

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

Studijní program: Geologie  
Studijní obor: Hospodaření s přírodními zdroji



**Radek Novotný**

Sypané kužele na Měsíci: jejich morfologie, rozmístění a mechanismus jejich vzniku

Scoria cones on the Moon: morphologies, distribution, and mechanism of their formation

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Petr Brož, Ph.D.

Praha 2019

**Poděkování:**

Děkuji svému školiteli Mgr. Petru Brožovi, Ph.D. za trpělivost, ochotu a odborné vedení bakalářské práce. Velmi si vážím příležitosti studovat planetární geologii v České republice. Poděkování patří i mé rodině za trpělivost, kterou se mnou měli během studia a psaní závěrečné práce.

**Prohlášení:**

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

V Praze,

Podpis

## OBSAH

Abstrakt.....	iii
Summary.....	iv
Klíčová slova.....	v
Key words.....	v
1. Úvod.....	1
2.Charakteristika sypaného kužele.....	3
2.1 Tvary sypaných kuželů.....	3
2.2 Mechanismus vzniku sypaných kuželů.....	4
2.3 Co ovlivňuje tvary sypaných kuželů.....	5
2.4 Výskyt sypaných kuželů.....	7
2.4.1 Lokality na Zemi.....	7
2.4.2 Lokality na Marsu.....	8
3. Lokality výskytu sypaných kuželů na Měsíci.....	9
3.1 Lokalita Marius Hills.....	9
3.2 Sopečné pole Antoniadi v lokalitě South Pole-Aitken.....	11
3.3 Ostatní lokality.....	13
3.3.1 Sopečný komplex Compton–Belkovich.....	13
3.3.2 Lokalita impaktního kráteru Lassel.....	14
3.3.3 Lokality Milichius, Aristarchus, Isis a Osiris.....	14
3.3.4 Lokality Oppenheimer, Hortensius-Tobias Meyer, Rimae Parry a Euler.....	14
4. Morfologické typy měsíčních sypaných kuželů.....	15
4.1Morfologický typ C.....	15
4.2 Morfologický typ N.....	16
4.3Morfologický typ E.....	16
4.4Morfologický typ U.....	16
5. Diskuze: Pozorujeme na Měsíci sypané kužele ?.....	17
5.1 Jsou měsíční útvary sypanými kužely ?.....	17
5.2 Vliv prostředí na rozptyl vyvržených částic.....	19
5.3 Pyroklastické deposity na Měsíci.....	20
6. Závěr.....	23
7. Použitá literatura.....	24
Příloha - Topografická mapa Měsíce s vyznačenými kužely	

## ABSTRAKT

Pozorování Měsíce moderními přístroji dokládají, že na povrchu dříve probíhala dlouhodobá sopečná činnost zanechávající za sebou řadu povrchových útvarů, ať už v podobě měsíčních moří pokrývajících tisíce kilometrů široké impaktní pánve či v podobě malých sopečných těles různých tvarů. Jedním z nich jsou i relativně malá, až 170 metrů vysoká kuželovitá tělesa vyskytující se na přivrácené i odvrácené straně Měsíce. Na základě výzkumu lokalit Marius Hills a South Pole-Aitken bylo navrženo, že by se mohlo jednat o měsíční obdobu pozemských sypaných kuželů. Tedy těles vznikající odplyněním a fragmentací magmatu s následným ukládáním pyroklastického materiálu do okolí. Tato tvarová podobnost měsíčních kuželů s pozemskými sypanými kužely je překvapivá, jelikož na povrchu Měsíce je menší gravitační zrychlení a chybí zde atmosféra. To by mělo způsobit, že částice doletí dále a to mělo by to ovlivnit i vzhled výsledných sopečných těles. Cílem této práce je rešerše dostupné literatury pojednávajících o měsíčních sypaných kuželech ve snaze zmapovat jak časté je jejich rozšíření na povrchu Měsíce, určit jejich základní tvary a vysvětlit případné rozdíly či shody v jejich tvarech s pozemskými sypanými kužely. Na základě provedené rešerše jsem zmapoval dosud známá měsíční sopečná pole s výskytem kuželů, i samostatná kuželovitá tělesa, o kterých převládá názor, že byla vytvořena sopečnou činností. Popsal jsem jejich tvary, velikostní parametry a sklony svahů, a při jejich srovnání s pozemskými a marsovskými ekvivalenty vyšlo najevo, že se v mnoha ohledech liší. Pravděpodobně to bude důsledek absence atmosféry a nižší gravitace, jenž na Měsíci působí. To má také za následek, že se na Měsíci častěji vyskytují tenké uloženy pyroklastického materiálu na úkor kuželovitých těles.

