

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Geografie a kartografie



Karolína Drápelová

**Mise Messenger – využití obrazových dat k mapování povrchu
Merkuru**

Messenger mission – using image data to map the surface of
Mercury

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Lucie Červená, PhD.

Praha, 2025

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla použita k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 29.4.2025

.....

Karolína Drápelová

Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala Mgr. Lucii Červené, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce, cenné připomínky a vstřícnost. Dále pak děkuji své rodině a mému partnerovi za podporu a motivaci během celého studia.

Abstrakt

Na povrchu Merkuru se kromě impaktních kráterů nachází různé další charakteristické typy povrchových útvarů – pyroklastická ložiska a *hollows*, unikátní útvar specifický pro tuto planetu. Cílem této práce bylo identifikovat a rozlišit tyto dva typy povrchových útvarů a určit jejich mineralogické složení. Pro analýzu byla využita data z kamery MDIS-WAC. V rámci práce byla provedena série kroků předzpracování surových EDRWAC dat, zahrnující radiometrickou a geometrickou korekci, fotometrickou korekci (Hapkeho model) a vytvoření vícepásmové mozaiky. Při spektrální analýze byly využity metody neřízené klasifikace (*K-means*), *Linear Spectral Unmixing (LSU)* a *Spectral Angle Mapper (SAM)*. Výsledky ukázaly jasné spektrální rozdíly mezi pyroklastickými ložisky a *hollows*. *Hollows* vykazovaly vyšší odrazivost a výrazný absorpční pás v oblasti 830 nm, zatímco pyroklastická ložiska dosahovala nižší odrazivosti a slabšího absorpčního projevu. Pomocí metod *LSU* a *SAM* bylo určeno, že *hollows* pravděpodobně obsahují sulfid hořečnatý, zatímco pyroklastická ložiska jsou tvořena pyroxenem bohatým na titan.

Klíčová slova: Merkur, MESSENGER, MDIS, klasifikace, Linear Spectral Unmixing, Spectral Angle Mapper

Abstract

In addition to impact craters, the surface of Mercury features several other characteristic types of surface formations—pyroclastic deposits and hollows, a unique feature specific to this planet. The aim of this study was to identify and distinguish these two types of surface formations and determine their mineralogical composition. The analysis was based on data from the MDIS-WAC camera. A series of preprocessing steps was performed on the raw EDRWAC data, including radiometric and geometric correction, photometric correction (using the Hapke model), and the creation of a multi-band mosaic. For spectral analysis, methods such as unsupervised classification (K-means), Linear Spectral Unmixing (LSU), and Spectral Angle Mapper (SAM) were used. The results showed clear spectral differences between the pyroclastic deposits and the hollows. The hollows exhibited higher reflectance and a distinct absorption band around 830 nm, whereas the pyroclastic deposits had lower reflectance and a weaker absorption feature. Using the LSU and SAM methods, it was determined that the hollows likely contain magnesium sulfide, while the pyroclastic deposits are composed of titanium-rich pyroxene.

Key words: Mercury, MESSENGER, MDIS, classification, Linear Spectral Unmixing, Spectral Angle Mapper

Obsah

Seznam obrázků	7
Seznam použitých zkratk	9
Úvod	11
1 Průzkum Merkuru	13
1.1. Uskutečněné mise.....	13
1.1.1. Mariner 10.....	14
1.2. Probíhající a budoucí mise.....	15
1.2.1. BepiColombo	15
1.2.2. Mercury Lander.....	17
1.2.3. Mercury Scout.....	17
2 Mise MESSENGER	19
2.1. Přístroje sondy MESSENGER.....	21
2.1.1. Kamera MDIS	24
2.1.2. Spektrometr MASCS	25
3 Data: specifikace a dostupnost	27
3.1. Datové produkty z kamery MDIS-WAC	28
3.2. Datové produkty ze spektrometru MASCS-VIRS	31
3.3. Dostupnost dat.....	33
3.4. Studie využívající spektrální data	35
4 Analýza vybraného území	41
4.1. Výběr území	41
4.2. Předzpracování MDIS-WAC dat	42
4.2.1. Předzpracování v ISIS	44
4.3. Spektrální analýza	49
4.4. Výsledky.....	52
5 Diskuze	59
6 Závěr	62
Seznam použitých zdrojů:	63
Literatura	63
Internetové zdroje.....	66

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Ortografická projekce stínovaného reliéfu Merkuru – západní polokoule (bílý pruh je nezmapované území) (USGS 1979).....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2: Design solární plachetnice pro Mercury Scout (Parman a kol. 2025).....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 3: Start mise MESSENGER, nosná raketa Delta II (Solomon a kol. 2018).</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 4: Schéma sondy MESSENGER s umístěním přístrojů (Balogh a kol. 2007).....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 5: Přístroje sondy MESSENGER (Solomon a kol. 2018).</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 6: Rozdělení Merkuru na segmenty H1-H15 (Galluzzi 2015).</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 7: Výběr archivace a organizace dat při žádosti o data (ODE 2025f).</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 8: Klastry po aplikování k-means algoritmu v oblasti Dominici kráteru (Lucchetti a kol. 2018).....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 9: Průměrná spektra pro každý klastř, normalizovaná v hodnotě 0,558 μm (Lucchetti a kol. 2018).....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 10: Porovnání spektrálních křivek analyzovaných kráterů a křivek sulfidů a pyroxenů (Lucchetti a kol. 2018).</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 11: Spektra pro hollows a pyroklastická ložiska (Lucchetti a kol. 2021).</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 12: Možná kombinace lineárního míchání pro hollows a pyroklastická ložiska (Lucchetti a kol. 2021).</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 13: Porovnání spektrálních křivek hollows v různých kráterech (Pajola a kol. 2021).</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 14: Výsledné klastry po použití Gaussian mixture model (Emran, Stack 2025).</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 15: Spektra pro klastry, normalizovaná na 0,558 μm (Emran, Stack 2025).</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 16: Schéma vývoje hollows (Solomon a kol. 2018).</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 17: Funkce spiceinit se zvolenou variantou využití ISIS SPICE Web Service (vlastní zpracování).....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 18: Funkce mdiscal s doporučenými parametry (vlastní zpracování).....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 19: Zvolené parametry pro mapové zobrazení (vlastní zpracování).</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 20: Porovnání snímků filtru „C“ – 480 nm (vlevo před zpracováním, vpravo po zpracování) (vlastní zpracování).....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 21: 8-filtrová mozaika vytvořená z EDRWAC dat v ISIS zobrazující území kráteru Lermontov v nepravých barvách (R: filtr I–996 nm, G: filtr G–748 nm, B: filtr F–433 nm) (vlastní zpracování).....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 22: 8-filtrová mozaika z produktu RTMWAC zobrazující území kráteru Lermontov v nepravých barvách (R: filtr I–996 nm, G: filtr G–748 nm, B: filtr F–433 nm) (vlastní zpracování).....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 23: Vybraná území v nepravých barvách (filtry I, G, F) – modře oblast s hollows (1), červeně oblast s pyroklastickými ložisky (2) (vlastní zpracování).</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 24: Spektrální křivky pyroxenu bohatého na titan (vlastní zpracování na základě RELAB knihovny, PDS Geosciences Node 2025c).....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 25: Spektrální křivky sulfidu hořečnatého (vlastní zpracování na základě RELAB knihovny, PDS Geosciences Node 2025d).....</i>	<i>51</i>

<i>Obrázek 26: K-means klasifikace s osmi třídami. Modře území s hollows (1), červeně území s pyroklastickými ložisky (2) (vlastní zpracování).</i>	52
<i>Obrázek 27: Průměrná spektra za třídy v oblasti pyroklastických ložisek (vlastní zpracování). Barvy spekter odpovídají neřízeným klasifikacím viz obrázek 26.</i>	53
<i>Obrázek 28: Průměrná spektra za třídy v oblasti hollows (vlastní zpracování). Barvy spekter odpovídají neřízeným klasifikacím viz obrázek 26.</i>	53
<i>Obrázek 29: K-means klasifikace se čtyřmi třídami (vlastní zpracování).</i>	54
<i>Obrázek 30: Průměrná spektra za třídy (vlastní zpracování). Barvy odpovídají klasifikaci viz obrázek 29.</i>	55
<i>Obrázek 31: Normalizovaná spektra v hodnotě 558 nm (vlastní zpracování). Barvy odpovídají klasifikaci viz obrázek 29.</i>	56
<i>Obrázek 32: Spektrální křivky hollows a sulfidu hořečnatého (vlastní zpracování).</i>	57
<i>Obrázek 33: Spektrální křivky pyroklastických ložisek, stínů a pyroxenu bohatého na titan (vlastní zpracování).</i>	58
<i>Obrázek 34: Vlevo výsledek LSU na území s hollows (1) (vlastní zpracování).</i>	58
<i>Obrázek 35: Vpravo výsledek SAM na území s hollows (1) (vlastní zpracování).</i>	58

Seznam použitých zkratek

CDRWAC	Wide-angle Calibrated Data Record
DDRWAC	Wide-angle Derived Data Record
DEM	Digital Elevation Model
EDRWAC	Wide-angle Experiment Data Record
ENVI	Environment for Visualizing Images
EPSS	Energetic Particle and Plasma Spectrometer
ESA	European Space Agency
GRNS	Gamma-Ray and Neutron Spectrometer
GRS	Gamma Ray Spectrometer
ISIS	Integrated Software for Imagers and Spectrometers
JAXA	Japanese Aerospace Exploration Agency
JHUAPL	Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory
LPSC	Lunar and Planetary Science Conference
MAG	Magnetometer
MAPMP5	Wide-angle Map-projected 5-Color Multispectral RDR
MASCS	Mercury Atmospheric and Surface Composition Spectrometer
MDIS	Mercury Dual Imaging System
MDIS-NAC	Mercury Dual Imaging System Narrow Angle Camera
MDIS-WAC	Mercury Dual Imaging System Wide Angle Camera
MDRWAC	Wide-angle Map-projected Multispectral Data Record
MESSENGER	Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry, and Ranging
MLA	Mercury Laser Altimeter
MMO (Mio)	Mercury Magnetospheric Orbiter
MPO	Mercury Planetary Orbiter
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NS	Neutron Spectrometer
ODE	Orbital Data Explorer
PDS	Planetary Data System
PILOT	Planetary Image Locator Tool
RDRMDR	Map-projected Multispectral Reduced Data Record
RTMWAC	Wide-angle Map-projected Regional Targeted Mosaic
SAM	Spectral Angle Mapper
SPICE	Spacecraft, Planet, Instrument, C-matrix Events
USGS	United States Geological Survey
UVVS	Ultraviolet and Visible Spectrometer
VIRCDR	VIRS Calibrated Data Record
VIRDAP	VIRS Derived Analysis Product
VIRDDR	VIRS Derived Data Record
VIREDR	VIRS Experiment Data Record
VIRS	Visible and Infrared Spectrograph
XML	Extended Markup Language
XRS	X-Ray Spectrometer

Úvod

Od pradávna lidstvo vzhlíželo k noční obloze s otázkami o původu a povaze vesmíru. Objevování a studium kosmických těles přineslo zásadní poznatky nejen o vesmíru samotném, ale také o našem vlastním místě v něm. S rozvojem moderní vědy a technologií se zkoumání Sluneční soustavy stalo klíčovou oblastí planetární vědy. Automatizované sondy umožnily přímé studium planet, měsíců a dalších těles, čímž rozšířily naše znalosti o jejich složení, probíhajících geologických a geomorfologických procesech a vývoji.

Nejmenší, avšak neméně zajímavou, planetou Sluneční soustavy je Merkur. Dlouhou dobu byl lidmi přehlížen, ale právě tato planeta může lidstvu pomoci pochopit vznik a vývoj terestrických planet. Jelikož je ke Slunci ze všech planet nejbližší, jeho průzkum vesmírnými sondami byl poměrně obtížný, především z důvodu velké gravitační přitažlivosti Slunce a také vysokých teplot. První sondou, která spatřila povrch Merkuru, se stala Mariner 10 až v 70. letech minulého století a poskytla tak podklady pro budoucí mise.

Jednou z těchto misí byla mise MESSENGER, která probíhala v letech 2004-2015. Studie založené na datech ze sondy MESSENGER se zaměřují na několik klíčových oblastí výzkumu. Mezi hlavní témata patří geologické složení a historie povrchu Merkuru (např. Pajola a kol. 2021 a Giacomini a kol. 2022). Další studie se zabývají charakteristikami impaktních kráterů, což umožňuje lepší pochopení evoluce planetárních povrchů ve Sluneční soustavě. Data také ukázala přítomnost rozsáhlých hladkých planin, které jsou pravděpodobně výsledkem sopečných erupcí, a rozsáhlých zlomů, jež naznačují postupné chladnutí a smršťování planety (Man a kol. 2023).

Jednou ze skupin metod, které studie využívají k výzkumu, jsou spektrální metody. Ty lze například použít ke klasifikaci povrchových struktur a k určení chemického a mineralogického složení povrchu. Pracemi, které využívají spektrální metody, jsou např. Lucchetti a kol. 2021, Ngoc a kol. 2020 a Pajola a kol. 2021, a právě spektrální data pro účely mapování povrchu Merkuru budou i hlavním tématem této bakalářské práce.

Bakalářská práce představí mise směřované k Merkuru, které se uskutečnily a pomohly tak k pochopení planety Merkur, a mise, které právě probíhají nebo se do budoucna plánují. Poté bude podrobněji představena mise MESSENGER, její vědecké cíle a hlavní přístroje, kterými při své práci disponovala. Práce shrne možnosti získání optických a spektrálních dat pořízených při misi MESSENGER pomocí senzorů – kamery MDIS a spektrometru MASCS.

Data ze senzorů budou podrobně popsána a bude uveden způsob, jak předzpracovat data z kamery MDIS-WAC ve specializovaném softwaru. V praktické části práce bude ukázka zpracování snímku části území kráteru Lermontov, na kterém budou aplikovány všechny potřebné korekce. Pajola a kol. (2021) uvádějí, že povrch Merkuru je mimo jiné tvořen dvěma spektrálně odlišnými typy povrchu – pyroklastickými ložisky a *hollows*¹. Tyto povrchy dle studie obsahují minerály sulfidů, chloridů a pyroxenů. Úkolem této práce bude určit a rozlišit tyto dva typy povrchu a zjistit pomocí metod *Linear Spectral Unmixing* a *Spectral Angle Mapper*, jestli tyto povrchy obsahují výše zmíněné minerály.

¹ mělké, ploché a nepravidelné prohlubně s relativně vysokou odrazivostí vnitřních částí

1 Průzkum Merkuru

Merkur je nejmenší planetou Sluneční soustavy a zároveň i planetou nejbližší ke Slunci. Jeho povrch je tvořen velkým množstvím impaktních kráterů. Jeden oběh kolem Slunce (jeden rok) mu zabere 88 pozemských dní, otočení kolem své osy vykoná za necelých 59 pozemských dní. Ze Země je Merkur obtížně pozorovatelný, lze ho spatřit jen těsně před rozbřeskem nebo před západem Slunce a kvůli jeho blízkosti ke Slunci je problematické ho pozorovat teleskopy (Balogh 2002).

Zmínky o prvních pozorování Merkuru pochází již z antického Řecka. V té době pro něj Řekové měli dvě jména – Apollo u jeho výskytu při rozbřesku a Hermes u jeho výskytu při západu Slunce. Jeho název, jak ho známe v současné době, však pochází z římské mytologie, kde Merkur (latinsky Mercurius) je ekvivalentem pro řeckého Herma. Mercurius byl poslem bohů, bohem obchodu, cestování a rychlosti (NASA/JHUAPL 2012).

1.1. Uskutečněné mise

Merkur jako jedna ze čtyř terestrických planet byl opomíjen, co se týče dálkového průzkumu a vesmírných misí. Větší přednost byla dávana planetám sousedících se Zemí – Venuši a Marsu. Tyto planety byly sondami či kosmickými loděmi navštíveny mnohokrát. Prvními kosmickými loděmi, které se přiblížily k těmto planetám, byly Mariner 2 v roce 1962 (Venuše) a Mariner 4 v roce 1964 (Mars). Oba tyto projekty byly pod záštitou NASA (National Aeronautics and Space Administration) (Solomon a kol. 2018; Balogh a kol. 2007).

Prvním projektem, který usiloval o prozkoumání planety Merkur, se stal Mariner 10. Rozhodnutí o jeho uskutečnění, přišlo na konci 60. let 20. století a jeho vypuštění do vesmíru proběhlo v roce 1973. Druhou a momentálně i poslední uskutečněnou misí, se stala mise MESSENGER (**ME**rcury **S**urface, **Sp**ace **EN**vironment, **GE**ochemistry, and **R**anging). Ta probíhala v letech 2004–2015. (Balogh a kol. 2007). Více o misi MESSENGER bude zmíněno v samostatné kapitole (kap. 2).

1.1.1. Mariner 10

Jak už bylo zmíněno výše, mise Mariner 10 odstartovala rozhodnutím z konce 60. let 20. století. Samotná raketa byla, po řadě kalkulací, vypuštěna v listopadu 1973. Cílem mise bylo prozkoumat při průletu sousedící Venuši a poté zjistit, co nejvíce informací i o Merkuru. Mariner 10 dosáhla několika prvenství: byla první, která využila gravitačního manévru, aby se dostala od jedné planety (Venuše) ke druhé (Merkur) a také byla první, která se dostala nejbližší ke Slunci (Balogh a kol. 2007; Shirley 2003).

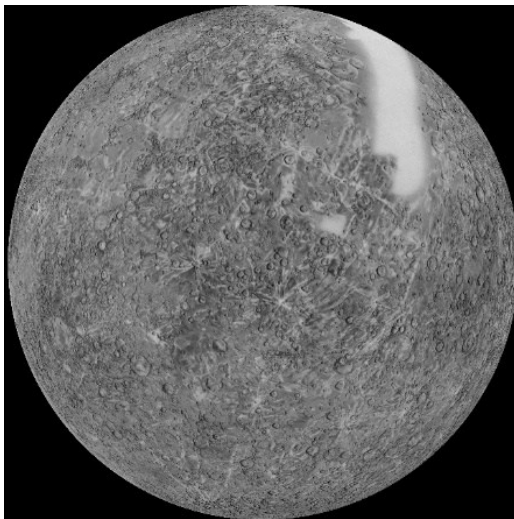
Sonda měla na palubě několik přístrojů, mezi ty nejdůležitější patřily – magnetometr, ultrafialové spektrometry, infračervený radiometr a dvě televizní kamery. Každá z kamer byla schopna pořizovat úzkohúhlé fotografie s vysokým rozlišením, ale i širokohúhlé fotografie s nižším rozlišením. Kamery měly kolo s filtry – modrým, ultrafialovým, mínus ultrafialovým, čirým, ultrafialovým polarizujícím a žlutým. Kolo také obsahovalo rozostřující čočku pro kalibraci a zrcadlo pro širokohúhlé snímky (Dunne, Burgess 1978).

První data, která při své cestě sonda pořídila, byly fotografie Země a Měsíce. Tyto snímky byly využity ke kalibraci kamer k následnému fotografování Venuše a Merkuru. K Venuši se sonda přiblížila v únoru 1974, tři měsíce po startu, a pořídil zde snímky ve všech barevných filtrech. Ultrafialový filtr odhalil rotující se mraky ve Venušině atmosféře. Toto byl jeden z největších objevů, co se týkal průzkumu Venuše (Dunne, Burgess 1978; Shirley 2003).

S Merkurem se sonda setkala poprvé v březnu 1974 – pořídil na 2000 snímků a lidem se poprvé naskytl pohled na planetu, která svým vzhledem připomínala Měsíc. Dalšími poznatky, které první setkání přineslo, bylo to, že Merkur, jak se očekávalo, nemá žádnou atmosféru. Překvapením pro vědce byla přítomnost magnetického pole. Sonda se s Merkurem setkala ještě dvakrát – podruhé v září 1974 a potřetí v březnu 1975. Druhý průlet zajistil snímky s vysokým rozlišením. Avšak třetí průlet byl ten nejdůležitější – potvrdil existenci magnetického pole a pořídil snímky povrchu s dosud vůbec největším rozlišením. Pár dní po posledním průletu, sondě došlo palivo, vysílač byl vypnut a sonda byla ponechán svému osudu obíhat kolem Slunce (Balogh a kol. 2007; Shirley 2003).

Úspěšnost mise je jistě nepopiratelná, nejenže přinesla spoustu nových poznatků, ale stanovila i nové výzkumné otázky pro budoucí mise. Mezi největší úspěchy mise Mariner 10 patří (Dunne, Burgess 1978; Shirley 2003):

- cestování vesmírem s využitím gravitace jiných planet,
- objev Hadleyho cirkulace na Venuši,
- zmapování zhruba poloviny povrchu Merkuru – západní polokoule (obrázek 1),
- objev magnetického pole Merkuru.



Obrázek 1: Ortografická projekce stínovaného reliéfu Merkuru – západní polokoule (bílý pruh je nezmapované území) (USGS 1979).

1.2. Probíhající a budoucí mise

Úspěch mise Mariner 10 připravil půdu pro diskusi o budoucích navazujících průzkumech planety Merkur. Bylo téměř jisté, že další mise k Merkuru nebudou jen průletové (jako tomu bylo u mise Mariner 10), ale že sondy budou planetu obíhat (Balogh a kol. 2007). Z těchto diskuzí vzešly dva projekty – evropská mise BepiColombo a americká mise MESSENGER.

1.2.1. BepiColombo

BepiColombo je sloučená mise dvou vesmírných agentur – evropské ESA (European Space Agency) a japonské JAXA (Japanese Aerospace Exploration Agency). Jméno si vysloužila po profesovi Giuseppeu (Bepi) Colombovi (1920–1984), který navrhl

využít gravitační manévr, jenž vedl k úspěchu mise Mariner 10 (Benkhoff a kol. 2021; Dunne, Burgess 1978).

