamentals of remote sensing*. Universities press.
- Kingslake, J. et Ng, F, 2013: Quantifying the predictability of the timing of jökulhlaups from Merzbacher Lake, Kyrgyzstan. *Journal of Glaciology*, 59(217), 805–818. <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J156>
- Koskinen, J. T., Pulliainen, J. T. et Hallikainen, M. T., 1997: The Use of ERS-1 SAR Data in Snow Melt Monitoring. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3), 601–610.
- Kropáček, J., Neckel, N., Tyrna, B., Holzer, N., Hovden, A., Gourmelen, N., ... Buchroithner, M., 2015: Repeated glacial lake outburst flood threatening the oldest Buddhist monastery in north-western Nepal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(10), 2425–2437. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2425-2015>
- Kropatsch, W. G. et Strobl, D., 1990: The Generation of SAR Layover and Shadow Maps From Digital Elevation Models. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(I), 98–107.
- Marzahn, P., Tsyganskaya, V., Martinis, S. et Ludwig, R., 2018: Sentinel-1 time-series for the detection of temporary flooded vegetation, 20, 17579.
- Mayer, C., Lambrecht, A., Hagg, W., Helm, A., & Scharrer, K., 2008: Post-drainage ice dam response at Lake Merzbacher, Inylchek glacier, Kyrgyzstan. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 90 A(1), 87–96. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2008.00336.x>
- Merzbacher, G., 1905: *The Central Tian-Shan Mountains 1902-1903*. J. Murray, London.
- McColl, R. W., 2014: *Encyclopedia of world geography (Vol. 1)*. Infobase Publishing.
- Ng, F. et Liu, S., 2009: Temporal dynamics of a jökulhlaup system. *Journal of Glaciology*, 55(192), 651–665. <https://doi.org/10.3189/002214309789470897>

- Paul, F., 2000: Evaluation of different methods for glacier mapping using landsat TM, Proceedings, EARSeI-SIG Workshop (1), 239–245.
- Pavelka, K. et Halounová, L., 2008: Dálkový průzkum země. Vydavatelství ČVUT, Praha.
- Pavelková Chmelová, R. et Frajer, J., 2013: Základy fyzické geografie 1 - hydrologie (1st ed.). Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc.
- Richards, J. A. et Jia, X., 2006: Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00164-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00164-7)
- Richardson, S. D. et Reynolds, J. M., 2000: An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65, 31–47.
- Robson, B. A., Nuth, C., Dahl, S. O., Hölbling, D., Strozzi, T. et Nielsen, P. R., 2015: Automated classification of debris-covered glaciers combining optical, SAR and topographic data in an object-based environment. *Remote Sensing of Environment*, (170), 372–387.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodríguez, E. et Goldstein, R. M., 2000: Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceeding of the Ieee*, 88(3), 333–382. <https://doi.org/10.1109/5.838084>
- Rott, H. et Matzler, C., 1987: Possibilities and limits of synthetic aperture radar for snow and glacier surveying. *Annals of Glaciology*, 9, 195–199.
- Salvi, S., Stramondo, S., Funning, G. J., Ferretti, A., Sarti, F. et Mouratidis, A., 2012: The Sentinel-1 mission for the improvement of the scientific understanding and the operational monitoring of the seismic cycle. *Remote Sensing of Environment*, 120, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.029>
- Shan, C. T., Hagg, W., Mayr, E., Mannig, B., Reyers, M., Schubert, D., ... Mayer, C., 2018: Future Climate Change and Its Impact on Runoff Generation from the Debris-Covered Inylchek Glaciers, Central Tian Shan, Kyrgyzstan. *Water*, 10, 1513. <https://doi.org/10.3390/w10111513>
- Šobr, M., 2008: Nebezpečná jezera v Kyrgyzstánu. *Geografické Rozhledy*, 18(2), 12–13.