## **SUMMARY**

The recent observations of the Moon show, that there was long-lasting volcanic activity on the lunar surface, that left many volcanic features behind. These features are in the form of lunar seas, which are covering thousands of kilometers wide impact basins, or small volcanic bodies of various shapes. Some of these bodies are relatively small, up to 170 meters high conical bodies occurring on the near side and far side of the Moon. Based on research about the Marius Hills and South Pole-Aitken locations, it was suggested, that these bodies could be a lunar equivalent of terrestrial cinder cones. Cinder cones are created by degassing and fragmentation of magma with subsequent deposition of pyroclastic material into the surroundings. This shape similarity of the lunar cones to the terrestrial cones is surprising, as there is less gravitational acceleration on the Moon's surface and the atmosphere is missing. This means, that particles are able to flow further, and this should also affect the appearance of the volcanic bodies. The aim of this work is to review available literature mentioning lunar cones, to map their frequencies on the surface of the Moon, to determine their basic shapes and explain possible differences or concordances in their shapes with terrestrial cinder cones. On the basis of the research I have mapped known lunar volcanic fields with the cones, and individual conical bodies, which are believed to have been created by volcanic activity. I have described their shapes, size parameters, and tendencies of their slopes. When compared to terrestrial and Mars equivalents, it has been shown, that they are different in many ways. This is probably consequence of the atmosphere absence and the lower gravity on the Moon. This also results in thin deposits of pyroclastic material, which occurs more frequently on the Moon at the expense of conical bodies.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

sypaný kužel, Měsíc, vulkanismus, pyroklastické uloženiny, gravitace, atmosféra

## **KEY WORDS**

scoria cone, the Moon, volcanism, pyroclastic deposits, gravitation, atmosphere

## 1. ÚVOD

Měsíc je přirozeným satelitem planety Země, který se od ní nachází ve vzdálenosti 384,403 km. Se svým poloměrem 1,738 km se jedná o pátý největší měsíc ve Sluneční soustavě. Člověkem je pozorován již několik staletí, kdy k prvotnímu zkoumání sloužily pouze dalekohledy a teleskopy (Cole a Woolfson, 2013, str. 95). V druhé polovině 20. stol. již byly k Měsíci vysílány první sondy, přičemž první sondou která roku 1959 provedla úspěšné přistání na povrchu Měsíce byla Luna 2, které se zároveň podařilo zaslat na Zemi i snímky povrchu Měsíce. Za největší úspěch lze ovšem považovat moment, kdy byl vesmírným letem Apollo 11 v roce 1969 Měsíc poprvé navštíven lidskou posádkou.

V dnešní době probíhá výzkum těles Sluneční soustavy mimo planetu Zemi ve většině případů dálkovým průzkumem. Daty mohou být v malé míře i vzorky z povrchu, popřípadě pozorování ze Země, ovšem ve většině případů se jedná o snímky ve vysokém rozlišení, pořízené z oběžné dráhy pozorovaného tělesa družicí. Pro chemickou analýzu povrchu se používají spektrometry, které využívají elektromagnetické záření dané fáze. K snímkování povrchu se pak používají kamery s úzkým nebo širokým záběrem s rozlišením 0,5 až 2 m na pixel, popřípadě 100 m na pixel (Lawrence a kol., 2013). V případě Měsíce se ke studiu povrchu například používá sonda Lunar Reconnaissance Orbiter amerického Národního úřadu pro letectví a kosmonautiku.

Dnes díky tomu víme, že je Měsíc tvořen dvěma rozdílnými typy povrchu odlišující se od sebe vzhledem i chemickým složením. Světlé oblasti, které pokrývají většinu povrchu Měsíce, se nazývají vysočiny (*highlands*), které pokrývají většinu povrchu Měsíce. Jsou složeny převážně z anortozitu, světlou horninou bohatou na živce. Část přivrácené strany a část odvrácené strany Měsíce je pak pokryta tmavými měsíčními moři (*lunar mare*), což jsou oblasti bývalých impaktních kráterů zalitých bazaltovou lávou pocházející z měsíčního pláště (McSween a Huss, 2010, str. 446). Nejsvrchnější vrstva Měsíce je tvořena regolitem, což je měsíční půdní pokryv skládající se z prachu a ostrohranných úlomků hornin (Cole a Woolfson, 2013, str. 105).