Mise je jedinečná tím, že samotný raketoplán se skládá ze dvou propojených sond, které se u Merkuru rozdělí a každá z nich bude obíhat kolem Merkuru po své vlastní dráze. Evropská sonda MPO (Mercury Planetary Orbiter) s sebou nese 11 přístrojů – např. laserový výškoměr, magnetometr, spektrometry různého druhu a přístroj na pořizování snímků. MPO má za úkol zkoumat Merkurův povrch, nitro, magnetosféru a exosféru. Oproti tomu, japonská sonda Mio (původně MMO – Mercury Magnetospheric Orbiter) má zkoumat prostředí kolem planety (magnetosféru a exosféru) a její interakce s planetou. K tomuto výzkumu má na své palubě pět přístrojů – magnetometr, přístroje k měření plazmových částic a vln a další (Benkhoff a kol. 2021).

Mise započala již roku 2000 jejím schválením u ESA s původním startem rakety v roce 2009–2010, to se ale neuskutečnilo. Kritickým se stal rok 2008, kdy neprošlo testy několik pro misi důležitých přístrojů. Toto selhání vyústilo v to, že více jak 80 % použitých technologií a materiálů muselo být vylepšeno a nahrazeno. I přes tento první neúspěch, byla mise úspěšně vypuštěna, stalo se tak v říjnu roku 2018 ve Francouzské Guyaně (Benkhoff a kol. 2021).

Pro let bylo naplánováno celkem devět gravitačních manévrů – jeden u Země, který byl proveden v dubnu 2020, dva u Venuše (říjen 2020 a srpen 2021) a šest u Merkuru (říjen 2021, červen 2022, červen 2023, září a prosinec 2024 a poslední v lednu 2025). Jak uvádí ESA (2025), BepiColombo má přiletět k Merkuru koncem roku 2026 a výzkumné operace mají začít začátkem roku 2027.

Hlavní úkoly mise se dají rozdělit do třech hlavních témat – zkoumání nitra, povrchu a magnetosféry a exosféry. Konkrétními cíli jsou (Benkhoff a kol. 2021):

- prozkoumat původ a vývoj planety,
- prozkoumat vnitřní strukturu a složení,
- prozkoumat původ magnetického pole,
- prozkoumat krátery, tektonické jevy a vulkanismus,
- otestovat Einsteinovu teorii obecné relativity.

1.2.2. Mercury Lander

Už od dob mise MESSENGER zde byly diskuse, že příští mise k Merkuru by měla být sonda nesoucí lander/rover ke zkoumání planety přímo z povrchu. První zmínky o tomto projektu byly diskutovány v Planetary Science Decadal Survey 2013–2022, což je publikace, která shrnuje vědecké otázky týkající se výzkumu a průzkumu planet na deset let dopředu. V té době se ale tomuto konceptu nevěnovala pozornost, a proto neproběhla žádná další hlubší analýza (Solomon a kol. 2018). Svou pozornost si ale tento koncept získal po dalším desetiletí v nově vydané *Origins, Worlds, and Life: A Decadal Strategy for Planetary Science and Astrobiology 2023–2032*.

Mercury Lander je koncepční studie od NASA, která se zabývá možností vyslat na Merkur lander, který by sbíral data přímo na/z povrchu planety. Start této mise by se mohl uskutečnit v roce 2035 a přistání na Merkuru je plánováno po desetileté cestě, v roce 2045. NASA (2020) tvrdí, že „Mercury Lander by umožnil průlomový vědecký výzkum a jeho výsledky by přispěly k našemu lepšímu porozumění o vzniku a vývoji terestrických planet v naší sluneční soustavě, a i těch u jiných hvězd.“ Mise má vymezených několik cílů, kterých by chtěla dosáhnout např. prozkoumat mineralogické a chemické složení povrchu Merkuru nebo zkoumat vnitřní strukturu planety a její magnetické pole (NASA 2020).

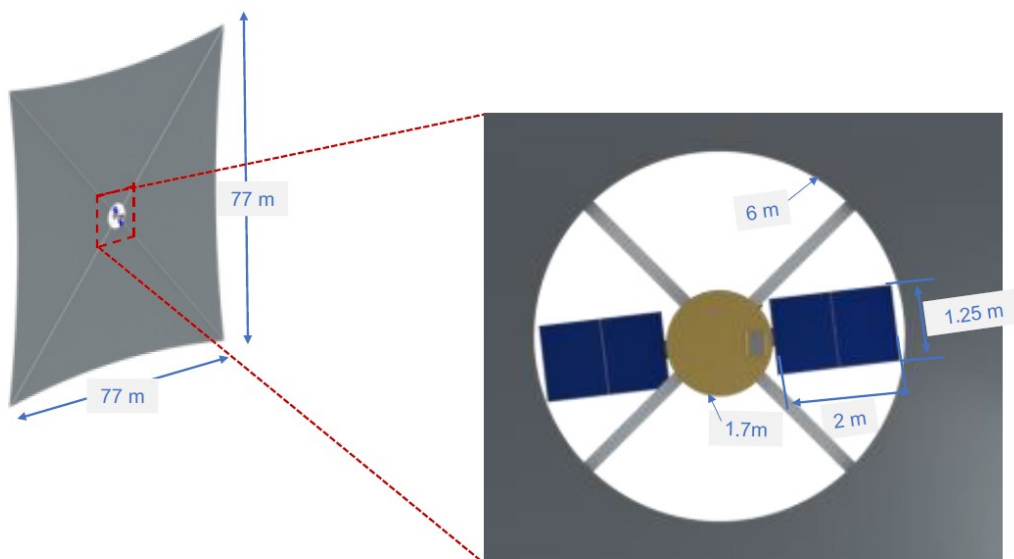
1.2.3. Mercury Scout

Mercury Scout je návrh budoucí mise, který byl předložen na 55. LPSC (Lunar and Planetary Science Conference) v roce 2024. Na 56. LPSC v březnu 2025 byl Mercury Scout předložen již jako koncepční studie. Jedná se o nízkonákladovou misi, která má za cíl identifikovat mineralogické složení povrchu, poskytnout snímky s vysokým rozlišením (jeden metr na pixel nebo i lepší), zmapovat ledové nánosy, které se vyskytují ve věčně zastíněných oblastech na severním pólu, a také pomoci rozhodnout o přistávací oblasti pro lander (Parman a kol. 2024).

Ke splnění cílů bude mít mise celkem tři přístroje – spektrometr, který bude měřit v pásmu středního infračerveného světla, jelikož v této oblasti jsou lépe vidět absorpce

minerálů, dále radiometr, který bude měřit teplotu povrchu, a nakonec úzkohúhlá kamera, která bude pořizovat snímky ve viditelném spektru (Parman a kol. 2025).

Mercury Scout je průlomová mise, jelikož k dopravě k Merkuru má být využito solárního plachtění. Podle Johnsona (2023) solární plachetnice (obrázek 2) jsou: „velké zrcadlové struktury vyrobené z lehkého materiálu, který odráží sluneční záření a tím pohání kosmickou loď.“ Nepřetržité bombardování slunečními fotony poskytuje pohon i bez využití jiných pohonných systémů, a proto životnost této mise závisí na opotřebení samotné solární plachetnice. Využití plachetnice u této mise není jen k samotné dopravě. Plachetnice bude sloužit také zrcadlo, které bude moci ozářit neosvětlené oblasti severního pólu, aby poté mohly být zmapovány kamerou (Parman a kol. 2024).



Obrázek 2: Design solární plachetnice pro Mercury Scout (Parman a kol. 2025).

2 Mise MESSENGER

Discovery Program je iniciativa NASA zaměřená na nízkonákladové planetární mise, které pomáhají prozkoumávat sluneční soustavu. Program byl spuštěn na začátku 90. let a jeho cílem je financovat inovativní mise, které odpovídají na klíčové vědecké otázky. Mezi mise uskutečněné právě díky Discovery se řadí např. Mars Pathfinder anebo právě mise MESSENGER (Niebur, Brown 2023).

Návrh mise byl programu Discovery předložen hned dvakrát, poprvé v roce 1996, kdy nebyl zvolen pro další výzkum, a podruhé v roce 1998, kdy byl zvolen jako sedmá mise pod programem Discovery. Samotný vývoj a konstrukce kosmické lodi začal v roce 2000 a trval přes čtyři roky (McNutt a kol. 2006; Solomon a kol. 2018).

Pro misi byly naplánovány tři možné termíny pro vypuštění – březen, květen a srpen 2004. Každý z těchto termínů měl svá specifika – kdyby byl dodržen termín v březnu, sonda by se na oběžnou dráhu Merkuru dostala již v roce 2009. Nakonec byl start posunut až na srpen roku 2004. To znamenalo, že sondu nebude možné na oběžnou dráhu Merkuru umístit až do roku 2011 (Balogh a kol. 2007).

Start se uskutečnil 3. srpna roku 2004 v Cape Canaveral na Floridě (obrázek 3). Nosnou raketou pro sondu se stala Delta II – v té době to byla největší raketa, kterou program Discovery disponoval (Solomon a kol. 2018). Cesta k Merkuru trvala zhruba šest a půl let a během ní došlo k šesti gravitačním manévřům (průletům). První manévr se uskutečnil u Země roku 2005, k dalším dvěma došlo u Venuše v letech 2006 a 2007 a poslední tři průlety u Merkuru byly provedeny v letech 2008 a 2009. Už během průletů se sondě podařilo zmapovat téměř celý povrch planety a provést měření o složení exosféry. Sonda vstoupila na oběžnou dráhu v březnu roku 2011, tak jak bylo plánováno, a započala svou primární roční misi (Solomon a kol. 2007; Solomon a kol. 2018).



Obrázek 3: Start mise MESSENGER, nosná raketa Delta II (Solomon a kol. 2018).

Mise měla za úkol zodpovědět otázky, které se zformovaly na základě výsledků, jež v 70. letech získala mise Mariner 10. V tabulce 1 jsou vypsány hlavní cíle mise a požadavky k jejich splnění a zodpovězení otázek.

Cíle/otázky	Požadavky
Určit chemické složení povrchu.	Pořídít mapy hlavních prvků Merkuru v měřítku 1000 km a 20 km.
Prozkoumat geologický vývoj.	Pořídít globální monochromatickou mapu s rozlišením 250 m/pixel a 2 km/pixel. Získat topografická data.
Určit povahu magnetického pole.	Pořídít model magnetického pole.
Určit velikost a povahu jádra planety.	Poskytnout globální gravitační pole a určit poměr momentu setrvačnosti pevné části planety k celkovému momentu setrvačnosti
Prozkoumat volatilní komponenty na pólech.	Identifikovat hlavní složku radarově reflexního materiálu na severním pólu.
Určit povahu exosféry a magnetosféry.	Poskytnout výškové profily hlavních neutrálních složek exosféry s rozlišením 25 km a charakterizovat energetické rozdělení hlavních iontových složek.

Tabulka 1: Cíle a požadavky mise MESSENGER (vlastní zpracování na základě Solomon a kol. 2007; Solomon a kol. 2018; Niebur, Brown 2023).

Odpovědi na tyto otázky sonda přinesla již po své primární misi, která trvala v letech 2011 a 2012. Díky tomu, že sondě zbylo dostatek paliva a všechny vědecké přístroje byly funkční, mise byla prodloužena. První prodloužená mise trvala další jeden pozemský rok, do roku 2013. V návaznosti na poznatky získané z primární mise, byly stanoveny další cíle, které se vědci pokoušeli naplnit (např. získat snímky s vysokým rozlišením na územích s vulkanickými materiály, aby mohli zjistit, kdy naposledy byl Merkur vulkanicky aktivní) (Solomon a kol. 2018).

Po skončení první prodloužené mise byl znovu zkontrolován stav přístrojů a paliva. Jelikož všechno bylo v pořádku a paliva bylo pořád dostatek, NASA se rozhodla misi znovu prodloužit (druhá prodloužená mise). Na základě výsledků z předchozích měření se vyskytly další otázky, které by nám pomohly objasnit původ, vznik a funkci terestrických planet, především tedy Merkuru. Konec mise nastal v dubnu roku 2015, když sonda dopadla na povrch Merkuru, tak jak bylo předem plánováno (Solomon a kol. 2018; NSSDCA 2025b).

2.1. Přístroje sondy MESSENGER

K dosažení vytyčených cílů bylo nezbytné, aby sonda disponovala potřebnými přístroji. Sonda s sebou nesla celkem sedm přístrojů a komunikační zařízení. Níže jsou popsány charakteristiky a využití každého přístroje (Solomon a kol. 2007; Solomon a kol. 2018; JHUAPL 2025). Rozmístění a samotné přístroje jsou zobrazeny na obrázcích 4 a 5. V samostatných podkapitolách pak bude podrobněji popsán spektrometr MASCS (Mercury Atmospheric and Surface Composition Spectrometer) a kamera MDIS (Mercury Dual Imaging System).

Gamma-Ray and Neutron Spectrometer (GRNS)

GRNS měřil gamma záření, které bylo emitováno jádru atomů, buď samovolným rozpadem izotopů nebo za interakce vesmírného záření s prvkem. Každý chemický prvek má své specifické emise gamma záření a na základě této znalosti mohl GRNS určit, jaké prvky se nacházejí na povrchu Merkuru. Detektor spektrometru byl navržen a sestaven tak, aby rozpoznal emise prvků kyslíku, křemíku, síry, železa, vodíku a dalších.

X-Ray Spectrometer (XRS)

XRS se skládal, ze dvou detektorů – jeden byl namířen ke Slunci a měřil množství záření, které dopadalo na planetu, druhý mířil směrem k Merkuru a měřil odražené záření. Zařízení detekovalo emise hořčíku, hliníku, křemíku, síry a dalších prvků. Z pořízených dat byly vytvořeny mapy, které zobrazovaly poměry vybraných prvků ku křemíku.

Magnetometer (MAG)

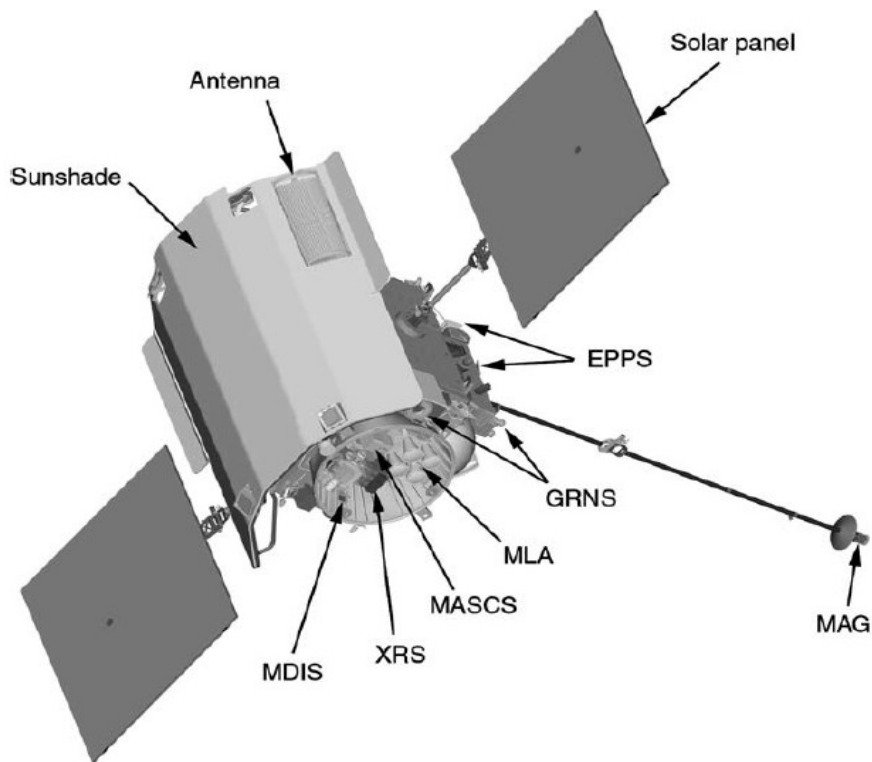
MAG měl za úkol pořídit data o magnetickém poli Merkuru. Jak silné je a jak se jeho hodnota liší v různých zeměpisných šířkách a výškách. Senzor magnetometru byl umístěn na 3,6 m dlouhé tyči, aby nebyl blízko magnetického pole sondy MESSENGER. Měl také svou vlastní sluneční clonu, aby byl chráněn, když sonda byla nakloněná ke Slunci. Pořízená data sloužila k objasnění zdroje magnetického pole planety.

Mercury Laser Altimeter (MLA)

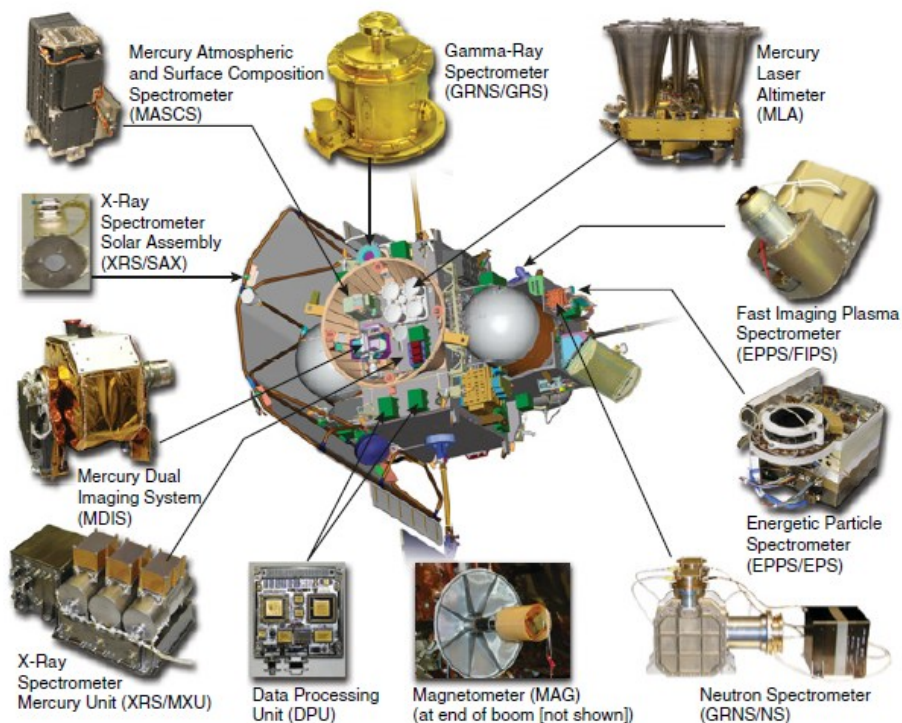
MLA se skládal z vysílače, který vyzařoval infračervený paprsek, a ze čtyř přijímacích teleskopů, které zachycovaly odražený paprsek. MLA pořídil data o topografii Merkuru s přesností na jeden metr. Z výsledků byl vytvořen DEM (Digital Elevation Model) části severní polokoule.

Energetic Particle and Plasma Spectrometer (EPPS)

EPPS se skládal ze dvou přístrojů a sloužil k měření nabitých částic (elektronů a iontů) v magnetosféře.



Obrázek 4: Schéma sondy MESSENGER s umístěním přístrojů (Balogh a kol. 2007).



Obrázek 5: Přístroje sondy MESSENGER (Solomon a kol. 2018).

2.1.1. Kamera MDIS

MDIS je přístroj, který se skládal ze dvou kamer – úzkouhlé a širokouhlé. Jako jediné zařízení ze všech se mohlo otáčet (o 90°) a bylo tak nezávislé na poloze sondy. Při konstrukci si vědci museli poradit i s celkem složitým problémem, aby kamera vydržela mrazivé teploty ve vesmíru a zároveň byla schopná pořizovat kvalitní snímky, když mířila na území, kde teploty přesahovaly 400 °C (Hawkins a kol.; Solomon a kol. 2007).

Každá z kamer se skládala z obrazového snímače, který tvořilo 1024 × 1024 fotodiod. Na základě designu a sdílené elektroniky, mohla v jeden okamžik pořizovat snímky pouze jedna kamera. Kvůli zachování místa na úložišti se prováděla bezztrátová komprese z 12bitových dat na 8bitové data, a to díky několika look-up-tables (Hawkins a kol. 2007; Balogh a kol. 2007).

Pořízení celého snímku (1024 × 1024 pixelů) trvalo přibližně čtyři sekundy. Kamery ale byly navrženy tak, aby mohly pořizovat i menší snímky (512 × 512 pixelů a méně), pořízení takových snímků trvalo jednu sekundu (NSSDCA 2025a).

Úkolem obou kamer bylo pořídit dostatek dat, aby poté bylo možné zkonstruovat DEM, základní monochromatickou globální mapu, barevnou globální mapu a mozaiky s vysokým rozlišením (Solomon a kol. 2018).

Mercury Dual Imaging System Narrow Angle Camera (MDIS-NAC)

MDIS-NAC byla úzkouhlá reflektivní kamera, která měla jen jednopásmový filtr vycentrovaný na 750 nm, tudíž všechny pořízené snímky byly monochromatické. Zorné pole činilo 1,5°. Rozlišení, kterého byla kamera schopna dosáhnout, bylo v řádech desítek metrů na pixel (Hawkins a kol. 2007; Solomon a kol. 2007)

Mercury Dual Imaging System Wide Angle Camera (MDIS-WAC)

MDIS-WAC byla širokouhlá refraktivní kamera se zorným polem 10,5°. Kamera měla 12 filtrů, každý vycentrovaný na jiné vlnové délce (tabulka 2). Filtry byly v rozmezí 395-1040 nm (viditelné až blízké infračervené spektrum). Filtr č. 2 byl čirý filtr, který byl vycentrovaný na 700 nm a sloužil k orientaci a k pořizování monochromatických snímků. Kamera během mise pořídila necelých 130 tisíc snímků (USGS/NASA 2025).