- Strozzi, T., Wiesmann, A., Käab, A., Joshi, S. et Mool, P., 2012: Glacial lake mapping with very high resolution satellite SAR data. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(8), 2487–2498. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2487-2012>
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... Rostan, F., 2012: GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.05.028>
- Twele, A., Cao, W., Plank, S., Martinis, S., Cao, W. et Plank, S., 2016: Sentinel-1-based flood mapping : a fully automated processing chain. *International Journal of Remote Sensing*, 37(13), 2990–3004. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1192304>
- Vuichard, D. et Zimmermann, M., 1987: The 1985 catastrophic drainage of a moraine-dammed lake, Khumbu Himal, Nepal: Cause and consequences. *Mountain Research and Development*, 7(2), 91–110.
- Walder, J. S. et Costa, J. E., 1996: Outburst floods from glacier-dammed lakes: the effect of mode of lake drainage on flood magnitude. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21(8), 701–723. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1096-9837\(199608\)21:8<701::aid-esp615>3.0.co;2-2](https://doi.org/10.1002/(sici)1096-9837(199608)21:8<701::aid-esp615>3.0.co;2-2)
- Wangchuk, S., Bolch, T. et Zawadzki, J., 2019: Towards automated mapping and monitoring of potentially dangerous glacial lakes in Bhutan Himalaya using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar data. *International Journal of Remote Sensing*, 1–26. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1569789>
- Westerhoff, R. S., Kleuskens, M. P. H., Winsemius, H. C., Huizinga, H. J., Brakenridge, G. R. et Bishop, C., 2013: Automated global water mapping based on wide-swath orbital synthetic-aperture radar. *Hydrology and Earth System Science*, 651–663. <https://doi.org/10.5194/hess-17-651-2013>
- Winsvold, S. H., 2017: Mapping glaciers using time-series of remote sensing data. University of Oslo, Oslo.
- Winsvold, S. H., Käab, A., Nuth, C., Andreassen, L. M., Van Pelt, W. J. J. et Schellenberger, T., 2018: Using SAR satellite data time series for regional glacier mapping. *Cryosphere*, 12(3), 867–890. <https://doi.org/10.5194/tc-12-867-2018>

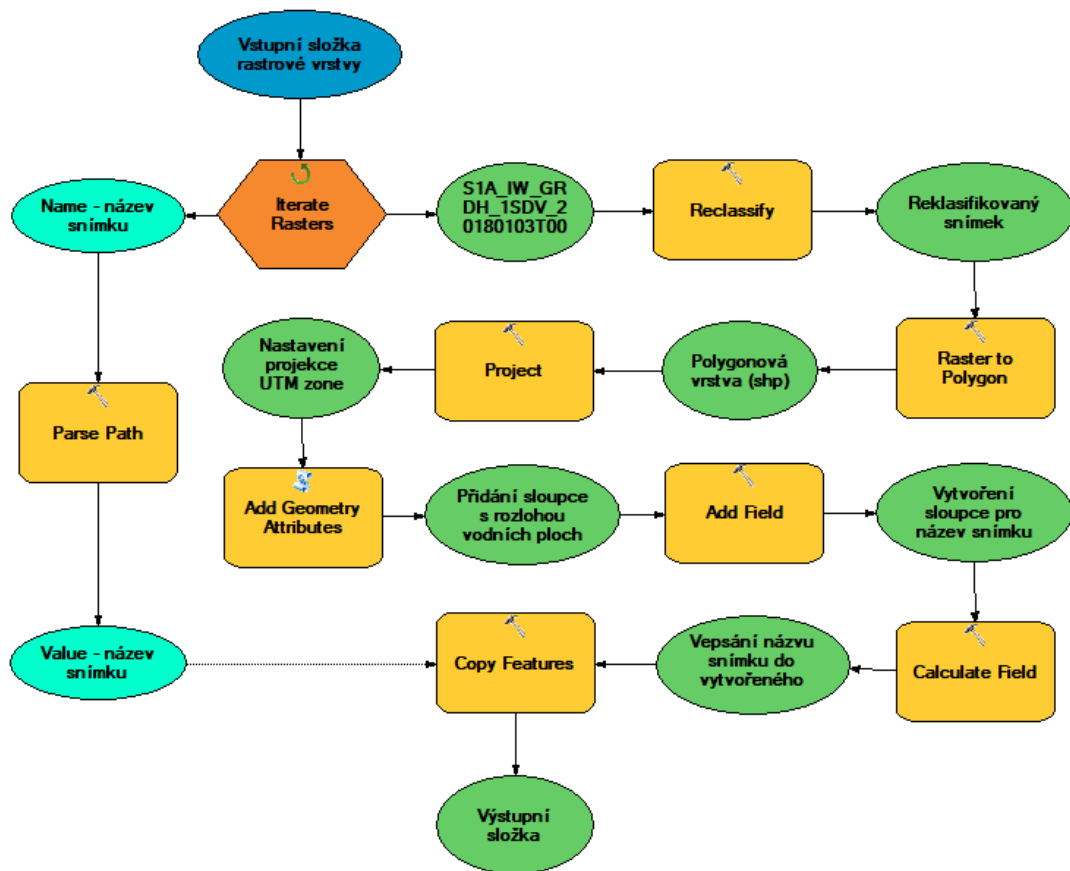
Xiaojun, Y. A. O., Shiyin, L. I. U., Lei, H. A. N., Meiping, S. U. N. et Linlin, Z., 2018:
Definition and classification system of glacial lake for inventory and hazards
study. *Journal of Geographical Sciences*, 28(2), 193–205.
<https://doi.org/10.1007/s11442-018-1467-z>