Podle nejaktuálnějších teorií vznikl Měsíc jako satelit planety Země zhruba před 4,6 miliardami let. Obecně uznávaná teorie velkého impaktu pracuje s procesem, kdy do nově vznikající planety Země narazila menší planeta, a vymrštila velké množství materiálu na oběžnou dráhu (Hartmann a Davis, 1974). Z tohoto materiálu, který je geochemicky velmi podobný jako materiál na Zemi, se poté procesem postupného připojování částic zformoval prvotní Měsíc. Tento proces se nazývá akrece. Povrch Měsíce byl následně dále dotvářen sopečnou činností v období od 3,9 do 3,1 mld. let, ovšem existují důkazy o měsíčním vulkanismu z období mladší než 100 mil. let (Braden a kol., 2014).

Nicméně na povrchu Měsíce existuje celá řada dokladů o jeho pestré sopečné minulosti (např. Sruthi a Kumar, 2014; Ashley a kol., 2016; Gustafson a kol., 2012). Ať už se jedná o doklady výlevného vulkanismu v podobě lávových proudů tvořených tholeitickými bazalty (McSween a Huss, 2010, str. 472), nebo o sopečné dómy, tak i o pyroklastické uložení, měsíční skla či sopečné kužely dokládající přítomnost explozivního vulkanismu (Gustafson a kol., 2012).

Na Zemi je explozivní vulkanismus většinou výsledkem odplyňování magmatu, které vede k fragmentaci magmatu, a následné erupci. Na Zemi jsou nejčastějším druhem sopky vzniklé explozivním vulkanismem sypané kužele, až 400 m vysoká tělesa tvořená převážně struskou vyvrhovanou během sopečné erupce z centrálního kráteru do okolí (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 691). Zatímco jsou na Zemi sypané kužele velmi častá sopečného tělesa, výzkum těles ve Sluneční soustavě (konkrétně Marsu a Merkuru; např. Brož a Hauber, 2012; Brož a kol., 2018), odhaluje, že na jiných tělesech tomu tak není. V případě Měsíce nebyla doposud dokázána existence těchto sopečných útvarů na rozdíl od Země, kde jsou velmi hojné, či Marsu, kde byly popsány v několika lokalitách. Cílem této práce je proto prozkoumat současný stav vědeckého poznání a vypracovat rešerši o přítomnosti sypaných kuželů na povrchu Měsíce. Na základě těchto informací následně porovnat měsíční sypané kužele s pozemskými a marsovskými ekvivalenty, a určit do jaké míry se shodují, popřípadě jak se od sebe kužele liší díky rozdílným podmínkám prostředí panující na Měsíci.

## 2. CHARAKTERISTIKA SYPANÉHO KUŽELE

Sypaný kužel je druh sopky pozorovaný na Zemi (Kereszturi a Németh, 2013) i na jiných tělesech Sluneční soustavy, konkrétně na Marsu (např. Lanz a kol., 2010; Brož a Hauber, 2012; Brož a kol., 2015) a pravděpodobně na Měsíci (Lawrence a kol., 2013; Sruthi a Kumar, 2014). Ke vzniku sypaného kužele zpravidla dochází během jedné vulkanické epizody za relativně krátké časové období, typicky v řádu dní až měsíců (Kereszturi a Németh, 2013). Řadí se proto mezi monogenetické sopky. Na Zemi se jedná o velice rozšířený druh sopečných těles vázaných na kterékoliv tektonické prostředí, včetně subdukčních a riftových zón (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 689). Sypané kužele se na Zemi typicky nacházejí ve formě sopečných polí tvořených desítkami až stovkami těles (např. Las Pilas nebo Pinacate Peaks), mohou se vyskytovat jako samostatná tělesa (např. Paricutín), nebo na svazích větších sopek v podobě parazitických sopek (např. svahy sicilské Etny). Tvarem základny se mohou podobat kruhu, podkově (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 684), či základna může být protažená do šířky. Stěny svahů sypaných kuželů tvoří různé velké úlomky sopečného materiálu, tzv. strusky, které vznikají během fragmentace magmatu v důsledku expanze sopečných plynů obsažených ve vystupující tavenině (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 685).