Číslo filtru	Písmeno filtru	Vlnová délka (nm)	Šířka pásma (nm)
1	A	698,8	5,3
2	B	700	600
3	C	479,9	10,1
4	D	558,9	5,8
5	E	628,8	5,5
6	F	433,2	18,1
7	G	748,7	5,1
8	H	947	6,2
9	I	996,2	14,3
10	J	898,8	5,1
11	K	1012,6	33,3
12	L	828,4	5,2

Tabulka 2: Filtry kamery MDIS-WAC (vlastní zpracování na základě PDS 2025 a ODE 2025a).

2.1.2. Spektrometr MASCS

MASCS se skládal ze dvou spektrometrů – UVVS (Ultraviolet-Visible Spectrometer) a VIRS (Visible-Infrared Spectrometer). Oba spektrometry byly bodové (Solomon a kol. 2018).

UVVS měl ohniskovou vzdálenost 125 mm a měřil spektra v rozmezí 115-600 nm (daleké ultrafialové spektrum až viditelné spektrum). Průměrné spektrální rozlišení činilo 0,6 nm (Solomon a kol. 2018). UVVS byl primárně navržen k měření výskytu prvků v exosféře, jak už těch známých, co se tam vyskytovaly (H, He, O, Na, Ca a K), tak i těch, o kterých se vědci domnívali, že by se mohly vyskytovat (S, Fe, Si, Al, Mg,...). UVVS měl také pomoci zjistit výskyt Fe^{2+} , které se projevuje absorpčním pásem blízko 250 nm (McClintock, Lankton 2007).

VIRS měl ohniskovou vzdálenost 210 mm a měřil spektra v rozmezí 300-1450 nm (viditelné až blízké infračervené spektrum). Spektrální rozlišení činilo necelých pět

nanometrů a prostorové rozlišení jednotlivých měření činilo průměrně 5 km a nejlepší rozlišení bylo 3 km (McClintock, Lankton 2007; JHUAPL 2025). Úkolem VIRS bylo měřit odrazivost povrchu za účelem identifikace chemického a minerálního složení planety. Měření mohou identifikovat např. výskyt minerálů s obsahem železa a titanu, olivínů, nebo pyroxenů (McClintock, Lankton 2007).

3 Data: specifikace a dostupnost

Tato kapitola se zaměří na podrobné představení dostupných datových produktů získaných širokoúhlou kamerou MDIS-WAC a spektrometrem MASCS-VIRS. Bude popsáno, kde je data možné získat, jak s nimi pracovat a budou popsány studie, které se zpracováním těchto dat zabývaly.

Datové formáty PDS3 a PDS4

Planetary Data System (PDS) je standard pro organizaci a archivaci vědeckých dat z planetárních misí NASA. Tento systém zajišťuje dlouhodobou dostupnost dat a jejich snadnou interpretaci. Data pořízená sondou MESSENGER jsou uchovávána v datových formátech PDS3 a PDS4. V současné době se ale i data pořízená ve standardu PDS3 převádí na PDS4 (ODE 2025b).

Ve formátu PDS3 jsou uložena data, která pořídil spektrometr MASCS-VIRS. PDS3 formát je organizován do datových svazků (*volumes*), které obsahují samotná pořízená data, metadata nebo k datům související dokumenty (PDS Geosciences Node 2025). Soubory jsou uloženy v různých adresářích. V *Top-level Directory* jsou uloženy soubory *aareadme.txt* (úvodní informace o svazku), *errata.txt* (obsahuje poznámky, chyby v datech nebo dokumentaci) a *voldesc.cat* (soubor s metadaty). V *Catalog Directory* se nachází metadatové soubory, které popisují daná data, dále soubory týkající se přístroje, který data pořídil a také údaje o samotné sondě a misi. *Index Directory* poskytuje snadnou orientaci v archivu, obsahuje soubory *index.tab* (tabulka se seznamem datových souborů ve svazku) a *index.lbl* (popisuje obsah *index.tab*). *Data directories* obsahují konkrétní data, často mohou být organizována do podadresářů. Každý datový produkt doprovází PDS label, ten může být buď připojený, kdy metadata jsou součástí souboru nebo může být zvlášť v samostatném souboru **.lbl*. Dalšími adresáři jsou *Document Directory* a *Other Directories* (Software, Geometry, ...) (PDS Geosciences Node 2025a).

Data pořízená kamerou MDIS-WAC jsou uložena v novějším PDS4 formátu. PDS4 je hierarchicky uspořádán a skládá se z několika úrovní – ze svazků (*Bundles*), kolekcí (*Collections*) a z produktů (*Products*). Svazky jsou nejvyšší organizační jednotka

archivu PDS4. Svazky sdružují všechny kolekce a mají své jedinečné logické identifikátory. Kolekce je skupina produktů stejného typu a existují různé typy kolekcí:

- Datová kolekce (*Data Collection*) – obsahuje data (nepředzpracovaná, předzpracovaná),
- Dokumentační kolekce (*Document Collection*) – obsahuje manuály, popisy, články a další dokumentaci k datům,
- Geometrická kolekce (*Geometry Collection*) – obsahuje soubory o poloze sondy během měření (souřadnice, orientace),
- SPICE (Spacecraft, Planet, Instrument, C-matrix Events) kolekce – obsahuje soubory s orbitálními a orientačními daty mise,
- Prohlížecká kolekce (*Browse Collection*) – poskytuje zmenšené náhledy produktů,
- Kalibrační kolekce (*Calibration Collection*) – obsahuje informace a data nutná k přesné interpretaci měření.

Produkty jsou nejnižší organizační jednotka ve struktuře PDS4. Produktem se může rozumět samostatný snímek, spektrum nebo tabulka. Ke každému souboru/produktu, ať už se jedná o svazek, kolekci či jednotlivý produkt, náleží jeho *.xml soubor. XML (eXtended Markup Language) soubory obsahují informace o produktu (jeho obsahu, formátu a metadatech) (Jet Propulsion Laboratory 2024).

3.1. Datové produkty z kamery MDIS-WAC

Datových produktů z kamery MDIS-WAC je celkově sedm a každý se liší úrovní předzpracování. Názvy souborů dodržují jistou normu, která je vyžadována PDS. Níže je každý produkt popsán.

EDRWAC (Wide-angle Experiment Data Record)

Pro každý snímek pořízený MDIS existuje jeden produkt EDR (Experiment Data Record). Tento produkt obsahuje binární obrazový soubor s připojeným PDS labelem. Data jsou nekomprimovaná a přeformátovaná podle standardních PDS labelů, ale jinak zůstávají v "raw" podobě. Pro geometrická a pozorovací data uvedená v PDS labelu jsou

používány dva souřadnicové systémy: *Nebeský referenční systém (J2000)* – pro polohu a rychlost sondy a směr kamery a *Planetární souřadnicový systém* (Hash a kol. 2015).

Názvy souborů dodržují normu, dle které mohou mít maximálně 36 znaků pro hlavní část a tři znaky pro příponu. Produkty MDIS EDR mají 13 znaků a tři znaky pro příponu: *xcr#####f.IMG*, kde (Hash a kol. 2015):

X = „E“ pro EDR,

C = „W“ nebo „N“ (WAC/NAC),

R = číslo palubního časovače (0 nebo 1) – odpovídající stavu před nebo po resetu palubního času,

= počítadlo času od začátku mise, hodnota odpovídá poslední sekundě expozice,

F = pozice filtrů pro WAC (A-L, U pro neznámou polohu), pro NAC je filtr označen „M“.

CDRWAC (Wide-angle Calibrated Data Record)

CDRs obsahují jednotlivé kalibrované snímky ve formátu záře nebo normalizovaného zářivého toku (I/F). CDR jsou generovány z EDR souborů. Použitá metoda radiometrické kalibrace umožňuje eliminaci šumu, opravu mrtvých pixelů a odstranění systematických chyb detektoru. CDR snímky nejsou geometricky korigovány (Murchie a kol. 2017).

DDRWAC (Wide-angle Derived Data Record)

DDR jsou snímky, které obsahují informace o topografii a geometrických parametrech pozorování. Každý pixel nese informace o:

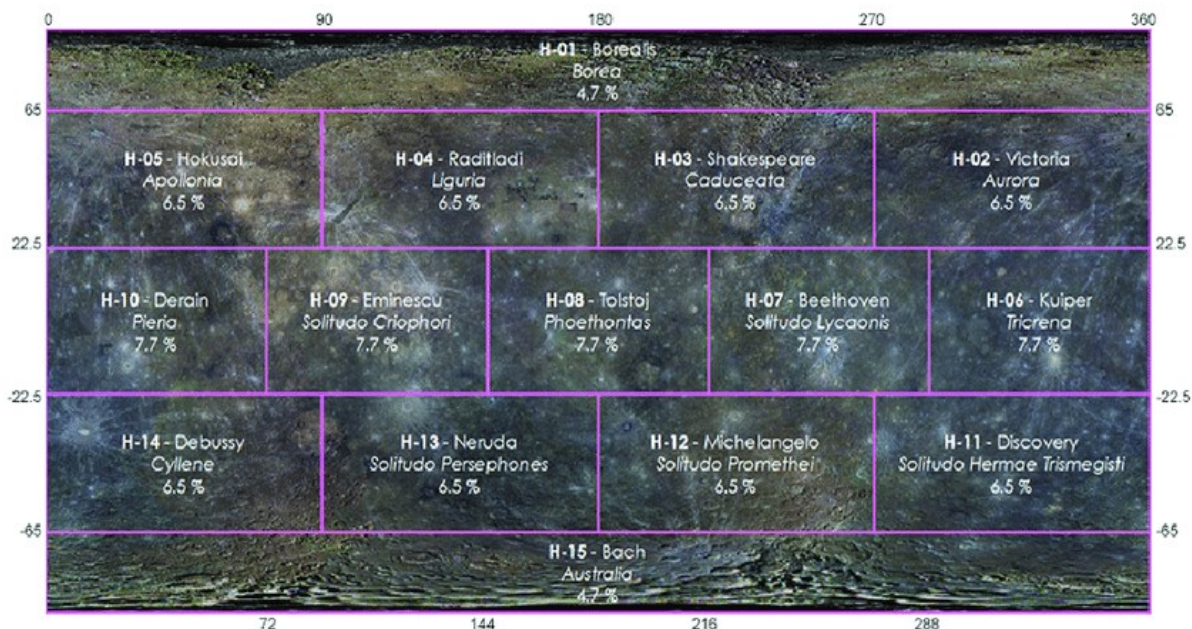
- planetografických souřadnicích (šířka a délka) každého bodu,
- slunečním úhlu dopadu světla, který ovlivňuje stíny a odrazivost povrchu,
- emisním úhlu, který definuje směr pozorování kamery vůči normále k povrchu,
- fázovém úhlu, což je úhel mezi osou kamery a směrem ke Slunci (Murchie a kol. 2017).

RDRMDR (Map-projected Multispectral Reduced Data Record)

RDRMDR je původní 8-filtrová mapa pořízená během primární mise. Je fotometricky upravená s danými parametry slunečního úhlu ($i=30^\circ$), emisního úhlu ($e=0^\circ$) a fázového úhlu ($g=30^\circ$). Rozlišení je 64 pixelů na jeden stupeň povrchu a mapa je rozdělena do 54 nepřekrývajících se dlaždic. Filtry, které byly využity pro tuto mozaiku jsou F, C, D, E, G, L, J, a I (ODE 2025c).

MDRWAC (Wide-angle Map-projected Multispectral Data Record)

MDR produkty doplňují původní 8filtrovou mapu (RDRMDR produkty). Jedná se o 3filtrovou mapu (filtry F, G a I), která má vyšší prostorové rozlišení (128 pixelů na jeden stupeň). Jsou zde použity stejné parametry fotometrické korekce jako u produktu RDRMDR. Mapa se skládá z jednotlivých nepřekrývajících se dlaždic. Každá dlaždice poté odpovídá severozápadní (NW), severovýchodní (NE), jihozápadní (SW) nebo jihovýchodní (SE) části kvadrantu jedné z předem definovaných map H1-H15 (obrázek 6) (ODE 2025d).



Obrázek 6: Rozdělení Merkuru na segmenty H1-H15 (Galluzzi 2015).

RTMWAC (Wide-angle Map-projected Regional Targeted Mosaic)

RTMWAC mozaiky jsou sestavené z pozorování vybraných oblastí zájmu. Mozaiky jsou buď 3filtrvé, 8filtrvé nebo 11filtrvé v závislosti na dostupnosti dat pro danou oblast. Snímky jsou fotometricky upraveny se stejnými parametry jako RDRMDR. Pro zobrazení cílových oblastí se využívá ortografická projekce. Mezi zajímavé mozaiky patří mozaika „Caloris“, která zachycuje obrovské impaktní pásmo kráterů a mozaika „b30“ se zajímavými geologickými charakteristikami (Murchie a kol. 2017).

MAPMP5 (Wide-angle Map-projected 5-Color Multispectral RDR)

MAPMP5 je 5filtrvá mozaika doplňující RDRMDR 8filtrvé mozaiky. Disponuje lepším prostorovým rozlišením (128 pixelů na stupeň) a zobrazuje jen severní část planety (část H1) a sever částí H2-H5. Je fotometricky upravena se stejnými parametry jako RDRMDR. Použité filtry pro MAPMP5 mozaiku jsou F, D, G, L a I (Murchie a kol. 2017; ODE 2025e).

Všechny produkty, které jsou v mapové projekci (RDRMDR, MDRWAC, MAPMP5), využívají standardizované kartografické projekce: ekvidistantní válcovou projekci pro oblasti mezi $+50^\circ$ šířky a polární stereografickou pro oblasti nad $+50^\circ$ šířky (Murchie a kol. 2017).

3.2. Datové produkty ze spektrometru MASCS-VIRS

VIREDR (VIRS Experiment Data Record)

VIRS EDR je soubor datových produktů generovaných přístrojem VIRS, který má dva detektory – VIS (Visible) a NIR (Near infrared). Každý z těchto detektorů vytváří samostatný datový produkt, označený v systému PDS jako „VIRSVIS“ (pro VIS) a „VIRSNIR“ (pro NIR). Kromě těchto dat existuje také MASCS Housekeeping EDR, což je soubor dat o provozních stavech přístroje MASCS. Tento produkt je v systému PDS označen jako „MASCCHK“. Obsahuje informace o technických parametrech přístroje a je definován v příslušné dokumentaci. Každý datový produkt VIRS EDR sestává ze dvou souborů: hlavní datový soubor uspořádaný ve formátu binární tabulky

PDS a samostatný popisný soubor (PDS label file) obsahující metadata, jako jsou čas začátku a konce pozorování, čas vytvoření produktu a strukturu tabulky s daty (Espiritu, Malaret 2015).

VIRCDR (VIRS Calibrated Data Record) (Izenberg, Ward 2017).

CDR produkty vznikají převedením hodnot, obsažených v EDR produktech, na fyzikální jednotky, CDR tedy obsahují kalibrovaná data. Stejně jako u EDR, i CDR obsahují samostatné produkty pro viditelnou část spektra (VIS) a pro infračervenou část spektra (NIR). Každý CDR produkt obsahuje čtyři typy spekter – nezpracovaná (surová) data (Raw Spectrum Data), opravená data (Corrected Counts Spectrum Data), kalibrovaná data (Calibrated Radiance Spectrum Data) a šumová data (Noise Spectrum Data). Jako EDR obsahuje hlavní soubor (binární tabulka s daty) a popisný PDS soubor (Izenberg, Ward 2017).

VIRDDR (VIRS Derived Data Record)

Počet DDR produktů je nižší než počet CDR produktů, což znamená, že ne všechny CDR produkty byly převedeny do DDR produktů. DDR produkty vznikly převedením spektra slunečního záření na odrazivost. U těchto dat byla aplikována i fotometrická korekce s parametry slunečního úhlu ($i=45^\circ$), emisního úhlu ($e=45^\circ$) a fázového úhlu ($g=90^\circ$). Každý DDR produkt se skládá ze dvou souborů – datového souboru a popisného souboru (Izenberg, Ward 2017).

VIRDAP (VIRS Derived Analysis Product)

DAP obsahuje mozaiku s rozlišením 500 metrů na pixel pro jednu vlnovou délku (750 nm) ze spektrálních dat VIRS, která pokrývá celou planetu. Produkt se skládá z devíti vrstev (např. vrstva emisního úhlu, fázového úlu, interpolovaná vrstva záře,...). Každá vrstva má separátní .IMG soubor, ale jen jeden PDS popisný soubor (Izenberg, Ward 2017).

3.3. Dostupnost dat

Všechna dostupná data zaštiťuje PDS, který se dělí do několika uzlů (nodes), pod které spadají různé data sety. Data z kamery MDIS spadají pod PDS Imaging Node, data ze spektrometru MASCs poté spadají pod PDS Atmospheres Node (UVSS data) a pod PDS Geosciences Node (VIRS data) (PDS Geosciences Node 2025b).

K získání dat vede několik cest, v adresáři *messenger* na webových stránkách <https://pds-geosciences.wustl.edu/messenger/> si lze vybrat z data setů pořízených přístroji XRS, GRNS, MLA i MASCs. U MASCs dat si lze vybrat, zda uživatel chce data z UVSS nebo VIRS a poté i jestli chce „raw“ data (EDR) nebo kalibrovaná data (CDR).

Dalším způsobem, jak získat data je Mercury Orbital Data Explorer (ODE) přístupný na webové stránce <https://ode.rsl.wustl.edu/mercury/index.aspx>. Uživatel si zde zvolí přístroj (GRS, MASCs, MDIS-WAC, MDIS-NAC, MLA, NS XRS), poté si zvolí úroveň předzpracování dat (Raw Data, Calibrated Data, Derived Data) a nakonec si zvolí přesný typ produktu. Výsledné produkty lze poté filtrovat pomocí několika parametrů:

- Product ID/LID – pokud uživatel zná ID daného produktu, tak ho zde může zadat a archiv mu tento produkt vyhledá,
- filtrování na základě lokace nebo vlastnosti – zde si může uživatel zvolit, zda chce vyhledat území s krátery, planinami atd. a zadat jejich jméno, archiv poté vyfiltruje jen ty produkty, které alespoň částečně zobrazují dané místo,
- filtrování na základě času – uživatel zadá časové rozmezí, kdy byly produkty pořízeny,
- filtrování pomocí pozorovacích úhlů – zde si může uživatel zvolit, pod jakými úhly byl produkt pořízen, na výběr je sluneční, emisní a fázový úhel.

Produkty lze také hledat pomocí přiložené mapy – uživatel může pomocí bodu či polygonu označit území a archiv vyhledá všechny produkty, které alespoň částečně toto území zahrnují. Poté je potřeba vybrané produkty přidat do košíku, vybrat způsob

archivace a organizace adresáře, nakonec je nutné zadat emailovou adresu, na kterou přijde odkaz ke stažení dat (obrázek 7).

Obrázek 7: Výběr archivace a organizace dat při žádosti o data (ODE 2025f).

Dalším možným způsobem k získání dat (pouze těch z kamery MDIS) je archiv PILOT (Planetary Image Locator Tool, <https://pilot.wr.usgs.gov/>), který byl vyvinut společnostmi NASA a USGS (United States Geological Survey). Uživatel si zde vybere žádané vesmírné těleso, ke kterému jsou k dispozici data, dále pak misi a přístroj. K Merkuru jdou zde k dispozici snímky pořízené sondami Mariner 10 a MESSENGER. Uživatel si zde může zvolit území pomocí bodu či polygonu a výsledné snímky lze poté filtrovat (např. podle času pořízení, úhlů pozorování nebo prostorového rozlišení).

K prohlížení některých dat a dalších odvozených dat lze použít interaktivní mapu Merkuru, kterou spravují vědci z JHUAPL (Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory). Mapa je dostupná na adrese <https://mercury.quickmap.io/> a lze si zde

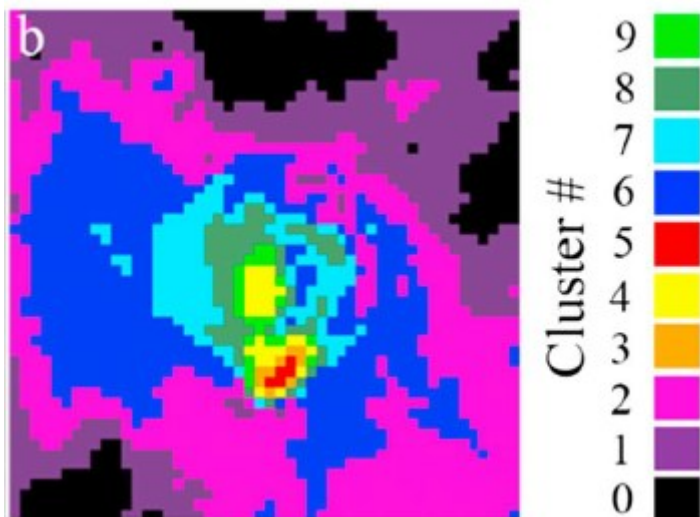
zobrazit například povrch Merkuru v nepravých barvách, názvy topografických prvků, či jednotlivá spektra pořízená MASCS.