10 Přílohy

Příloha 1: Centrální Ťan-Šan - detailní mapa vytvořená při expedici Gottfrieda Merzbachera znázorňující část tohoto pohoří. Červené čáry označují trasu Merzbacherovy expedice v letech 1902-1903 (Merzbacher, 1905).



Příloha 2: sled funkcí aplikovaných v programu ArcMap v rámci postprocessingu vytvořený pomocí aplikace Model Builder



Příloha 3: data průvalu Merzbacherova jezera a odhadovaný rozsah trvání záplav v řece Inylček; převzato (Glazirin, 2010)

rok	datum	uvedený zdroj, rok
1902	srpen, mezi 21 a 31	Merzbacher, 1906
1931	září, 18-19	Ryzhov, 1959
1932	září, 8-12	Pogrebetskij, 1935
1933	srpen, mezi 21 a 31	Glazirin a Kagan, 1986
1935	září., mezi 1 a 10	Glazirin a Kagan, 1986
1936	říjen, mezi 1 a 10	Glazirin a Kagan, 1986
1937	říjen, mezi 1 a 10	Glazirin a Kagan, 1986
1938	říjen, mezi 21 a 31	Glazirin a Kagan, 1986
1939	srpen, 1	Ajrapet'yants a Bakov, 1971
1940	říjen, mezi 11 a 20	Glazirin a Kagan, 1986
1941	říjen, mezi 1 a 10	Glazirin a Kagan, 1986
1942	říjen, mezi 1 a 10	Glazirin a Kagan, 1986
1943	září, 22	Glazirin and Kagan, 1986
1949	srpen, 1-3	Ajrapet'yants a Bakov, 1971
1954	srpen, 24	Ajrapet'yants a Bakov, 1971
1956	září, 2	Ajrapet'yants a Bakov, 1971
1957	červenec, 25; srpen, 31	Glazirin a Kagan, 1986
1958	září, mezi 1 a 10	Glazirin a Kagan, 1986
1959	srpen, 26	Glazirin a Kagan, 1986
1960	červenec, 22; září, 4	Glazirin a Kagan, 1986
1961	září, 9	Ajrapet'yants a Bakov, 1971
1962	září, 15	hydrologická ročenka
1963	září, 7-9	hydrologická ročenka
1964	září, 16	hydrologická ročenka
1965	srpen, 16	hydrologická ročenka
1966	červenec, 4; prosinec, 27	Ajrapet'yants a Bakov, 1971
1967	září, 7	Ajrapet'yants a Bakov, 1971
1970	září, 1	Glazirin a Kagan, 1986
1978	září, mezi 1 a 10	Glazirin a Kagan, 1986
1979	žádné záplavy	Glazirin a Kagan, 1986
1980	květen, 15; září, 2	hydrologická ročenka
1981	červenec, 8; srpen, 8	hydrologická ročenka
1982	srpen, 14	Konovalov, 1990
1984	srpen, 20	Konovalov, 1990
1985	srpen, 9	Konovalov, 1990
1986	srpen, 26	Konovalov, 1990
1987	srpen, 14	Konovalov, 1990
1989	říjen, 10	Mavlyudov, 1996
1990	srpen, 5	Mavlyudov, 1996
2001	červenec, 27-28	ústní dokumentace
2002	srpen, 1-2	ústní dokumentace
2003	červenec, 22-23	ústní dokumentace
2004	srpen, 6-7	ústní dokumentace
2005	červenec, 13-15	ústní dokumentace