3.4. Studie využívající spektrální data

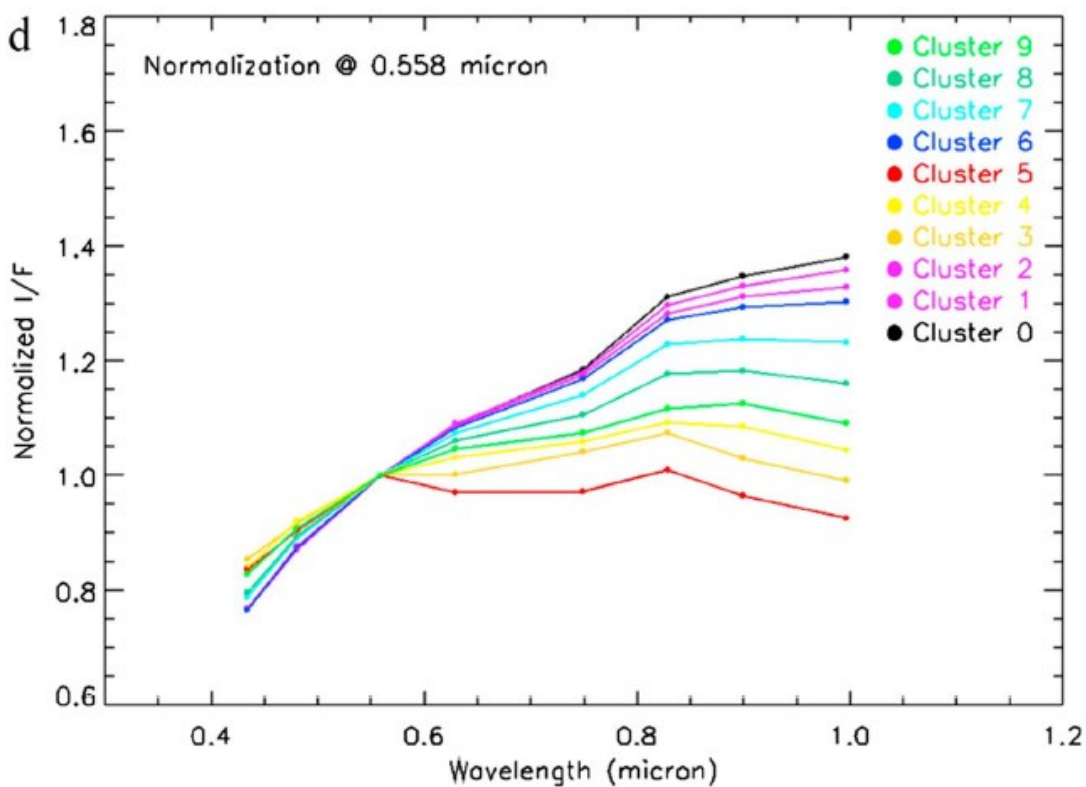
V této práci se budeme zabývat studii, které využívají MDIS-WAC data jak ke geologickým analýzám, tak i těm spektrálním.

Všechny, níže specifikované, studie využívají stejný postup předzpracování dat. Provádí stejné geometrické korekce a fotometrické korekce pomocí Hapkeho modelu. Hapkeho model je fyzikální model používaný hlavně v planetárních vědách a dálkovém průzkumu Země. Hapkeho model modeluje, kolik světla se od povrchu odrazí v závislosti na úhlu dopadu světla (od Slunce), úhlu pohledu (z kamery) a vlastnostech částic na povrchu (jejich tvar, drsnost, velikost, albedo – tedy odrazivost) (Shkuratov a kol. 2012).

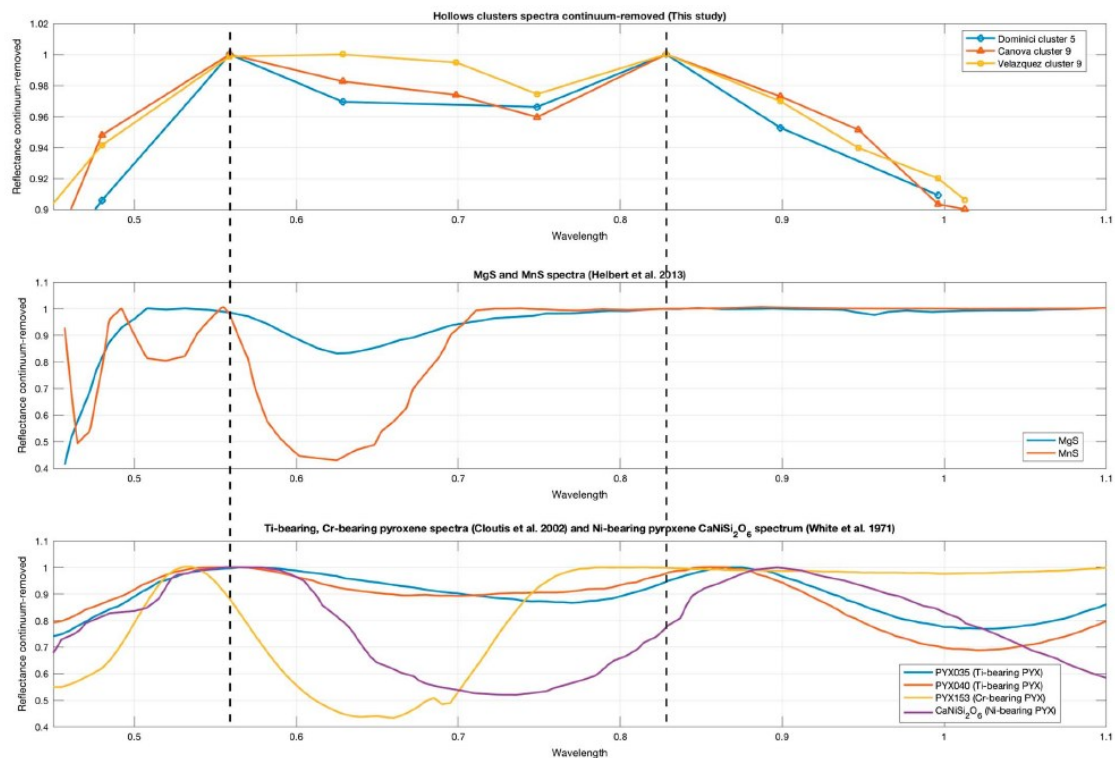
Studie Lucchetti a kol. (2018) se zaměřuje na geomorfologickou a spektrální analýzu *hollows* ve třech impaktních kráterech (Dominici, Canova a Velazquez). Pro spektrální analýzu byla využita multispektrální data z MDIS-WAC v 8 nebo 11 filtrech. Po aplikování všech potřebných korekcí, byla provedena neřízená klasifikace *k-means clustering* pro identifikaci homogenních oblastí dle spektrálních vlastností (obrázek 8 a 9). Spektrální křivky byly porovnány s laboratorními spektry různých druhů sulfidů a pyroxenů (obrázek 10). Dle studie všechny analyzované *hollows* vykazují absorpční pásmo mezi 0,558 a 0,828 μm . Autoři se domnívají, že spektrální vlastnosti *hollows* souvisí nejen se sulfidy, ale i s horninotvornými materiály jako jsou právě zmíněné pyroxeny.



Obrázek 8: Klastry po aplikování k-means algoritmu v oblasti Dominici kráteru (Lucchetti a kol. 2018).



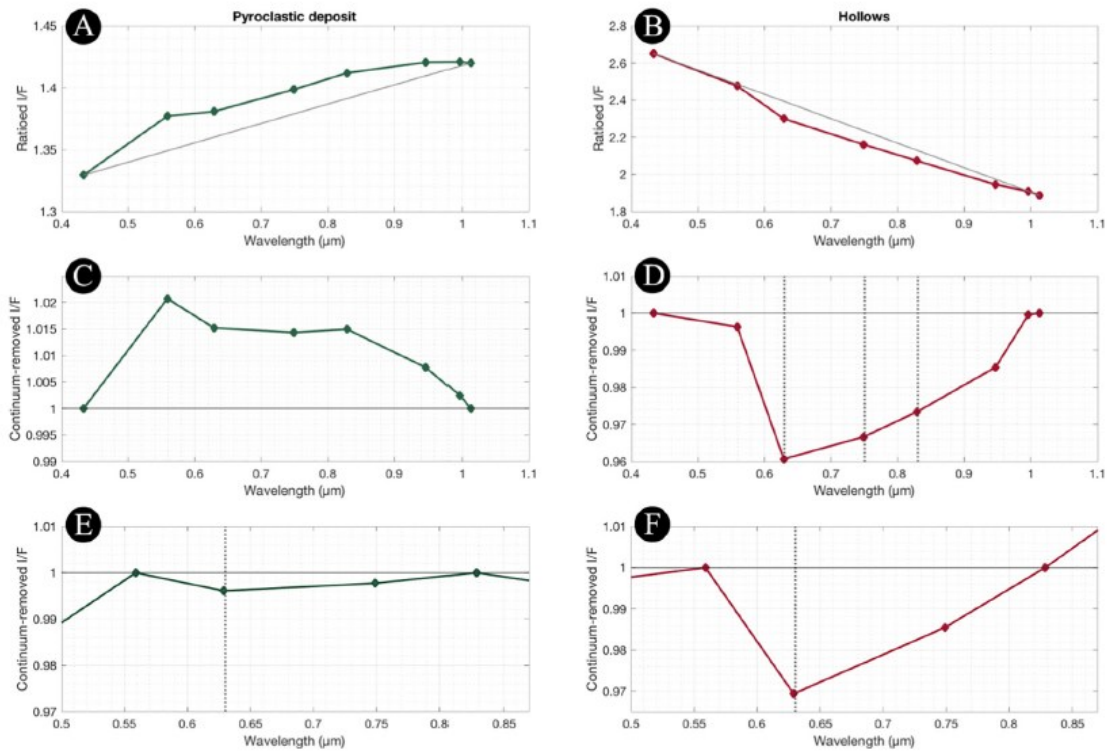
Obrázek 9: Průměrná spektra pro každý klastr, normalizovaná v hodnotě $0,558 \mu\text{m}$ (Lucchetti a kol. 2018).



Obrázek 10: Porovnání spektrálních křivek analyzovaných kráterů a křivek sulfidů a pyroxenů (Lucchetti a kol. 2018).

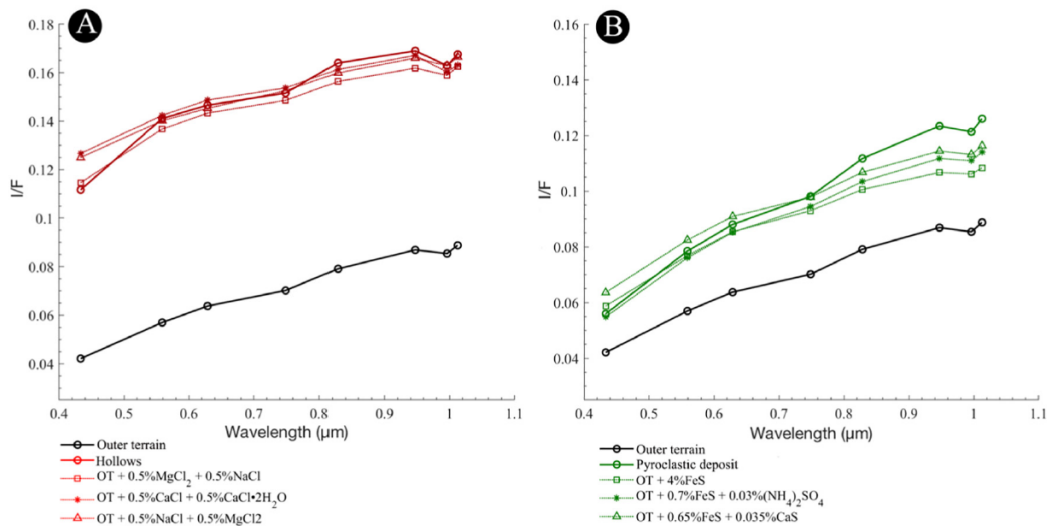
Studie od Lucchetti a kol. (2021) a Pajola a kol. (2021) se zabývají analýzou dvou typů povrchů přítomných na povrchu Merkuru: *hollows* a ložisek pyroklastického materiálu. Obě tyto studie využívají stejné předzpracování dat, stejné neřízené klasifikace *k-means clustering* a porovnávají převzorkované spektrální křivky minerálů s těmi z kamery MDIS-WAC. Obě tyto práce navazují svým výzkumem na studii od Lucchetti a kol. (2018) a doplňují ji.

Lucchetti a kol. (2021) analyzují oblast kráteru Tyagaraja. V této studii porovnávají spektra pyroklastických ložisek a *hollows* s referenčním spektrem z okolního terénu a odstraňují kontinuum pro zvýraznění absorpčních pásů (obrázek 11). Dále využívají metodu lineárního spektrálního míchání, jejíž výsledky naznačují, že *hollows* mohou obsahovat chloridové minerály a pyroklastická ložiska sulfidové minerály (obrázek 12).



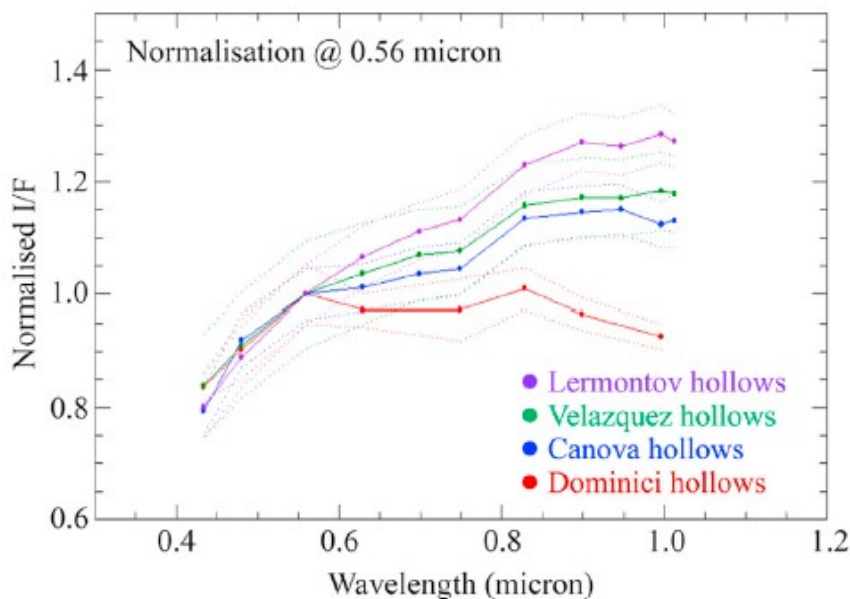
Obrázek 11: Spektra pro hollows a pyroklastická ložiska (Lucchetti a kol. 2021).

A) Spektrum z poměru mezi pyroklastickým ložiskem a okolním terénem. B) Spektrum vyplývající z poměru mezi hollows a okolním terénem. C) Spektrum pyroklastického ložiska s odstraněným kontinuem – rozsah 0,43 μm - 1,01 μm . D) Spektrum hollows s odstraněným kontinuem – rozsah 0,43 μm - 1,01 μm . Lineární kontinuum je znázorněno šedou plnou čarou na obrázcích A a B. E) Spektrum pyroklastického ložiska s odstraněným kontinuem – rozsah 0,55 μm - 0,82 μm . F) Spektrum hollows s odstraněným kontinuem – rozsah 0,55 μm - 0,82 μm .



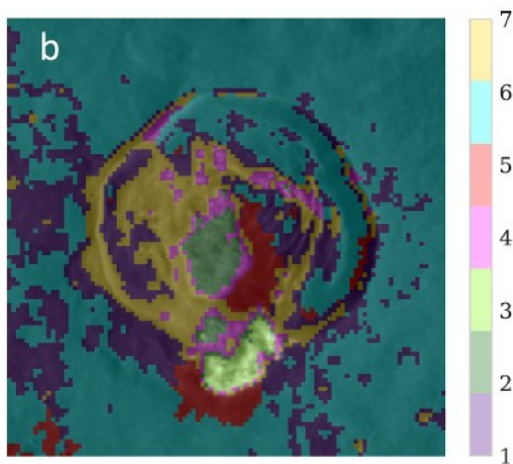
Obrázek 12: Možná kombinace lineárního míchání pro hollows a pyroklastická ložiska (Lucchetti a kol. 2021).

Pajola a kol. (2021) analyzovali oblast kráteru Lermontov. Jejich spektrální analýza zahrnovala převzorkování spektrálních křivek vybraných minerálů a následné porovnání se spektry z MDIS-WAC. Dále porovnávali i spektrální vlastnosti různých kráterů (obrázek 13). Ve výsledcích uvádějí, že pyroklastická ložiska odpovídají spektrům pyroxenů bohatých na titan a nikl, a hollows odpovídají spektrům chloridů a sulfidů.

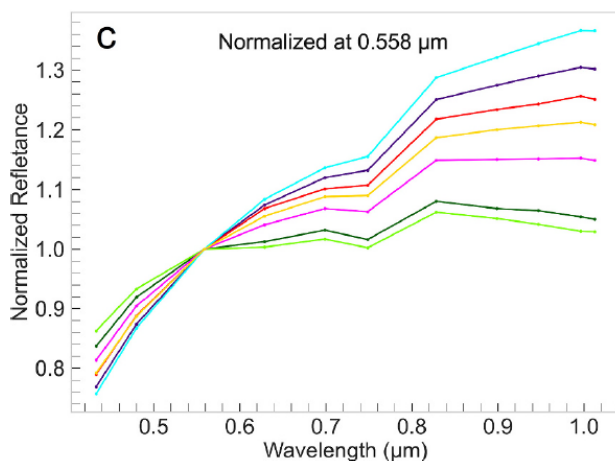


Obrázek 13: Porovnání spektrálních křivek hollows v různých kráterech (Pajola a kol. 2021).

Studie od Emran a Stack (2025) se od výše zmíněných studií liší přístupem u rozpoznávání různých typů povrchu. Nevyužívá neřízenou klasifikaci *k-means clustering*, ale využívá *Gaussian mixture model*, který podle autorů (2025) „má výhodu v odhalování složitých vzorců a identifikaci heterogenity v datech, díky čemuž jsou výsledné klastry reprezentativnější pro reálný svět.“ Na obrázku 14 jsou znázorněny výsledné klastry a na obrázku 15 jejich spektrální křivky normalizované na 0,558 μm . Spektra výsledných klastrů jsou poté porovnávána s převzorkovanými spektry ze spektrální knihovny. Využili také model lineárního spektrálního míchání k odhadu podílu jednotlivých minerálních koncových členů v každém typu povrchu. Ve výsledcích uvádí dva různé typy *hollows* – aktivní a ustupující. Aktivní *hollows* mají vysoký podíl silikátů a nízký obsah sulfidů, ustupující *hollows* mají vyšší podíl sulfidů než aktivní *hollows*. Okolní terén má vysoký podíl grafitu (až 37 %) a různých sulfidů.



Obrázek 14: Výsledné klastry po použití *Gaussian mixture model* (Emran, Stack 2025).



Obrázek 15: Spektra pro klastry, normalizovaná na 0,558 μm (Emran, Stack 2025).

4 Analýza vybraného území

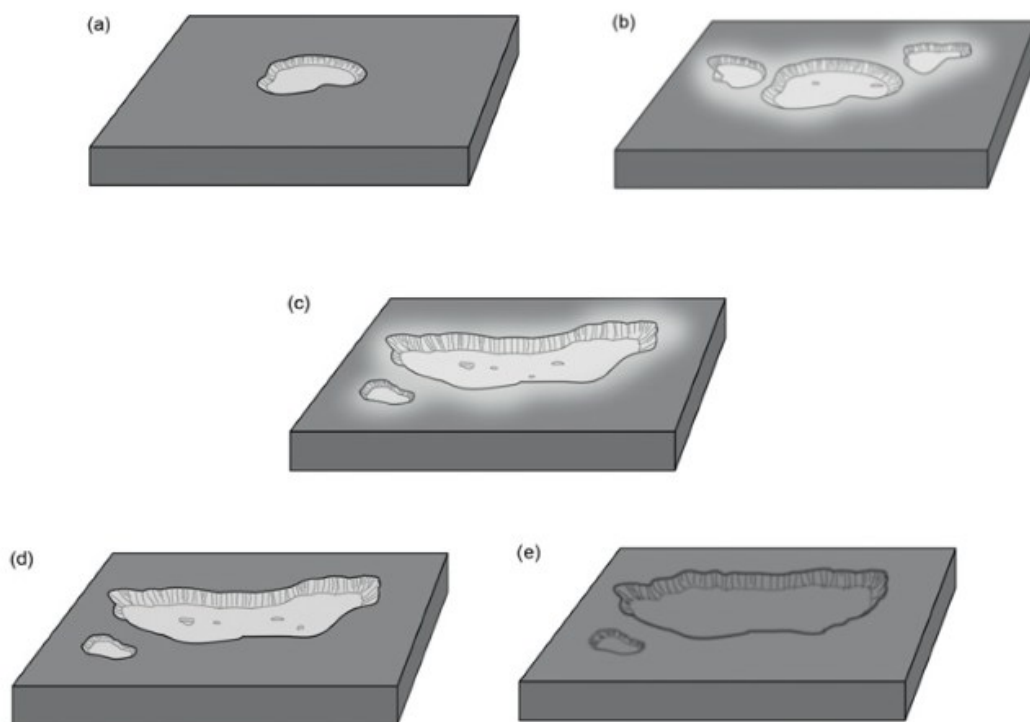
4.1. Výběr území

Kapitola se zabývá analýzou kráteru Lermontov (15,24°N, 48,94°W). Tato oblast byla zvolena pro přítomnost unikátních tvarů povrchu (*hollows*), relativně dobrou míru prozkoumanosti a dostupnost dat ze sondy MESSENGER.

Topografická data ukazují, že kráter má průměr přibližně 166 km a hloubku kolem 2 km. Profil dna není zcela rovný, což může být důsledkem pozdějších impaktů nebo vnitřní tektonické aktivity Merkuru. Výrazná odrazivost některých oblastí na dně kráteru odpovídá výskytu relativně „mladých“ geologických formací, které nebyly dosud pokryty prachem a regolitovou vrstvou (Blewett a kol. 2011, Pajola a kol. 2021).

Hollows jsou geomorfologické útvary, které jsou unikátní pro tuto planetu. Tyto útvary se dají popsat jako prohlubně bez okrajů s nepravidelnými, zaoblenými obrysy. Jejich průměr se pohybuje od několika desítek metrů až po několik kilometrů, přičemž větší útvary pravděpodobně vznikly splynutím menších *hollows*. Důkazy naznačují, že *hollows* vznikají ztrátou těkavých látek a že jsou velmi mladé vzhledem k celkovému stáří povrchu Merkuru (Solomon a kol. 2018). Na obrázku 16 je vyobrazeno schéma vývoje *hollows*.

Pyroklastická ložiska, vyskytující se též v analyzovaném kráteru Lermontov, jsou usazeniny materiálu, který byl vyvržen při explozivních sopečných erupcích. I když má Merkur velmi tenkou nebo žádnou atmosféru a jeho vulkanismus se liší od toho na Zemi, existují důkazy, že se na Merkur v minulosti vyskytoval explozivní vulkanismus – tedy erupce, při kterých magma uvolnilo těkavé plyny, což způsobilo výbuch a rozptýl jemného sopečného materiálu (tzv. pyroklastik). Pyroklastická ložiska se často vyskytují v blízkosti *hollows* nebo propadlých oblastí a jsou považována za poměrně mladá (Solomon a kol. 2018).



Obrázek 16: Schéma vývoje hollows (Solomon a kol. 2018).

a) vznik malé hollow, b) původní hollow se zvětšila a začaly vznikat další hollows. Vnitřek je světlý a hollows jsou obklopeny světlými halo, c) hollows z b) se zvětšily a spojily, další hollow začala vznikat, d) vývoj se pozastavuje, halo zmizely, e) vývoj skončil, vnitřek má stejnou odrazivost jako okolní terén.

Zpracovávaná data z kamery MDIS-WAC byla stažena z Mercury Orbital Data Explorer. Konkrétně se jedná o EDRWAC data pořízená sondou roku 2014.

4.2. Předzpracování MDIS-WAC dat

Existuje několik produktů z kamery MDIS-WAC, které jsou nějakým způsobem již předzpracované a připravené k analýzám. To ale není případ dat EDRWAC, která byla použita v této práci. EDRWAC data jsou surová data, bez jakýkoliv geometrických, fotometrických korekcí nebo kalibrace a nejsou vhodná k žádné analýze (Hash a kol. 2015). Tato kapitola popíše, jak tato surová data upravit do podoby, aby bylo možné s nimi dále pracovat.

Pro tvorbu 8-filtrové mozaiky zájmového území bylo využito celkem osm *.IMG* souborů (tabulka 3). Každý *.IMG* soubor má svůj odpovídající *.xml* soubor se stejným názvem. Každý *.xml* soubor nese informace o snímku – jakým přístrojem byl snímek získán, jaký filtr byl použit (vlnová délka), jaké byly souřadnice sondy při pořizování snímku, jaký je pixelový rozsah snímku, apod.

Název souboru:
ew1053139916c.IMG
ew1053139920d.IMG
ew1053139924e.IMG
ew1053139912f.IMG
ew1053139928g.IMG
ew1053139908i.IMG
ew1053139932j.IMG
ew1053139936l.IMG

Tabulka 3: Soubory využité ke zpracování.

K předzpracování dat je nutné použít specializovaný software ISIS (Integrated Software for Imagers and Spectrometers).

ISIS je rozsáhlý a komplexní softwarový balík vyvíjený Astrogeologickým vědeckým centrem při USGS. Tento software je určen především pro zpracování obrazových a spektrálních dat z planetárních misí. ISIS umožňuje kompletní zpracování dat – od surových snímků až po plně analyzovatelné produkty. Obsahuje nástroje pro radiometrickou a geometrickou kalibraci, korekci zkreslení způsobeného optikou a pohybem sondy, projekci na různé kartografické systémy, mozaikování více snímků dohromady a přípravu dat pro další vědecké analýzy. Software podporuje data z většiny známých misí NASA, ESA a dalších vesmírných agentur (USGS 2025a).

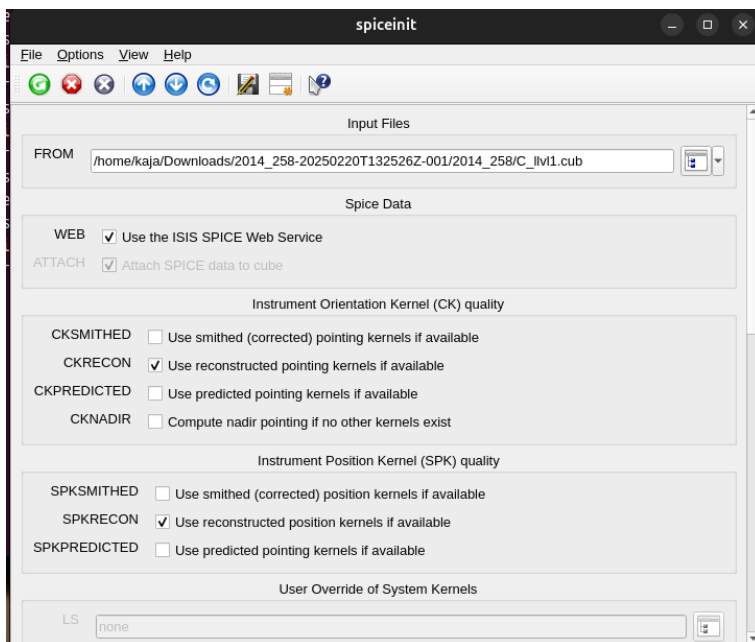
ISIS není podporován na operačním systému Windows, ale pouze na operačních systémech založených na UNIX (Ubuntu, macOS, Fedora). Jeho instalace je krok po kroku popsána na těchto webových stránkách: <https://astrogeology.usgs.gov/docs/how-to-guides/environment-setup-and-maintenance/installing-isis-via-anaconda/>.

4.2.1. Předzpracování v ISIS

ISIS lze používat dvojím způsobem – zpracováním dat pomocí příkazové řádky nebo pomocí grafického rozhraní, které je ale stejně nutné spustit v příkazové řádce (USGS 2025b).

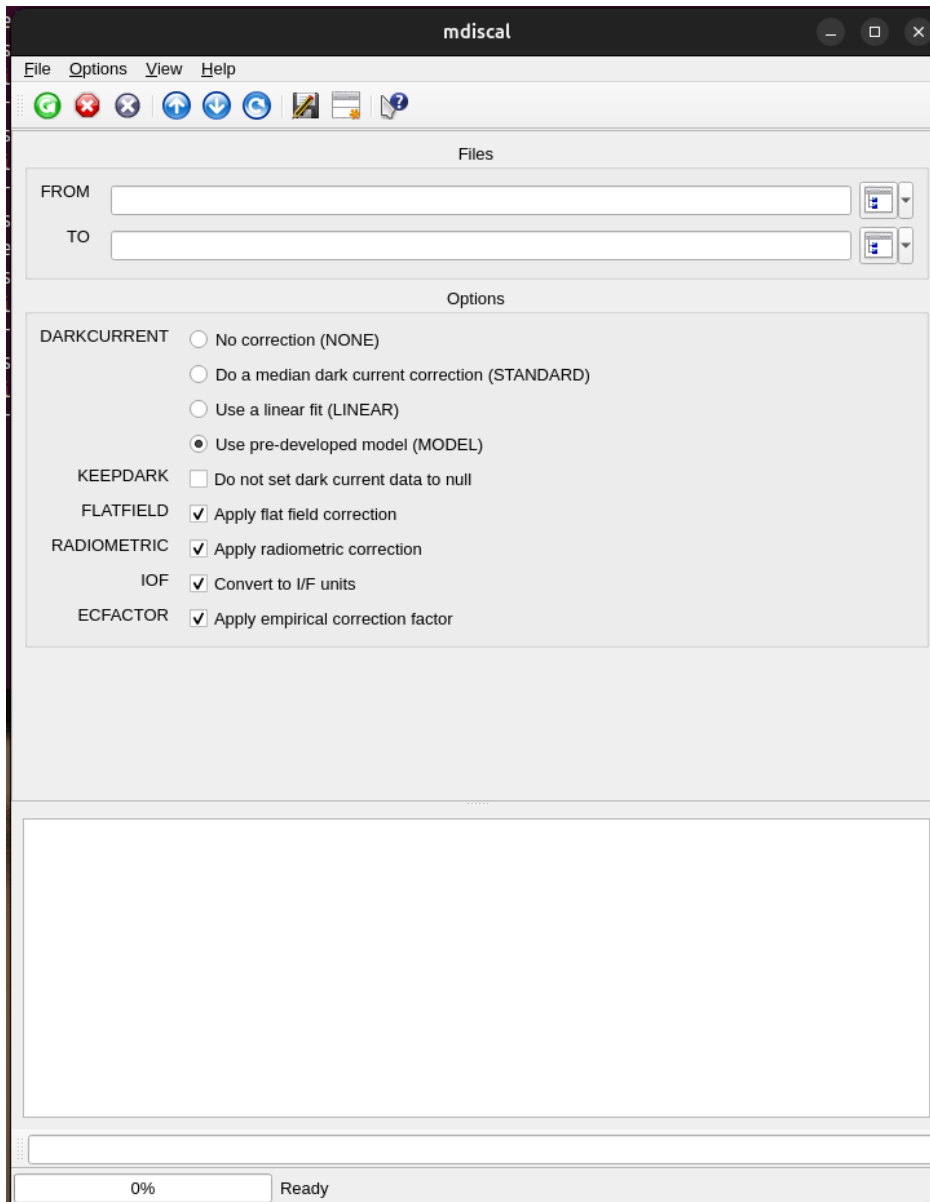
Předzpracování snímků se skládá z několika kroků a všechny tyto kroky je nutné aplikovat na všechny jednotlivé snímky. V této práci je využit postup sepsaný Beckerem a kol. (2013). Prvním krokem při zpracování EDRWAC dat je převedení *.IMG* souborů do *.cub* souborů, které jsou kompatibilní s ISIS, a i běžnými softwary. Tato konverze se provádí pomocí funkce *mdis2isis*. Tato funkce převádí i snímky, které byly na palubě sondy zkomprimovány do 8bitové podoby, zpět na jejich 12bitovou podobu pomocí look-up tables (USGS 2025c).

Druhým krokem je přidáním tzv. SPICE dat ke vzniklému *.cub* souboru. SPICE data (jádra) obsahují informace o poloze sondy, poloze Slunce a tvaru tělesa a jsou nezbytná pro určení planetografických souřadnic a fotometrických pozorovacích úhlů. K přidání SPICE dat slouží funkce *spiceinit*. V našem případě byl využit ISIS SPICE Web Service (obrázek 17), jelikož nevyžaduje stahování velkého množství dat (USGS 2025d).



Obrázek 17: Funkce *spiceinit* se zvolenou variantou využití ISIS SPICE Web Service (vlastní zpracování).

Třetím krokem je kalibrace snímku. Kalibrace je prováděna pomocí funkce *mdiscal*, která obsahuje několik korekcí (USGS 2025e). Na obrázku 18 lze vidět doporučené parametry pro funkci *mdiscal*.



Obrázek 18: Funkce *mdiscal* s doporučenými parametry (vlastní zpracování).

Čtvrtým krokem se snímkům pomocí funkce *cam2map* přiděluje mapové zobrazení. K vykonání funkce *cam2map* je nezbytné, aby snímky měly SPICE data (viz druhý krok). Výchozím zobrazením je Sansonovo zobrazení. Je možné zvolit předem nastavené soubory se zobrazeními, které ISIS poskytuje, nebo si ručně vytvořit vlastní (USGS 2025f). Obrázek 19 zobrazuje mnou vytvořený soubor pro mapové zobrazení odvozený z Becker a kol. (2013).

```

Group = Mapping
ProjectionName = Equirectangular
CenterLatitude = 15.0 <degrees>
CenterLongitude = 311.0 <degrees>

TargetName = Mercury
EquatorialRadius = 2440000.0 <meters>
PolarRadius = 2440000.0 <meters>

LatitudeType = Planetocentric
LongitudeDirection = PositiveEast
LongitudeDomain = 360 <degrees>

MinimumLatitude = 13.3 <degrees>
MaximumLatitude = 17.2 <degrees>
MinimumLongitude = 309.0 <degrees>
MaximumLongitude = 313.0 <degrees>

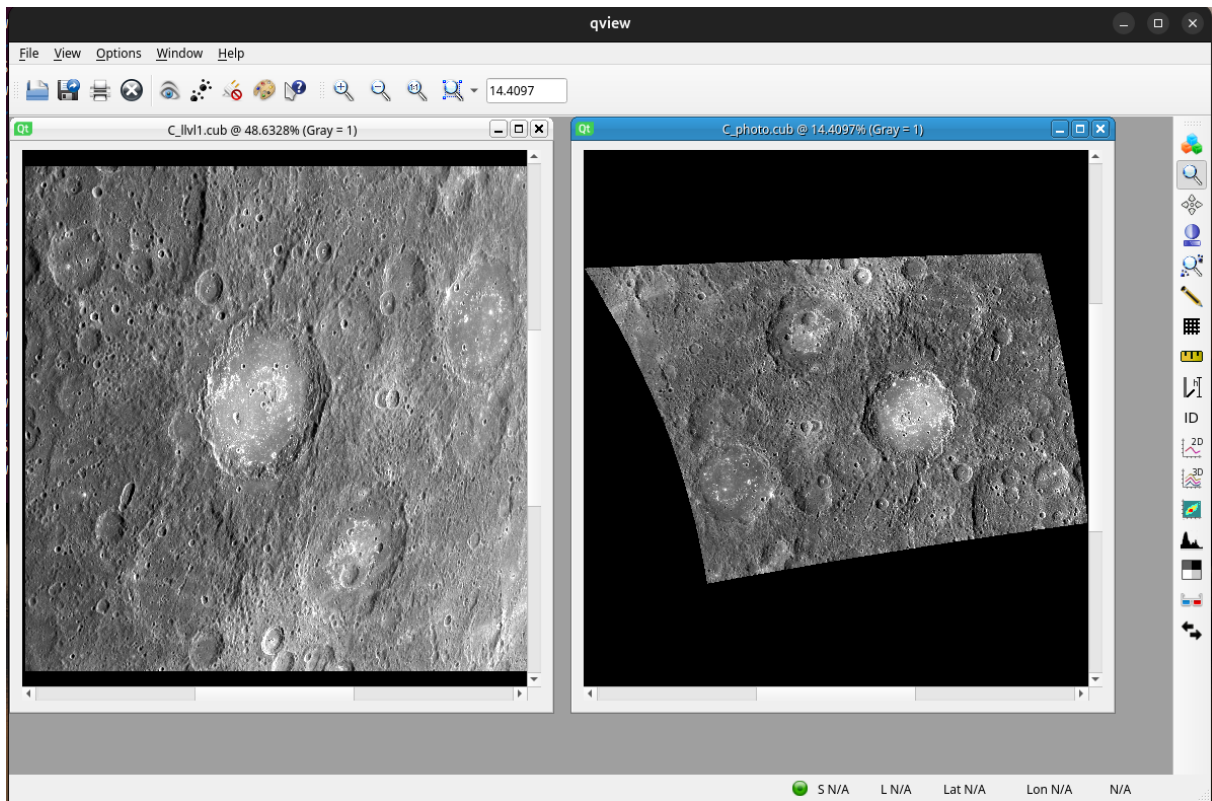
PixelResolution = 262.0 <meters/pixel>
Scale = 163.0 <pixels/degree>
End_Group|

```

Obrázek 19: Zvolené parametry pro mapové zobrazení (vlastní zpracování).

Posledním krokem je aplikování fotometrické korekce, ta se v ISIS provádí pomocí funkce *photomet*. Tato funkce provádí fotometrickou korekci pixelů obrazu pořízených za různých podmínek osvětlení a pozorování tím, že upravuje jas a kontrast tak, aby výsledný obraz vypadal, jako by byl získán za jednotných podmínek. Funkce obsahuje několik fotometrických modelů (USGS 2025g). V našem případě byl využit Hapkeho model s parametry, které jsou dostupné v Becker a kol. (2013). V příloze 1 jsou parametry pro všechny snímky, které byly využity ve funkci *photomet*.

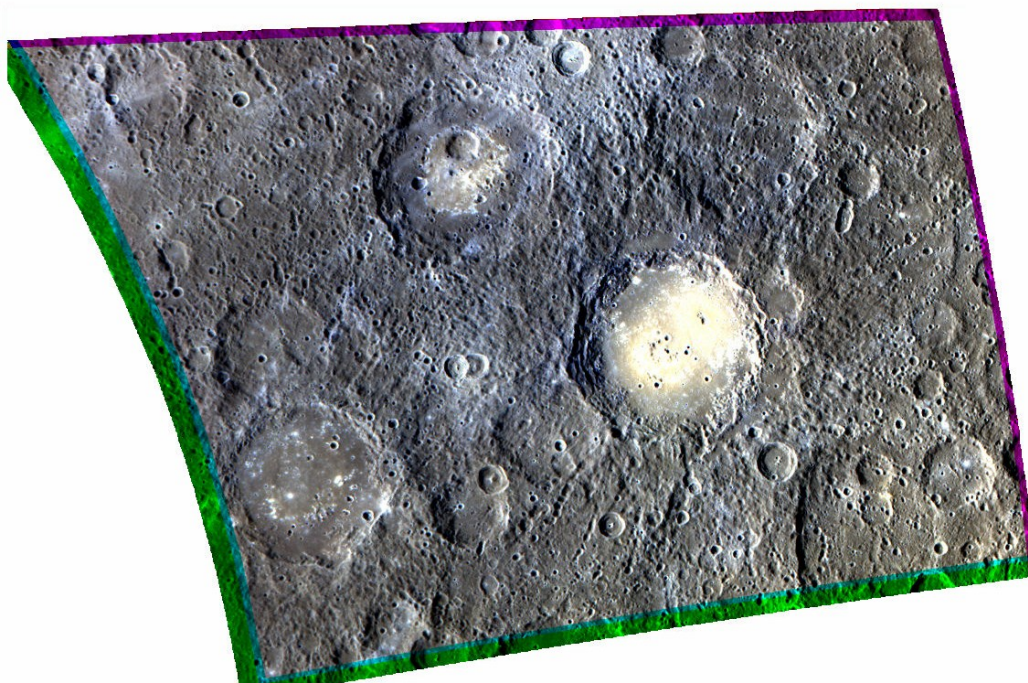
Na obrázku 20 pak můžeme vidět porovnání jednoho snímku (filtru „C“ – 480 nm) před zpracováním a po kompletním zpracování.



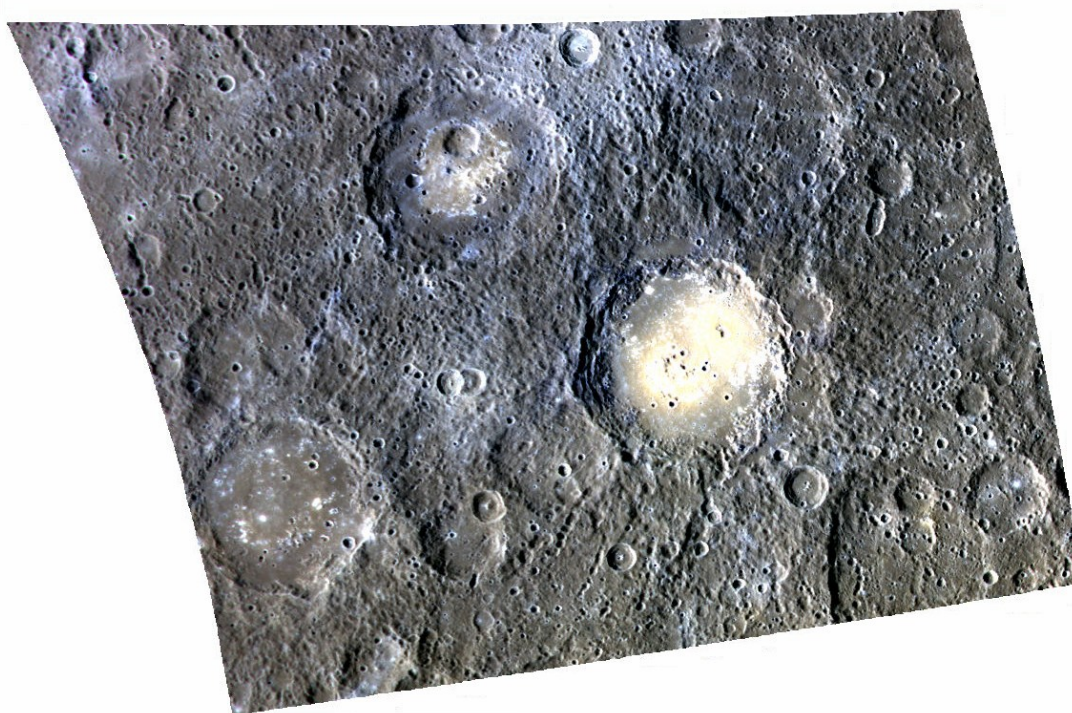
Obrázek 20: Porovnání snímků filtru „C“ – 480 nm (vlevo před zpracováním, vpravo po zpracování) (vlastní zpracování).

Po zpracování všech osmi snímků byly výsledné soubory nahrány do softwaru ENVI (Environment for Visualizing Images) a pomocí funkce *Build Layer Stacks* byla vytvořena 8-filtrová mozaika (obrázek 21).

Kromě dat vlastnoručně předzpracovaných byla stažena data již předzpracovaná. Jedná se o produkt RTMWAC dostupný z <https://ode.rsl.wustl.edu/mercury/productsearch> (obrázek 22). Využívá stejné snímky, ale rozdíly mezi mozaikami jsou ve způsobu předzpracování dat. RTMWAC mozaika je na rozdíl od naší v ortografické projekci, fotometrická korekce nevyužívá Hapkeho modelu, ale standardní pozorovací geometrie, kdy: sluneční úhel = 30° , emisní úhel = 0° a fázový úhel = 30° (Murchie a kol. 2017). Tato mozaika však v analýze použita nebyla a slouží jen k vizuálnímu porovnání.