Příloha 4: rozlohy vodních ploch Hořejšího M. jezera, Spodního M. jezera a celková rozloha všech snímků s daty pořízení

snímek	datum pořízení	Hořejší M. jezero (km ²)	Spodní M. jezero (km ²)	celková plocha (km ²)
S1A_IW_GRDH_1SSV_20141015T004809_20141015T004840_002833_00331A_416F	15.10.2014	0,196847	0,000222	0,197069
S1A_IW_GRDH_1SSV_20141027T004808_20141027T004833_003008_0036D7_0625	27.10.2014	0,223117	0,000666	0,223783
S1A_IW_GRDH_1SSV_20141108T004743_20141108T004808_003183_003AA7_8D21	08.11.2014	0,153408		0,153408
S1A_IW_GRDH_1SSV_20141202T004808_20141202T004839_003533_004289_711E	02.12.2014	0,050323		0,050323
S1A_IW_GRDH_1SSV_20141214T004807_20141214T004832_003708_00467F_9CAE	14.12.2014	0,034338		0,034338
S1A_IW_GRDH_1SSV_20141226T004807_20141226T004838_003883_004A81_39A2	26.12.2014	0,051433		0,051433
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150107T004806_20150107T004831_004058_004E65_EB45	07.01.2015	0,026642		0,026642
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150119T004806_20150119T004837_004233_00525F_B005	19.01.2015	0,024274	0,000370	0,024644
S1A_IW_GRDH_1SDV_20150131T004806_20150131T004831_004408_005634_28B0	31.01.2015	0,030268		0,030268
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150212T004805_20150212T004836_004583_005A43_9EAF	12.02.2015	0,028566		0,028566
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150224T004805_20150224T004830_004758_005E62_22D7	24.02.2015	0,028788		0,028788
S1A_IW_GRDH_1SDV_20150308T004806_20150308T004837_004933_0062A2_F0C9	08.03.2015	0,010213		0,010213
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150413T004807_20150413T004832_005458_006F69_FAD3	13.04.2015	0,002812		0,002812
S1A_IW_GRDH_1SDV_20150425T004748_20150425T004813_005633_007381_E181	25.04.2015	0,022201		0,022201
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150507T004808_20150507T004833_005808_007780_806C	07.05.2015	0,046400		0,046400
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150519T004744_20150519T004809_005983_007B72_CBE7	19.05.2015	0,106860	0,075291	0,182151
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150531T004809_20150531T004834_006158_00801F_6C41	31.05.2015	0,220456	0,000444	0,220900
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150601T123402_20150601T123430_006180_0080C7_E9DB	01.06.2015	0,283798	0,372746	0,656543
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150612T004745_20150612T004810_006333_00853E_EB02	12.06.2015	0,286095	0,302859	0,588954
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150625T123403_20150625T123432_006530_008ADE_1FF1	25.06.2015	0,185300	0,469645	0,654945
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150707T123349_20150707T123414_006705_008F87_95EF	07.07.2015	0,538065	0,708456	1,246521
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150719T123403_20150719T123432_006880_00949D_BFB4	19.07.2015	0,435570	0,852817	1,288388
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150730T004747_20150730T004812_007033_0098EE_AD0B	30.07.2015	0,314879	0,001407	0,316286
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150823T004749_20150823T004814_007383_00A26F_2E41	23.08.2015	0,379482	0,057823	0,437306
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150916T004749_20150916T004814_007733_00ABE9_C460	16.09.2015	0,339523	0,024209	0,363732
S1A_IW_GRDH_1SSV_20150928T004806_20150928T004831_007908_00B0A2_B021	28.09.2015	0,060904	0,012882	0,073786
S1A_IW_GRDH_1SSV_20151115T004801_20151115T004826_008608_00C37D_76E9	15.11.2015	0,028862		0,028862
S1A_IW_GRDH_1SSV_20151209T004800_20151209T004825_008958_00CD5E_54AA	09.12.2015	0,031674		0,031674
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160102T004759_20160102T004824_009308_00D72A_9611	02.01.2016	0,020721		0,020721
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160219T004758_20160219T004823_010008_00EB7D_CABD	19.02.2016	0,018501		0,018501
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160314T004758_20160314T004823_010358_00F58D_8BBD	14.03.2016	0,006660		0,006660
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160407T004759_20160407T004824_010708_00FF87_C09E	07.04.2016	0,037371		0,037371
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160501T004800_20160501T004825_011058_010A51_6F74	01.05.2016	0,035004	0,147992	0,182996
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160514T123350_20160514T123415_011255_011087_01F5	14.05.2016	0,200393	0,620750	0,821144
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160525T004801_20160525T004826_011408_011599_E397	25.05.2016	0,072154	0,217805	0,289959
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160607T123352_20160607T123417_011605_011BD1_2E6C	07.06.2016	0,520671	0,967942	1,488613
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160701T123353_20160701T123418_011955_0126E0_6816	01.07.2016	0,566035	0,007182	0,573216
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160725T123354_20160725T123419_012305_013250_25BF	25.07.2016	0,611690	0,012512	0,624203
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160805T004806_20160805T004831_012458_01376C_99F7	05.08.2016	0,371120	0,003258	0,374377
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160829T004807_20160829T004832_012808_01431E_01B3	29.08.2016	0,371489	0,006589	0,378078
S1A_IW_GRDH_1SSV_20160922T004807_20160922T004832_013158_014E92_6AF9	22.09.2016	0,371045	0,002887	0,373932