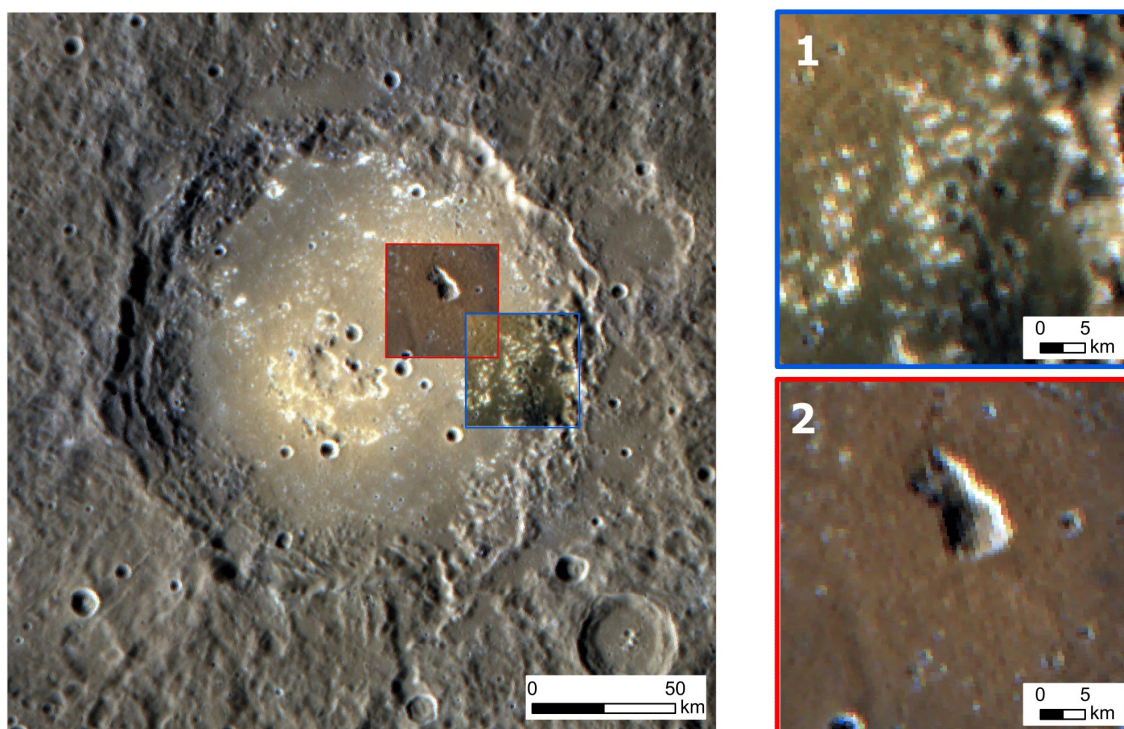
Obrázek 21: 8-filtrová mozaika vytvořená z EDRWAC dat v ISIS zobrazující území kráteru Lermontov v nepravých barvách (R: filtr I-996 nm, G: filtr G-748 nm, B: filtr F-433 nm) (vlastní zpracování).



Obrázek 22: 8-filtrová mozaika z produktu RTMWAC zobrazující území kráteru Lermontov v nepravých barvách (R: filtr I-996 nm, G: filtr G-748 nm, B: filtr F-433 nm) (vlastní zpracování)

4.3. Spektrální analýza

Na základě studie od Pajola a kol. (2021) byla vybrána dvě menší území v kráteru Lermontov, která obsahují dva charakteristické typy povrchu – *hollows* a pyroklastická ložiska (obrázek 23). Ve vybraných územích byla v softwaru ENVI provedena neřízená klasifikace K-means nejprve s osmi třídami a po prozkoumání průměrných spekter pro dané třídy a po porovnání se studií od Pajola a kol. (2021), byly provedeny klasifikace znovu, tentokrát pouze se čtyřmi třídami. Ke hlubší analýze bylo vybráno pouze území s *hollows* (na obrázku 23 označeno modře), jelikož obsahuje *hollows* i pyroklastická ložiska.



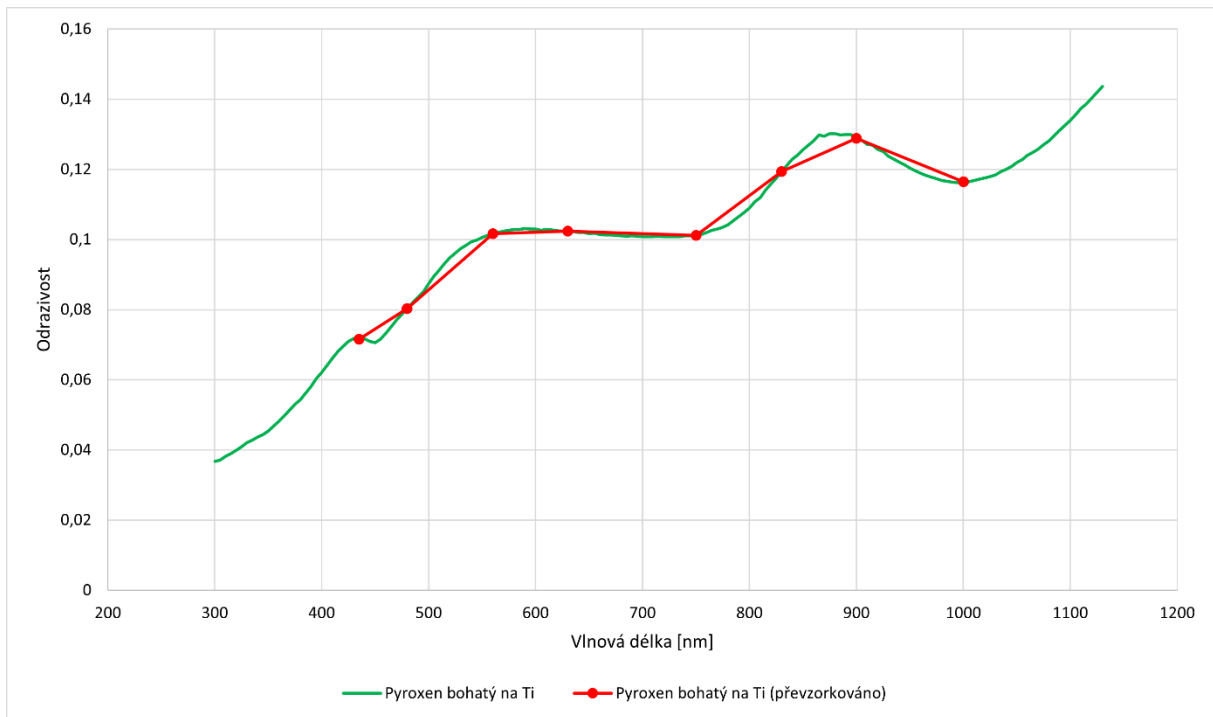
Obrázek 23: Vybraná území v nepravých barvách (filtry I, G, F) – modře oblast s *hollows* (1), červeně oblast s pyroklastickými ložisky (2) (vlastní zpracování).

V rámci analýzy dat je běžnou praxí zobrazování průměrných spekter jednotlivých tříd. Tato průměrná spektra jsou konstruována jako aritmetický průměr hodnot spektrální odezvy (např. odrazivosti) ve všech pixelech náležejících dané třídě. Slouží jako důležitý nástroj pro vizuální i kvantitativní srovnání spektrálních charakteristik, a tím i pro ověření spektrální odlišitelnosti mezi jednotlivými kategoriemi. Zobrazování průměrných spekter má kromě kontrolní funkce i význam interpretační. Umožňuje

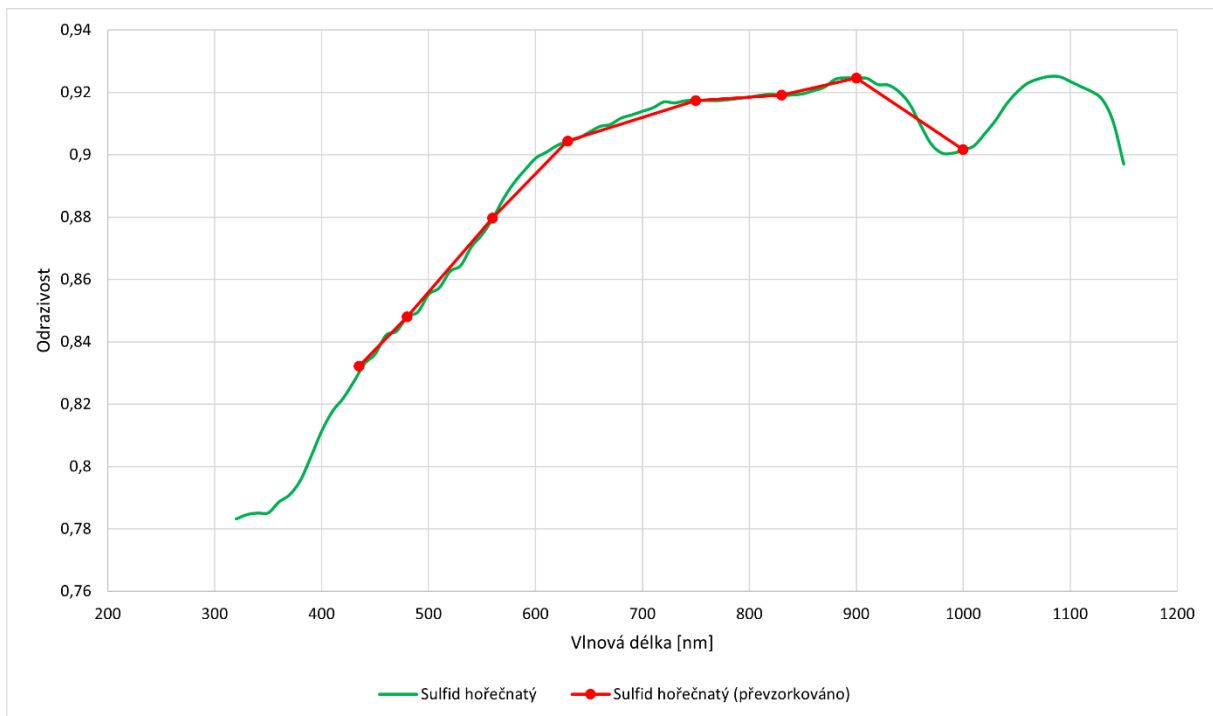
porovnání získaných spektrálních charakteristik s referenčními spektry publikovanými ve spektrálních knihovnách či odborných studiích (van der Meer a kol. 2012).

Za účelem zvýšení srovnatelnosti spekter napříč třídami se často aplikuje normalizace spektrálních křivek. Tato může být provedena různými způsoby, nejčastěji prostřednictvím škálování na jednotkový rozsah (např. dělení maximální hodnotou). V této práci byla normalizace provedena dělením hodnot celého spektra hodnotou na vlnové délce 558 nm. Hlavním cílem normalizace je potlačení vlivu absolutních rozdílů v intenzitě odrazivosti, které mohou být způsobeny např. variabilitou osvětlení, a tím umožnit detailnější analýzu tvaru spektrálních křivek (van der Meer a kol. 2012).

Studie od Lucchetti a kol. (2021) a Pajola a kol. (2021) navrhuje, že *hollows* jsou tvořeny chloridy a sulfidy a pyroklastická ložiska pyroxenem bohatým na titan. Vzhledem k tomu, že vybrané území s *hollows* (1, modře ohraničené) obsahuje oba tyto povrchy a potenciálně tedy i tyto materiály, byl proveden *Linear Spectral Unmixing* (LSU) a *Spectral Angle Mapper* (SAM). Koncové členy byly pro obě metody vybrány ze spektrální knihovny RELAB (<https://pds-speclib.rsl.wustl.edu/>). RELAB poskytuje rozsáhlou databázi laboratorních spekter různých materiálů, včetně meteoritů, minerálů, hornin a analogů planetárních povrchů. Tato spektra se využívají při interpretaci spektrometrických měření vesmírných těles (NASA RELAB 2025). Na základě výše zmíněných studií byly vybrány spektrální křivky pro pyroxen bohatý na titan a sulfid hořečnatý. Tato spektra byla převzorkována tak, aby odpovídala filtrům kamery MDIS-WAC (obrázek 24 a 25) a následně byly spuštěny funkce LSU a SAM.



Obrázek 24: Spektrální křivky pyroxenu bohatého na titan (vlastní zpracování na základě RELAB knihovny, PDS Geosciences Node 2025c).

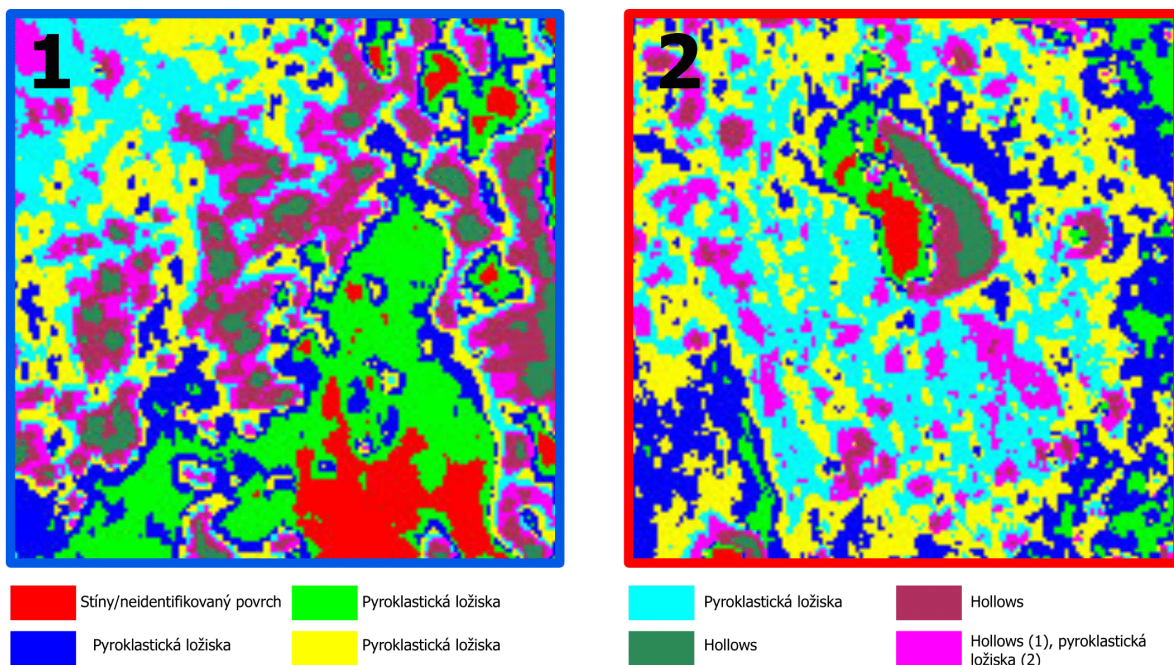


Obrázek 25: Spektrální křivky sulfidu hořečnatého (vlastní zpracování na základě RELAB knihovny, PDS Geosciences Node 2025d).

4.4. Výsledky

Na obrázku 26 jsou výsledky klasifikace K-means do osmi tříd, po porovnání s RGB kompozitem na obrázku 22 si lze všimnout, že *hollows* korelují se světlými částmi povrchu (s vysokým albedem). Oblasti, které jsou na snímcích znázorněny světle zelenou, tmavě modrou, světle modrou a žlutou jsou pyroklastická ložiska. Tmavě zelenou a fialovou barvou jsou znázorněny *hollows*. Zvláštním případem je růžová barva, která v případě snímku 1 spektrálně spíše odpovídá *hollows* a ve snímku 2 odpovídá pyroklastickým ložiskům. Oblasti, které jsou na obou územích znázorněné červenou barvou jsou pravděpodobně stíny nebo neidentifikovatelný typ povrchu.

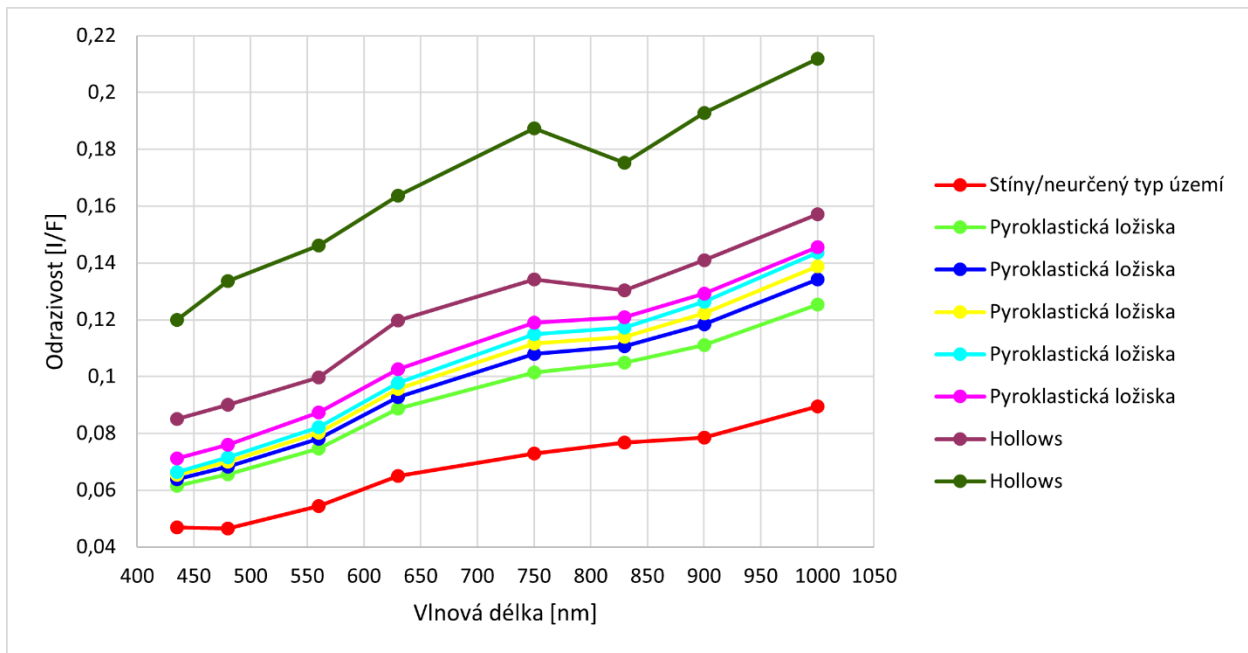
Ve snímku 1 pyroklastická ložiska zabírají levou horní část a spodní část snímku, ve snímku 2 zabírají většinu území. *Hollows* se ve snímku 1 nacházejí uprostřed a při pravém okraji snímku, ve snímku 2 se nachází pouze na malém území uprostřed.



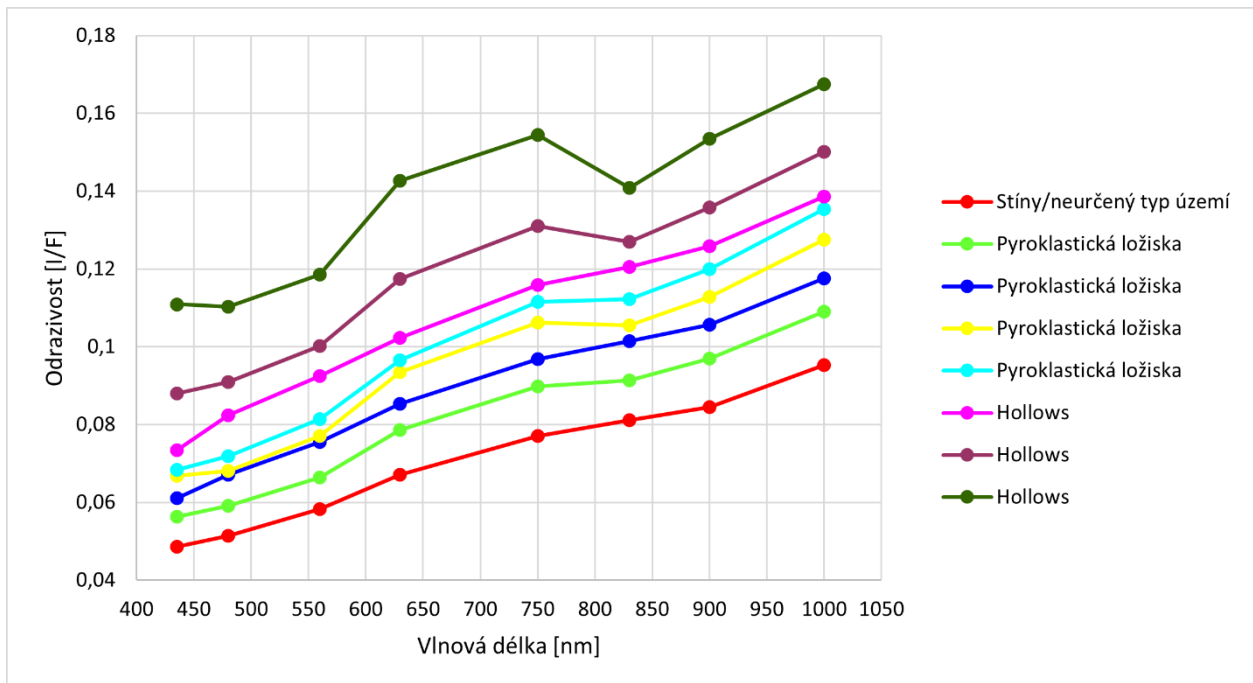
Obrázek 26: K-means klasifikace s osmi třídami. Modře území s *hollows* (1), červeně území s pyroklastickými ložisky (2) (vlastní zpracování).

Výsledné průměrné spektrální křivky za každou třídu u každého území jsou na obrázcích 27 a 28. Z grafů lze vyčíst, že *hollows* mají vyšší odrazivost na celém intervalu zkoumaných vlnových délek. S tím, že maximum (0,18-0,22) nastává na nejvyšší zkoumané vlnové délce, tj. 1000 nm. U spektrálních křivek *hollows* je zřetelný absorpční

pás na 830 nm. Naproti tomu, pyroklastická ložiska dosahují nižších hodnot odrazivosti a vykazují jen slabý absorpční pás na 830 nm.

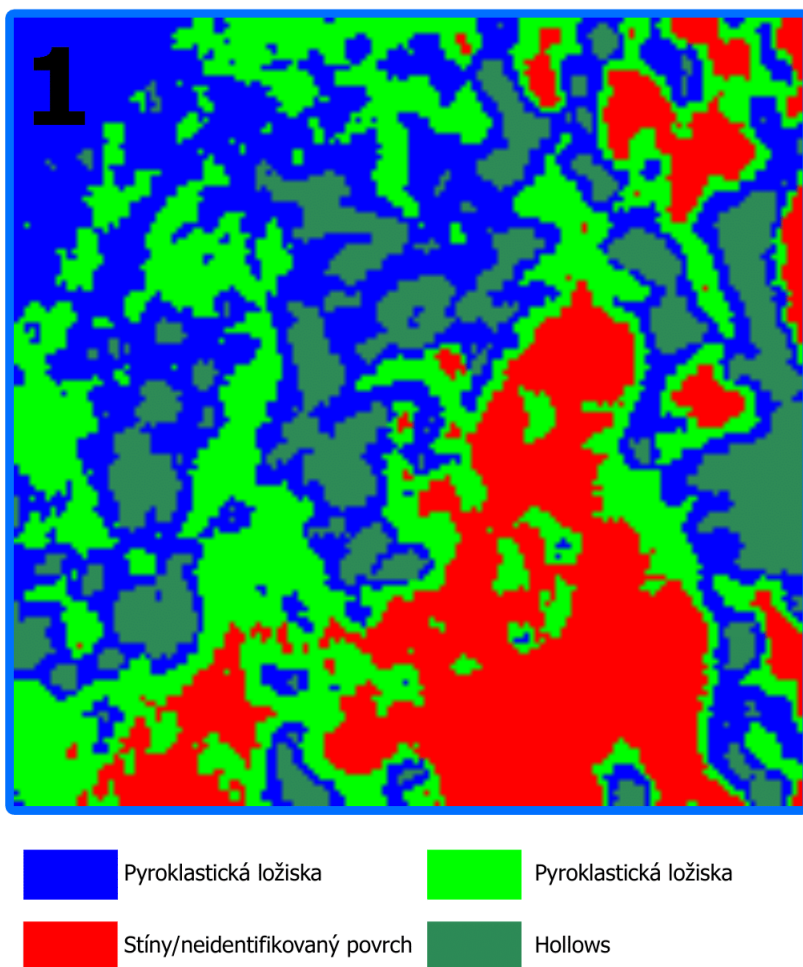


Obrázek 27: Průměrná spektra za třídy v oblasti pyroklastických ložisek (vlastní zpracování). Barvy spekter odpovídají neřízeným klasifikacím viz obrázek 26.



Obrázek 28: Průměrná spektra za třídy v oblasti hollows (vlastní zpracování). Barvy spekter odpovídají neřízeným klasifikacím viz obrázek 26.

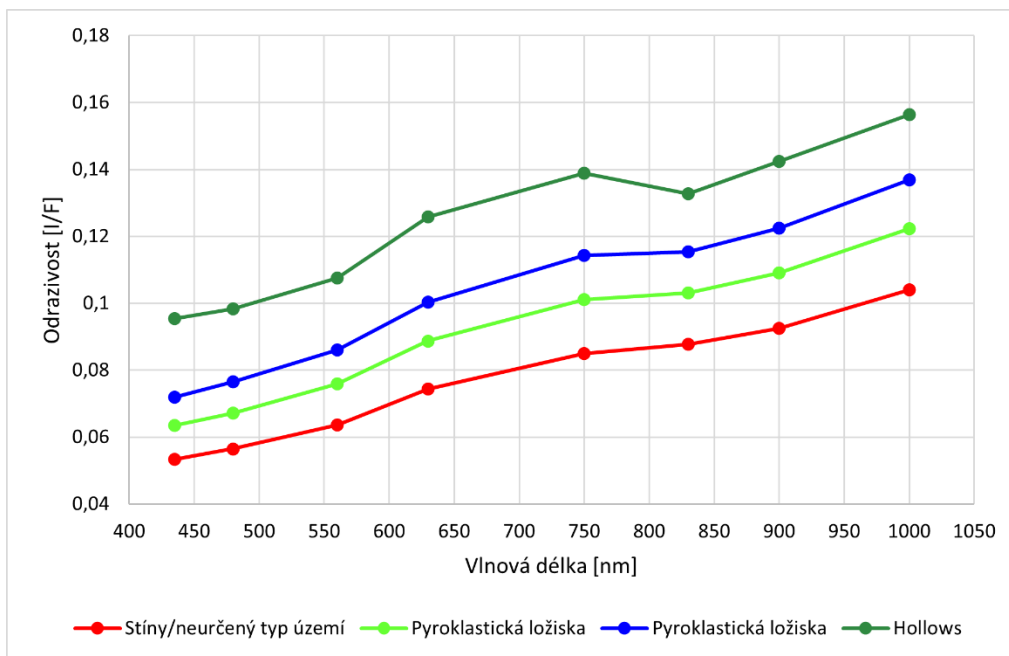
Na obrázku 29 je výsledek neřízené klasifikace, tentokrát pouze se čtyřmi třídami pro snadnější orientaci. Na území lze vidět, že *hollows*, které jsou vyobrazeny tmavě zelenou, víceméně korelují s klasifikací s osmi třídami a pyroklastická ložiska (modrá a světle zelená) se nacházejí převážně v levém horním rohu snímku.



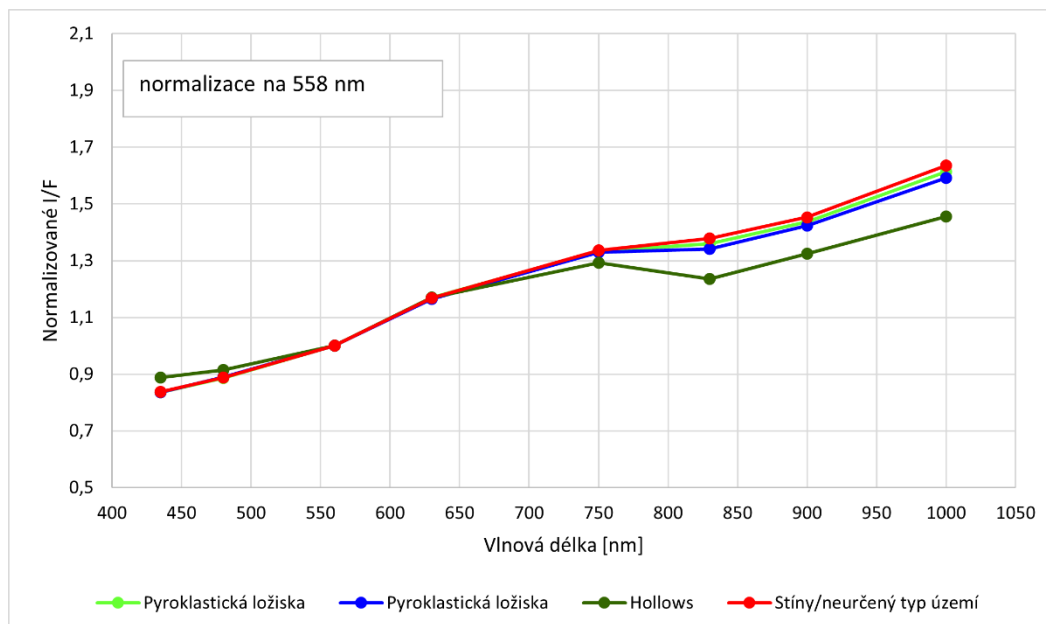
Obrázek 29: K-means klasifikace se čtyřmi třídami (vlastní zpracování).

Obrázek 30 zobrazuje průměrná spektra vyklasifikovaných tříd. Z grafu lze vyčíst, že *hollows* mají vyšší odrazivost na celém intervalu zkoumaných délek. Maximum (0,16) nastává na nejvyšší zkoumané vlnové délce (1000 nm). U spektrální křivky *hollows* je patrný absorpční pás na 830 nm. Naproti tomu, pyroklastická ložiska a stíny/neurčený typ území dosahují nižších hodnot odrazivosti a nevykazují žádný zřetelný absorpční pás.

Obrázek 31 zobrazuje ta stejná spektra normalizovaná v hodnotě 558 nm k rozlišení jejich odlišností. Spektrální křivky pyroklastických ložisek vykazují strmější trend růstu křivky než křivky *hollows*. Zajímavým zjištěním je, že normalizovaná křivka stínů/neurčeného typu území vykazuje stejný průběh jako pyroklastická ložiska. Způsobeno to může být tím, že část oblasti, která je v obrázku 29 klasifikována jako stíny (červeně), je v obrázku 26 klasifikována jako pyroklastická ložiska (světle zelená). Řešením by mohlo být přidáním další (třetí třídy) pro pyroklastická ložiska, aby tyto třídy mohly být lépe rozlišeny.



Obrázek 30: Průměrná spektra za třídy (vlastní zpracování). Barvy odpovídají klasifikaci viz obrázek 29.

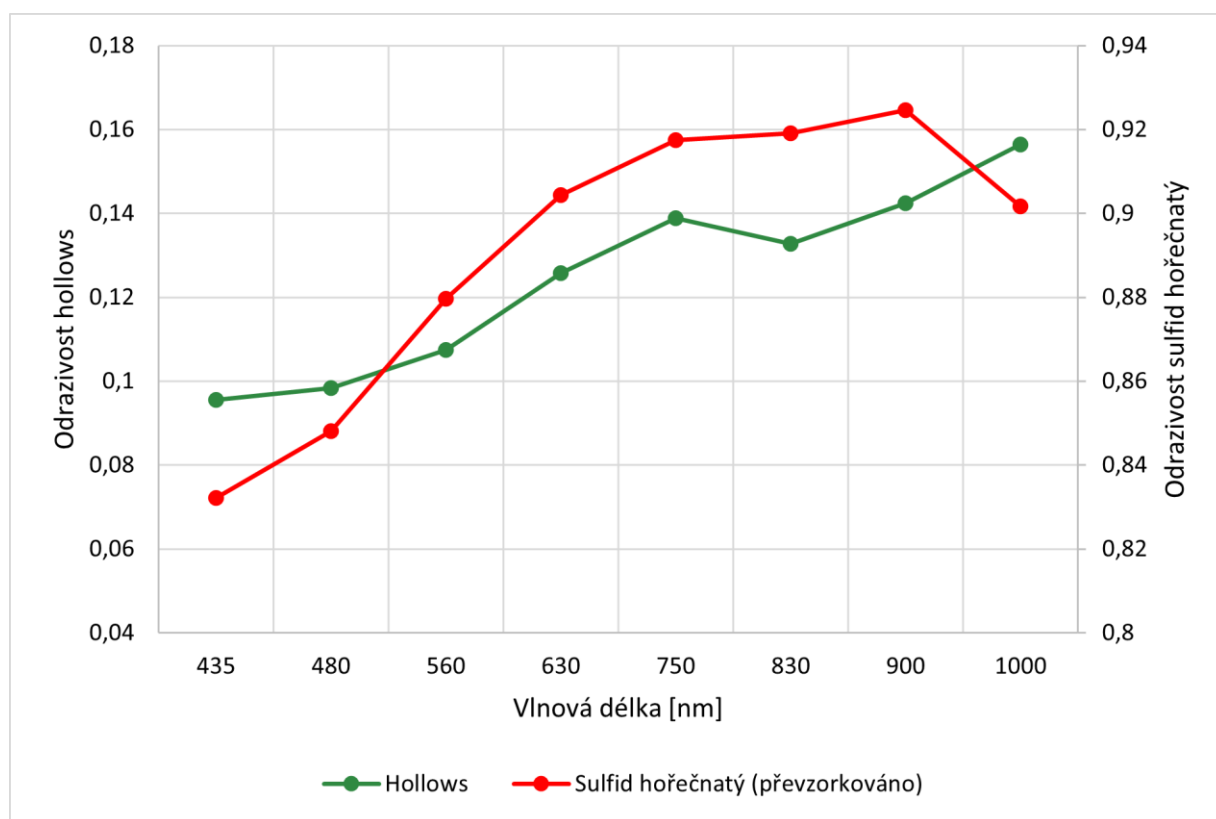


Obrázek 31: Normalizovaná spektra v hodnotě 558 nm (vlastní zpracování). Barvy odpovídají klasifikaci viz obrázek 29.

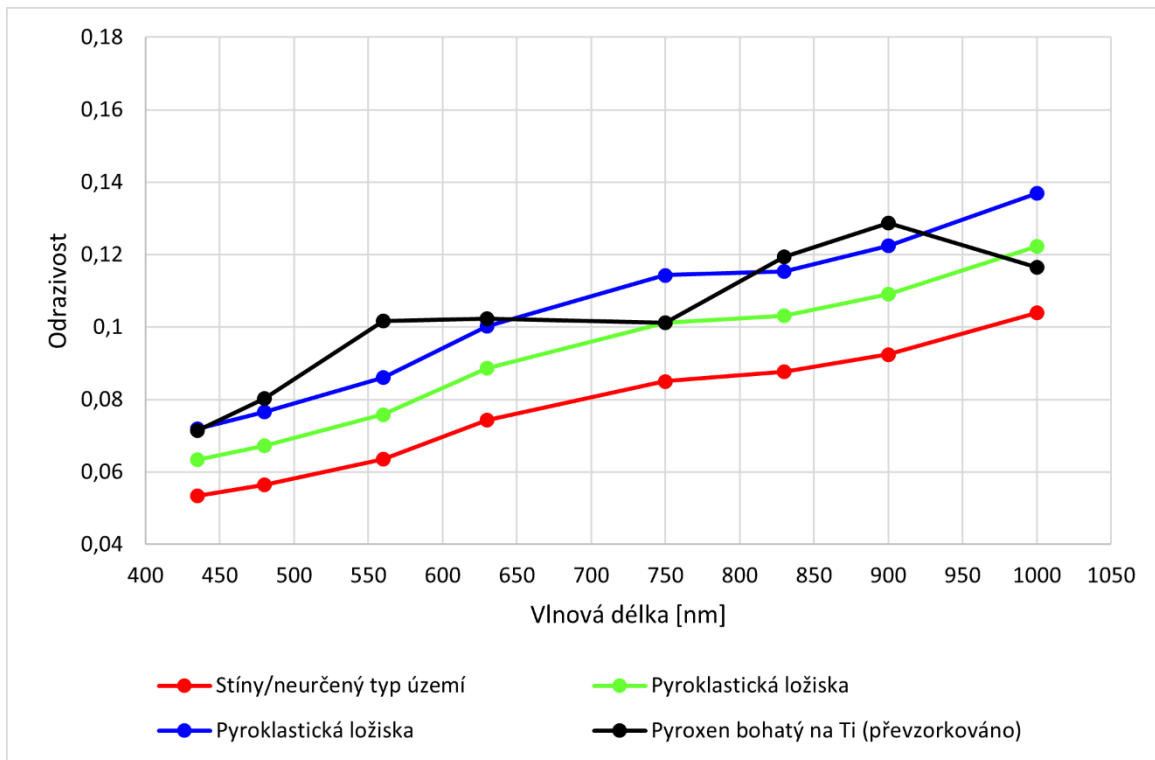
Obrázky 32 a 33 zobrazují převzorkované křivky koncových členů spolu s průměrnými křivkami z výsledné klasifikace. U spektrální křivky sulfidu hořečnatého je absorpční pásmo u hodnoty 1000 nm, u křivky *hollows* ale toto absorpční pásmo chybí. Pajola a kol. (2021) uvádějí, že *hollows* v jiných kráterech vykazují absorpční pásmo v 1000 nm, ale že u *hollows* v kráteru Lermontov chybí, absence tohoto absorpčního pásma může mít více faktorů – různá zrnitost minerálů a/nebo různé stáří *hollows*.

Obrázek 34 zobrazuje výsledný snímek po aplikování *Linear Spectral Unmixing* na originálních datech. Je využita žlutomodrá škála, kde žlutá barva reprezentuje pixely s výskytem pyroxenu bohatého na titan a modrá barva reprezentuje pixely s výskytem sulfidu hořečnatého. Po porovnání obrázku 32 s výsledkem klasifikace na obrázku 29, můžeme usoudit, že oblasti, kde se vyskytují *hollows*, obsahují větší podíl sulfidu a oblasti s výskytem pyroklastických ložisek obsahují větší podíl pyroxenu.

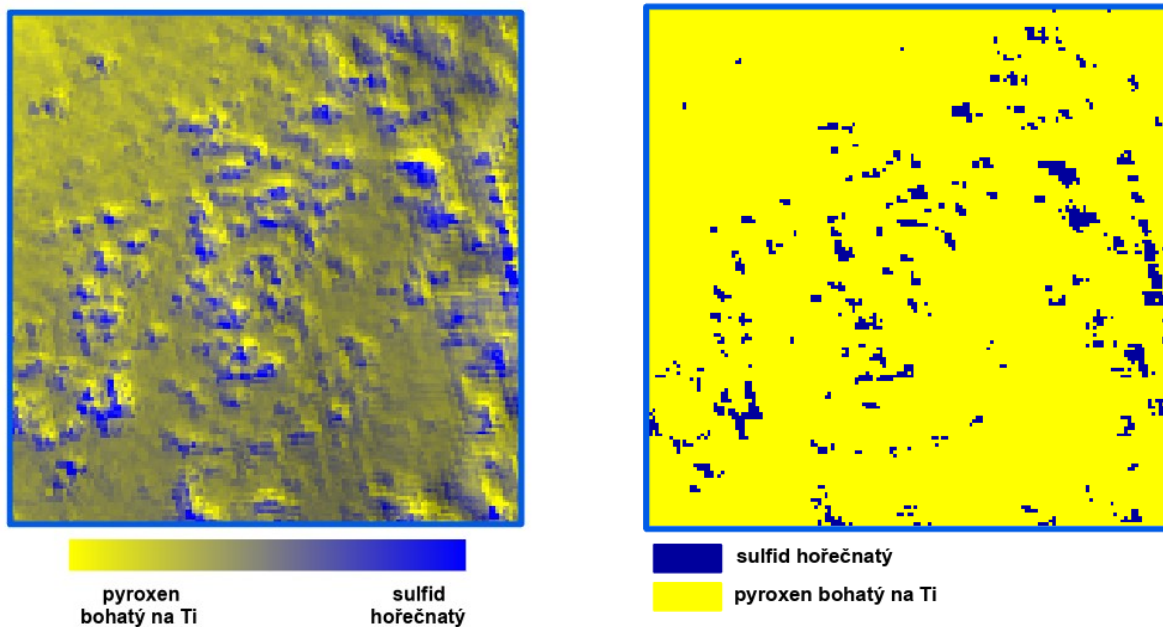
Obrázek 35 zobrazuje snímek po aplikování *Spectral Angle Mapper* s převzorkovanými spektrálními křivkami minerálů. Tmavě modrá barva odpovídá sulfidu hořečnatému, žlutá barva odpovídá pyroxenu. Na první pohled je zřejmé, že oblasti se sulfidem v *SAM* odpovídají sytě modrým oblastem v *LSU* (=sulfid).



Obrázek 32: Spektrální křivky *hollows* a sulfidu hořečnatého (vlastní zpracování).



Obrázek 33: Spektrální křivky pyroklastických ložisek, stínů a pyroxenu bohatého na titan (vlastní zpracování).



Obrázek 34: Vlevo výsledek LSU na území s hollows (1) (vlastní zpracování).

Obrázek 35: Vpravo výsledek SAM na území s hollows (1) (vlastní zpracování).

5 Diskuze

Cílem praktické části bakalářské práce bylo ukázat možnost zpracování obrazových dat pořízených sondou MESSENGER. Od jejich získání, přes předzpracování, spektrální analýzu a interpretaci. Na základě studií od Lucchetti a kol. (2021) a Pajola a kol. (2021) byl jako předmět zájmu zvoleno zkoumání prostorového rozložení dvou typů povrchu (*hollows* a pyroklastických ložisek) a jejich mineralogického složení.

Důležitým přínosem této práce je podrobný popis samotných dat a procesu předzpracování dat z kamery MDIS-WAC sondy MESSENGER. Předzpracování dat je součástí každé studie a je to zdlouhavý a náročný proces, který je nutný podstoupit. I když je předzpracování dat nutné, často bývá ve studiích jen vágně naznačeno či úplně opomenuto. V této práci je popsáno, jak pomocí specializovaného softwaru ISIS data radiometricky kalibrovat, geometricky upravit a jak pomocí Hapkeho modelu využít fotometrické korekce.

Výsledky této práce přinesly poznatky o spektrálních vlastnostech a mineralogii povrchu Merkuru, konkrétně o rozdílech mezi pyroklastickými ložisky a formacemi typu *hollows*. Spektrální analýza potvrdila existenci výrazných rozdílů mezi těmito dvěma typy povrchových útvarů. *Hollows* se vyznačují vyšší odrazivostí v celém analyzovaném spektrálním rozsahu (395–1040 nm) a přítomností absorpčního pásu kolem 830 nm, zatímco pyroklastická ložiska vykazují nižší odrazivost a méně výrazné absorpční projevy. Tento rozdíl je v souladu s výsledky dřívějších studií (Lucchetti a kol. 2021; Pajola a kol. 2021).