snímek	datum pořízení	Hořejší M. jezero (km ²)	Spodní M. jezero (km ²)	celková plocha (km ²)
S1B_IW_GRDH_1SSV_20160928T004726_20160928T004751_002262_003CFB_9F56	28.09.2016	0,394577	0,009181	0,403758
S1B_IW_GRDH_1SSV_20161010T004726_20161010T004751_002437_0041DD_E9BC	10.10.2016	0,125951	0,001851	0,127802
S1B_IW_GRDH_1SSV_20161103T004726_20161103T004751_002787_004B8A_DAD8	03.11.2016	0,081625	0,001036	0,082661
S1B_IW_GRDH_1SSV_20161127T004725_20161127T004750_003137_005563_7055	27.11.2016	0,115443	0,005479	0,120922
S1B_IW_GRDH_1SSV_20161221T004724_20161221T004749_003487_005F62_4A8D	21.12.2016	0,119809	0,001110	0,120920
S1B_IW_GRDH_1SSV_20170114T004723_20170114T004748_003837_0069A2_FA70	14.01.2017	0,061866	0,000370	0,062236
S1B_IW_GRDH_1SSV_20170207T004722_20170207T004747_004187_00740C_95E7	07.02.2017	0,067342	0,000814	0,068156
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170225T004804_20170225T004829_015433_019558_C6D3	25.02.2017	0,005550	0,000148	0,005698
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170309T004804_20170309T004829_015608_019AA7_CEE3	09.03.2017	0,005254		0,005254
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170321T004804_20170321T004829_015783_019FDB_D55C	21.03.2017	0,003108		0,003108
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170414T004805_20170414T004830_016133_01AA5B_276F	14.04.2017	0,015837	0,000518	0,016355
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170508T004806_20170508T004831_016483_01B506_5241	08.05.2017	0,027011	0,003923	0,030934
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170520T004807_20170520T004832_016658_01BA60_974A	20.05.2017	0,210242	0,135336	0,345578
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170601T004807_20170601T004832_016833_01BF8C_C1BE	01.06.2017	0,063124	0,574720	0,637844
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170613T004808_20170613T004833_017008_01C534_F3C3	13.06.2017	0,290977	0,407920	0,698897
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170625T004809_20170625T004834_017183_01CA8B_0C97	25.06.2017	0,399980	0,333807	0,733787
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170708T123356_20170708T123421_017380_01D072_9A79	08.07.2017	0,668745	0,003850	0,672595
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170720T123357_20170720T123422_017555_01D5C7_72FB	20.07.2017	0,624270	0,006589	0,630859
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170731T004811_20170731T004836_017708_01DA81_00DB	31.07.2017	0,437719	0,000148	0,437867
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170812T004811_20170812T004836_017883_01DFD4_A116	12.08.2017	0,395538	0,001333	0,396870
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170824T004812_20170824T004837_018058_01E522_8D3F	24.08.2017	0,372005	0,001259	0,373263
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170905T004813_20170905T004838_018233_01EA6F_C93E	05.09.2017	0,366233		0,366233
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170917T004813_20170917T004838_018408_01EFE3_7E98	17.09.2017	0,351285	0,002517	0,353802
S1A_IW_GRDH_1SDV_20170929T004813_20170929T004838_018583_01F539_8AD0	29.09.2017	0,085768	0,001481	0,087249
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171023T004814_20171023T004839_018933_01FFEF_09AD	23.10.2017	0,128467	0,002369	0,130836
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171104T004814_20171104T004839_019108_020540_71B8	04.11.2017	0,095388	0,001407	0,096795
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171116T004813_20171116T004838_019283_020AB9_0B37	16.11.2017	0,121881	0,001629	0,123510
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171128T004813_20171128T004838_019458_02103B_415B	28.11.2017	0,131279	0,001629	0,132908
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171210T004812_20171210T004837_019633_0215B4_9552	10.12.2017	0,106637	0,001185	0,107822
S1A_IW_GRDH_1SDV_20171222T004812_20171222T004837_019808_021B1A_E846	22.12.2017	0,106933		0,106933
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180115T004811_20180115T004836_020158_022624_1976	15.01.2018	0,072670	0,002073	0,074743
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180127T004811_20180127T004836_020333_022BAF_DC2A	27.01.2018	0,039369	0,000666	0,040036
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180208T004811_20180208T004836_020508_023147_06D0	08.02.2018	0,029897	0,000444	0,030342
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180220T004810_20180220T004835_020683_0236DB_5BC3	20.02.2018	0,024347	0,000222	0,024569
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180304T004810_20180304T004835_020858_023C64_A442	04.03.2018	0,008732	0,000888	0,009621
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180328T004811_20180328T004836_021208_024785_5186	28.03.2018	0,062088	0,000370	0,062458
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180409T004811_20180409T004836_021383_024CFF_D5B5	09.04.2018	0,077777	0,000074	0,077851
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180421T004811_20180421T004836_021558_025274_2342	21.04.2018	0,045881	0,000296	0,046178
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180503T004812_20180503T004837_021733_0257F4_BAD4	03.05.2018	0,123955	0,014214	0,138169
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180515T004813_20180515T004838_021908_025D94_6CF3	15.05.2018	0,109079	0,086990	0,196069
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180527T004813_20180527T004838_022083_026319_B259	27.05.2018	0,189742	0,296803	0,486545
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180608T004814_20180608T004839_022258_026899_3CF6	08.06.2018	0,165024	0,275768	0,440792
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180620T004815_20180620T004840_022433_026DF2_0C13	20.06.2018	0,268330	0,157391	0,425721
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180702T004815_20180702T004840_022608_02730D_27CB	02.07.2018	0,338113	0,369108	0,707221