Metody spektrální analýzy, konkrétně Linear Spectral Unmixing (LSU) a Spectral Angle Mapper (SAM), byly úspěšně aplikovány a poskytly konzistentní výsledky. Identifikace sulfidu hořečnatého v oblasti *hollows* a pyroxenu bohatého na titan v oblasti pyroklastických ložisek je klíčovým výsledkem této práce. Tyto poznatky jsou v souladu s předchozími studiemi, zejména s pracemi Lucchetti a kol. (2018, 2021) a Pajola a kol. (2021), kteří identifikovali podobné spektrální charakteristiky u těchto útvarů v kráterech Tyagaraja, Lermontov, Dominici, Canova a Velazquez. Výsledky této práce také rozšiřují předchozí poznatky použitím kombinace klasifikace K-means, LSU a SAM na předzpracovaná data z kamery MDIS-WAC. Zatímco dřívější studie využívaly

hlavně klasifikaci K-means a ruční porovnání spekter s laboratorními daty, v této práci byla spektrální analýza rozšířena o metodu SAM a též bylo využito LSU.

Přítomnost sulfidů podporuje hypotézu o sublimaci těkavých látek jako hlavním mechanismu vzniku *hollows* (Blewett a kol. 2011), zatímco pyroxeny svědčí o vulkanickém původu pyroklastických ložisek (Weider a kol. 2016). Zjištěné rozdíly v mineralogickém složení mají širší důsledky pro pochopení geologického vývoje Merkuru. Přítomnost pyroklastických ložisek naznačuje, že Merkur měl v minulosti dostatek těkavých látek, které mohly pohánět explozivní erupce. Zároveň detekce sulfidů v oblasti *hollows* ukazuje, že těkavé látky přetrvávají v povrchových či podpovrchových vrstvách planety dodnes, což je překvapivé vzhledem k extrémním teplotním podmínkám panujícím na Merkur (Solomon a kol. 2018).

Nově publikovaná studie od Emran a Stack (2025) se liší od ostatních studií předmětem výzkumu a přístupem identifikace tříd, kdy jejich předmět výzkumu jsou pouze *hollows* a místo k-means klasifikace využívají strojového učení. Jako ostatní studie pak využívají lineárního spektrálního modelování s laboratorními spektry sulfidů, chloridů, grafitu a silikátových minerálů. Výsledky jejich práce říkají, že složení *hollows* závisí na jejich vývoji. Aktivní *hollows* vykazují spektrální znaky silikátových minerálů a sulfidu vápenatého, ustupující *hollows* naopak vykazují znaky grafitu, sulfidu hořečnatého a sulfidu vápenatého. Z uvedených výsledků lze usuzovat, že *hollows* zkoumané v této práci budou pravděpodobně ustupující.

Je třeba zmínit jistá omezení této práce. Jednou z limitací práce může být skutečnost, že spektrální analýza byla provedena pouze v jedné lokalitě. Ačkoliv výsledky naznačují obecné trendy, úplné pochopení odlišností v rámci jednotlivých *hollows* a pyroklastických ložisek by vyžadovalo rozsáhlejší analýzu ve více lokalitách. Dále, analýza byla provedena pouze na základě dat MDIS-WAC, která pokrývají omezený spektrální rozsah (395–1040 nm) a pracují pouze s osmi spektrálními filtry. To omezuje možnost detekce některých minerálů mimo tento spektrální rozsah. Koncové členy spektrální analýzy byly rovněž odvozeny z laboratorních podmínek odlišných od skutečných podmínek na Merkur, což může ovlivnit přesnost výsledků. Také pro snadnější interpretaci výsledků byly zvoleny pouze dva koncové členy. V budoucnu by

proto bylo vhodné využít data s vyšším spektrálním rozlišením, například ze spektrometru MASCS nebo z připravované mise BepiColombo, která nabídne širší spektrální pokrytí a vyšší prostorové rozlišení a zvolit více koncových členů pro přesnější interpretaci výsledků.

6 Závěr

Tato bakalářská práce si kladla za cíl využít spektrální data ze sondy MESSENGER k analýze povrchu Merkuru, konkrétně v oblasti kráteru Lermontov, a identifikovat dva klíčové typy geomorfologických útvarů – *hollows* a pyroklastická ložiska.

V teoretické části byly popsány minulé, současné i budoucí mise směřované k Merkuru. Detailně byla popsána mise MESSENGER, a byly představeny její přístroje, zejména pak kamera MDIS a spektrometr MASCS. Následně bylo detailně popsáno, jaké datové produkty existují a kde je získat. Byly také zmíněny studie, které se analýzou dat zabývají.

Praktická část práce byla zaměřena na zpracování a analýzu obrazových dat získaných kamerou MDIS-WAC. Pomocí softwaru ISIS bylo provedeno komplexní předzpracování surových dat včetně geometrických, radiometrických a fotometrických korekcí. Následně byla vytvořena 8-filtrová mozaika, která sloužila jako podklad pro spektrální analýzy v softwaru ENVI.

Pomocí metod klasifikace *K-means*, *LSU* a *SAM* bylo možné odlišit oblasti s výskytem pyroklastických ložisek a *hollows*, a zároveň identifikovat přítomnost minerálů, které tyto povrchy tvoří. Výsledky naznačují, že pyroklastická ložiska obsahují pyroxen bohatý na titan a *hollows* jsou tvořeny především sulfidem hořečnatým. Výsledky analýzy vybraného území potvrdily poznatky publikovaných studií.

Význam práce spočívá nejen v samotné identifikaci materiálového složení povrchu, ale i v metodologickém přístupu, který demonstruje důležitost korektního předzpracování dat a využití více analytických technik pro dosažení přesných výsledků. Práce zároveň ukazuje, že i data z mise MESSENGER, která skončila v roce 2015, mohou při vhodném zpracování stále přinášet další vědecké poznatky.

Do budoucna by bylo vhodné zaměřit se na analýzu dalších oblastí Merkuru, zejména v kombinaci s daty z mise BepiColombo, která by měla poskytnout ještě kvalitnější spektrální i prostorová data. Kombinace více senzorů a sofistikovaných metod zpracování dat umožní hlubší pochopení geologické historie této planety a jejího vývoje v rámci Sluneční soustavy.

Seznam použitých zdrojů:

Literatura

BALOGH, A., GIAMPIERI, G. (2002): *Mercury and its orbit. Reports on Progress in Physics*, 65(4), 31 s.

BALOGH, A., GRARD, R., SOLOMON, S.C., SCHULZ, R., LANGEVIN, Y., KASABA, Y., FUJIMOTO, M. (2007): *Missions to Mercury. Space Science Reviews*, 132, 34 s.

BECKER, K., BECKER, T., HARE, T. (2013): *MESSENGER MDIS: Data Users' Workshop 2013*.

BENKHOFF, J., MURAKAMI, G., BAUMJOHANN, W., BESSE, S., BUNCE, E., CASALE, M., CREMOSESE, G., GLASSMEIER, K.H., HAYAKAWA, H., HEYNER, D., HIESINGER, H., HUOVELIN, J., HUSSMANN, H., IAFOLLA, V., IESS, L., KASABA, Y., KOBAYASHI, M., MILILLO, A., MITROFANOV, I.G., MONTAGNON, E., NOVARA, M., ORSINI, S., QUEMERAIS, E., REININGHAUS, U., SAITO, Y., SANTOLI, F., STRAMACCIONI, D., SUTHERLAND, O., THOMAS, N., YOSHIKAWA, I., ZENDER, J. (2021): *BepiColombo – Mission Overview and Science Goals. Space Science Reviews*, 217, 56 s.

BLEWETT, D.T., CHABOT, N.L., DENEVI, B.W., ERNST, C.M., HEAD, J.W., IZENBERG, N.R., MURCHIE, S.L., SOLOMON, S.C., NITTLER, L.R., MCCOY, T.J., XIAO, Z., BAKER, D.M.H., FASSETT, C.I., BRADEN, S.E., OBERST, J., SCHOLTEN, F., PREUSKER, F., HURWITZ, D.M. (2011): *Hollows on Mercury: MESSENGER Evidence for Geologically Recent Volatile-Related Activity. Science*, 333, 4 s.

DUNNE, J.A., BURGESS, E. (1978): *The Voyage of Mariner 10: Mission to Venus and Mercury. U. S. Government Printing Office, Washington*.

EMRAN, A., STACK, K.M. (2025): *Understanding compositional evolution of hollows at Dominici crater, Mercury. Icarus*, 425, 18 s.

ESPIRITU, R., MALARET, E. (2015): *Experiment Data Record Software Interface Specification for the MESSENGER Mercury Atmospheric and Surface Composition Spectrometer/Visible and Infrared Spectrograph (MASCS/VIRS)*.

GALLUZZI, V. (2015): *Structural analysis of the Victoria quadrangle (H2) of Mercury based on NASA MESSENGER data.*

GIACOMINI, L., GALLUZZI, V., MASSIRONI, M., FERRANTI, L., PALUMBO, P. (2022): *Geology of the Kuiper quadrangle (H06), Mercury. Journal of Maps, 18(2), 13 s.*

HASH, CH., ESPIRITU, R., MALARET, E., PROCKTER, E., MURCHIE, S., MICK, A., WARD, J. (2015): *MESSENGER: Mercury Dual Imaging System (MDIS) Experiment Data Record (EDR) Software Interface Specification (SIS).*

HAWKINS, S.E., BOLDT, J.D., DARLINGTON, E.H., ESPIRITU, R., GOLD, R.E., GOTWOLS, B., GREY, M.P., HASH, CH.D., HAYES, J.R., JASKULEK, S.E., KARDIAN, CG.J., KELLER, M.R., MALARET, E.R., MURCHIE, S.L., MURPHY, P.K., PEACOCK, K., PROCKTER, L.M., REITER, R.A., ROBINSON, M.S., SCHAEFER, E.D., SHELTON, R.G., STERNER, R.E., TAYLOR, H.W., WATTERS, T.R., WILLIAMS, B.D. (2007): *The Mercury Dual Imaging System on the MESSENGER Spacecraft. Space Science Reviews, 131, 92 s.*

IZENBERG, N., WARD, J. (2017): *MESSENGER MASCS VIRS Calibrated Data Record, Derived Data Record, and Derived Analysis Product Software Interface Specification.*

JET PROPULSION LABORATORY (2024): *Planetary Data System Standards Reference. California Institute of Technology, Pasadena.*

JOHNSON, L. (2023): *Solar Sail for Planetary Missions.*

LUCCHETTI, A., PAJOLA, M., GALLUZZI, V., GIACOMINI, L., CARLI, C., CREMONESE, G., MARZO, G.A., FERRARI, S., MASSIRONI, M., PALUMBO, P. (2018): *Mercury Hollows as Remnants of Original Bedrock Materials and Devolatilization Processes: A Spectral Clustering and Geomorphological Analysis. Journal of Geophysical Research: Planets, 123, 15 s.*

LUCCHETTI, A., PAJOLA, M., POGGIALI, G., SEMENZATO, A., MUNARETTO, G., CREMONESE, G., BRUCATO, J.R., MASSIRONI, M. (2021): *Volatiles on Mercury: The case of hollows and the pyroclastic vent of Tyagaraja crater. Icarus, 370, 16 s.*

MAN, B., ROTHERY, D.A., BALME, M.R., CONWAY, S.J., WRIGHT J. (2023): *Widespread small grabens consistent with recent tectonism on Mercury. Nature Geoscience, 16, 7 s.*

MCCLINTOCK, W.E., LANKTON M.R. (2007): *The Mercury Atmospheric and Surface Composition Spectrometer for the MESSENGER Mission. Space Science Reviews, 131, 41 s.*

MCNUTT, R.L., SOLOMON, S.C., GOLD, R.E., LEARY, J.C., THE MESSENGER TEAM (2006): *The MESSENGER mission to Mercury: Development history and early mission status. Advances in Space Research, 38(4), 7 s.*

MURCHIE, S., MICK, A., PROCKTER, L., RIVKIN, A., GUINNESS, E., WARD, J. (2017): *MESSENGER: MDIS CDR/RDR SOFTWARE INTERFACE SPECIFICATION.*

NASA (2020): *Mercury Lander: Transformative science from the surface of the innermost planet.*

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE (2023): *Origins, Worlds, and Life: A Decadal Strategy for Planetary Science and Astrobiology 2023–2032. The National Academies Press, Washington.*

NGOC, N.B., BOTT, N., DIEP, P.N. (2020): *Spectral properties of the surface reflectance of the northern polar region of Mercury. Research in Astronomy and Astrophysics, 20(3), 16 s.*

NIEBUR, S.M., BROWN, D.W. (2023): *NASA's Discovery Program: the first twenty years of competitive planetary exploration. NASA History Division, Washington.*

PAJOLA, M., LUCCHETTI, A., SEMENZATO, A., POGGIALI, G., MUNARETTO, G., GALLUZZI, V., MARZO, G.A., CREMONESE, G., BRUCATO, J.R., PALUMBO, P., MASSIRONI, M. (2021): *Lermontov crater on Mercury: Geology, morphology and spectral properties of the coexisting hollows and pyroclastic deposits. Planetary and Space Science, 195, 17 s.*

PARMAN, S.W., MUSTARD, J.F., PIETERS, C.M., KREMER, C.H., GREEN, R.O., BRAMBLE, M.S., JOHNSON, L. (2024): *MERCURY SCOUT: A SOLAR SAIL MISSION TO THE INNERMOST PLANET.*

PARMAN, S.W., FISCHER, E., MUSTARD, J.F., PIETERS, C.M., KREMER, C.H., BENDER, H., GREEN, R.O., BRAMBLE, M.S., JOHNSON, L., THOMAS, H., BAYSINGER, M., PUNO, A., ERNST, C., GREENHAGEN, B., DONALDSON HANNA, K., CAPIZZO, P., DIEDRICH, B., FABISINSKI, L., GARCIA, J., IBEKWE, M., LE ROY, S.,

MULQUEEN, J., THOMPSON, S. (2025): *Concept study of solar sail orbital mission to Mercury: Mercury Scout.*

SHIRLEY, D.L. (2003): *THE MARINER 10 MISSION TO VENUS AND MERCURY. Acta Astronautica, 53, 10 s.*

SHKURATOV, Y., KAYDASH, V., KOROKHIN, V., VELIKODSKY, Y., PETROV, D., ZUBKO, E., STANKEVICH, D., VIDEEN, G. (2012): *A critical assessment of the Hapke photometric model. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 113, 25 s.*

SOLOMON, S.C., MCNUTT, R.L., GOLD, R.E., DOMINGUE, D.L. (2007): *MESSENGER Mission Overview. Space Science Reviews, 131, 36 s.*

SOLOMON, S.C., NITTLER, L.R., ANDERSON, B.J. (2018): *Mercury: The View after MESSENGER. Cambridge University Press, Cambridge.*

VAN DER MEER, F.D., VAN DER WERFF, H.M.A., VAN RUITENBEEK, F.J.A., HECKER, C.A., BAKKER, W.H., NOOMEN, M.F., VAN DER MEIJDE, M., CARRANZA, E.J.M., BOUDEWIJN DE SMETH, J., WOLDAI, T. (2012): *Multi – and hyperspectral geologic remote sensing: A review. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 14, 17 s.*

WEIDER, S.Z., NITTLER, L.R., MURCHIE, S.L., PEPOWSKI, P.N., MCCOY, T.J., KERBER, L., KLIMCZAK, C., ERNST, C.M., GOUDGE, T.A., STARR, R.D. (2016): *Evidence from MESSENGER for sulfur – and carbon-driven explosive volcanism on Mercury. Geophysical Research Letters, 43, 9 s.*

Internetové zdroje

ESA (2025): BepiColombo: Investigating Mercury's mysteries.

https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/BepiColombo (3.3.2025).

JHUAPL (2025): SPACECRAFT AND INSTRUMENTS.

<https://messenger.jhuapl.edu/About/Spacecraft-and-Instruments.html#instruments>

(18.3.2025).

NASA/JHUAPL (2012): The Elusive Planet: Ancient Cultures.
https://web.archive.org/web/20120723001225/http://www.messenger-education.org/elusive_planet/ancient_cultures_2.php (20.3.2025).

NASA PDS (2025): Mercury Orbital Data Explorer.
<https://ode.rsl.wustl.edu/mercury/index.aspx> (28.3.2025).

NASA RELAB (2025): NASA REFLECTANCE EXPERIMENT LABORATORY.
<https://sites.brown.edu/relab/> (28.4.2025).

NSSDCA (2025a): Mercury Dual Imaging System (MDIS).
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experiment/display.action?id=2004-030A-01> (19.3.2025).

NSSDCA (2025b): MESSENGER.
<https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=2004-030A> (17.3.2025).

ODE (2025a): MESSENGER MDIS Wide-angle Experiment Data Records (EDRWAC).
https://ode.rsl.wustl.edu/mercury/pagehelp/Content/Missions_Instruments/MESSENGER/MDIS/MDIS-WAC/EDRWAC.htm (21.3.2025)

ODE (2025b): PDS3 and PDS4 Data Standards.
https://ode.rsl.wustl.edu/moon/pagehelp/Content/Introduction/Data_Standards.htm (28.3.2025).

ODE (2025c): MESSENGER MDIS Map-projected Multispectral Reduced Data Records (RDRMDR).
https://ode.rsl.wustl.edu/mercury/pagehelp/Content/Missions_Instruments/MESSENGER/MDIS/MDIS-WAC/RDRMDR.htm (30.3.2025).

ODE (2025d): MESSENGER MDIS Wide-angle Map-projected Multispectral Data Record (MDRWAC).
https://ode.rsl.wustl.edu/mercury/pagehelp/Content/Missions_Instruments/MESSENGER/MDIS/MDIS-WAC/MDRWAC.htm (30.3.2025).

ODE (2025e): MESSENGER MDIS Wide-angle Map-projected 5-Color Multispectral RDR (MAPMP5).
https://ode.rsl.wustl.edu/mercury/pagehelp/Content/Missions_Instruments/MESSENGER/MDIS/MDIS-WAC/MAPMP5.htm (30.3.2025).

ODE (2025f): Mercury Orbital Data Explorer: Download Setup.
<https://ode.rsl.wustl.edu/mercury/download> (2.4.2025).

PDS (2025): MESSENGER: MERCURY DUAL IMAGING SYSTEM NARROW ANGLE CAMERA.
https://pdsppi.igpp.ucla.edu/mission/MESSENGER/MERCURY_DUAL_IMAGING_SYSTEM_NARROW_ANGLE_CAMERA (19.3.2025).

PDS Geosciences Node (2025a): Help for Data Users.

<https://pds-geosciences.wustl.edu/dataserv/userhelp.html> (28.3.2025).

PDS Geosciences Node (2025b): MESSENGER.

<https://pds-geosciences.wustl.edu/missions/messenger/index.htm> (1.4.2025).

PDS Geosciences Node (2025c): Spectral Library: Specimen ID: PP-EAC-061. https://pds-speclib.rsl.wustl.edu/measurement.aspx?lid=urn:nasa:pds:relab:data_reflectance:c1pp61 (18.4.2025).

PDS Geosciences Node (2025d): Spectral Library: Specimen ID: JT-JFM-162. https://pds-speclib.rsl.wustl.edu/measurement.aspx?lid=urn:nasa:pds:relab:data_reflectance:c1jt162 (18.4.2025).

USGS/NASA PDS (2025): PILOT. <https://pilot.wr.usgs.gov/#constrainTab> (22.3.2025).

USGS (1979): MARINER 10 MERCURY Shaded Relief Map.

<https://ser.sese.asu.edu/M10/shaded.html> (7.3.2025).

USGS (2025a): ISIS. <https://isis.astrogeology.usgs.gov/8.2.0/> (18.4.2025).

USGS (2025b): Introduction to ISIS. <https://astrogeology.usgs.gov/docs/getting-started/using-isis-first-steps/introduction-to-isis/> (18.4.2025).

USGS (2025c): MDIS2ISIS. <https://isis.astrogeology.usgs.gov/8.3.0/Application/presentation/Tabbed/mdis2isis/mdis2isis.html> (18.4.2025).

USGS (2025d): SPICEINIT. <https://isis.astrogeology.usgs.gov/8.3.0/Application/presentation/Tabbed/spiceinit/spiceinit.html> (18.4.2025).

USGS (2025e): MDISCAL. <https://isis.astrogeology.usgs.gov/8.3.0/Application/presentation/Tabbed/mdiscal/mdiscal.html> (18.4.2025).

USGS (2025f): CAM2MAP. <https://isis.astrogeology.usgs.gov/8.3.0/Application/presentation/Tabbed/cam2map/cam2map.html> (18.4.2025).

USGS (2025g): PHOTOMET. <https://isis.astrogeology.usgs.gov/8.3.0/Application/presentation/Tabbed/photomet/photomet.html> (18.4.2025).

Použité datové produkty:

Datové produkty PDS4 využité v této práci jako součást [10.17189/a666-n296](https://doi.org/10.17189/a666-n296) obsahují:

urn:nasa:pds:messenger_mdiss_8001 (konkrétně soubory .IMG: ew1053139916c, ew1053139920d, ew1053139924e, ew1053139912f, ew1053139928g, ew1053139908i, ew1053139932j, ew1053139936l).

Přílohy

Příloha 1: Parametry využití ve funkci *photomet*.

Vlnová délka [nm]	Písmeno filtru	1000	900	830	750	630	560	480	435
Théta	I	18,4168 6847	18,0719 1127	17,9622 4797	17,7666 2946	15,7889 2162	15,7889 2162	13,8278 0392	12,0777 5431
Wh	J	0,35324 478	0,32654 443	0,30404 7732	0,27808 0114	0,21598 4749	0,21598 4749	0,18221 2955	0,15371 3769
Hg1	L	0,27653 8744	0,26168 0383	0,24588 6415	0,22777 4899	0,20664 9235	0,20664 9235	0,21253 3357	0,22131 3433
Hg2	G	0,61370 0193	0,65014 6228	0,67865 7724	0,71420 3968	0,81141 7942	0,81141 7942	0,85693 4992	0,88763 3784
hh	E	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
B0	D	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3

Parametry *normame*, *in cref*, *thresh* a *albedo* jsou u všech filtrů totožné a to: *normame*=*albedo*, *in cref*=30.0, *thresh*=10e30, *albedo*=1.0.