snímek	datum pořízení	Hořejší M. jezero (km ²)	Spodní M. jezero (km ²)	celková plocha (km ²)
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180714T004816_20180714T004841_022783_027843_28E7	14.07.2018	0,345441	0,485048	0,830489
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180726T004817_20180726T004842_022958_027DC9_B281	26.07.2018	0,442308	0,498591	0,940899
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180807T004818_20180807T004843_023133_02833F_8BB0	07.08.2018	0,442455	0,538723	0,981178
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180819T004818_20180819T004843_023308_0288EB_1403	19.08.2018	0,409747	0,002073	0,411821
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180831T004819_20180831T004844_023483_028E78_645D	31.08.2018	0,377705	0,001333	0,379037
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180912T004819_20180912T004844_023658_029413_6CB8	12.09.2018	0,070449	0,008884	0,079333
S1A_IW_GRDH_1SDV_20180924T004820_20180924T004845_023833_0299C5_48C1	24.09.2018	0,278467	0,005034	0,283502
S1A_IW_GRDH_1SDV_20181006T004820_20181006T004845_024008_029F80_C821	06.10.2018	0,291493	0,005478	0,296971
S1A_IW_GRDH_1SDV_20181018T004820_20181018T004845_024183_02A537_F121	18.10.2018	0,192183	0,001184	0,193367
S1A_IW_GRDH_1SDV_20181030T004820_20181030T004845_024358_02AAD3_764E	30.10.2018	0,107229	0,000148	0,107377
S1A_IW_GRDH_1SDV_20181111T004820_20181111T004845_024533_02B124_2C3F	11.11.2018	0,093762	0,000222	0,093984
S1A_IW_GRDH_1SDV_20181123T004820_20181123T004845_024708_02B795_ACA7	23.11.2018	0,030193	0,000222	0,030415
S1A_IW_GRDH_1SDV_20181229T004818_20181229T004843_025233_02CA28_0873	29.12.2018	0,028861		0,028861
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190110T004818_20190110T004843_025408_02D075_A5ED	10.01.2019	0,052542		0,052542
S1A_IW_GRDH_1SDV_20190227T004817_20190227T004842_026108_02E9AA_C3E9	27.02.2019	0,058314		0,058314