### 2.1 Tvary sypaných kuželů

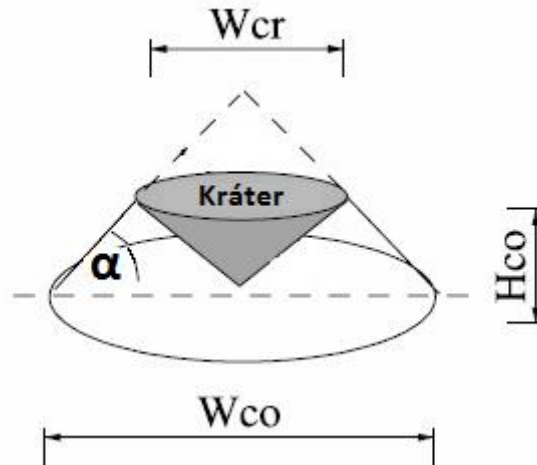
Sypaný kužel, je kuželovité těleso, které má na vrcholku kráter. V případě mladých těles jsou svahy kužele, které jsou tvořeny struskou, relativně strmé, svažítost se pohybuje zpravidla kolem  $30^\circ$  (Riedel a kol., 2003). Se stářím kuželů svažítost klesá, a jak si struska postupně sesedá je i kužel erodován. Výsledné tvary sypaných kuželů ovlivňuje řada faktorů, jako například množství vyvrženého materiálu, tvar a rozpraskanost podloží nebo doba, která od vzniku kužele uběhla (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 684). Velkou roli hraje i počasí dané oblasti, kdy mohou mít exogenní síly podíl na ukládání vyvrhovaného materiálu i následnou erozi kužele (klimatické změny; Dohrenwend a kol., 1986), což může ve výsledku významně pozměnit tvar vzniklého tělesa. Tyto faktory způsobují, že sypané kužele mají různý průměr základny, která může být až 2 km široká. Současně se mění i výška, kdy největší z pozemských kuželů jsou vysoké až 400 m.

Sypané kužele jsou většinou kuželovitého tvaru s kruhovým průřezem základny, ale existují i kužele s protaženým tvarem nebo nesymetricky tvarovaným kuželem. Protažené kužele vznikají zpravidla v oblastech s rozpraskanou kůrou, kde je řada puklin nebo zlomů. To je dáno tím, že přírodní dráha, po které magma stoupá k povrchu, je v místech těchto puklin, takže se materiál nedostává na povrch z bodového zdroje, ale ze zdroje protaženého. Tvar kužele pak toto protažení kopíruje. Také existují sypané kužele tvaru podkovy, které vznikají při naplnění kráteru lávou a následném protržení stěny svahu. Kužele mohou být i asymetrické, kdy byly v minulosti např. erodovány, nebo vznikly na nestabilním podloží (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 684).

## 2.2 Mechanismus vzniku sypaných kuželů

Sypané kužele vznikají během sopečné erupce havajského nebo strombolského typu (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 684). Magma, které stoupá vzhůru přírodní dráhou, obsahuje rozpuštěné sopečné plyny (Head a Wilson, 2017). Ty se s poklesem litostatického tlaku uvolňují z magmatu, což dává vzniku malých bublinek, které se během výstupu k povrchu vzájemně spojují. S dalším poklesem tlaku následně dochází k jejich expanzi. U pozemského magmatu jsou z plynů nejvíce zastoupeny  $H_2O$  a  $CO_2$  (Kereszturi a Németh, 2013), ale v magmatu se nachází i další plyny. Když se poměr plynu vůči magmatu přiblíží ke kritickému nasycení okolo 70-80%, dochází k jeho fragmentaci (Wilson a Head, 1981; Sparks 1978). Ta má za následek roztrhání magmatu a částečně i okolních hornin, čímž dochází k sopečné erupci vyvrhující materiál na povrch (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 685). Havajský typ erupce se od strombolského typu liší v tom, že havajský typ je chudší na rozpuštěné plyny a tak se bublinky plynu obsažené v magmatu nekumulují. Sopečné erupce proto nejsou příliš silné a projevují se ve formě lávových fontán či výlevů lávy. Naproti tomu strombolský typ erupce je charakteristický větším obsahem rozpuštěných plynů a tak dochází k periodickým erupcím, kdy je plyn schopen nárazově vyvrhovat kusy magmatu (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 685).

Částice, které opouštějí kráter sopky, vylétávají v pozemských podmínkách po balistických křivkách a následně se usazují v blízkém okolí. Úhel, pod kterým tyto částice vylétávají, může být velmi proměnlivý a závisí na hloubce fragmentace magmatu (Wilson a Head, 1981). Hloubka fragmentace přitom není všude stejná, ale je závislá na litostatickém i atmosférickém tlaku (Head a Wilson, 2017). Aby tyto částice zformovaly sypaný kužel, je potřeba, aby úhel vylétávání byl  $75^\circ - 90^\circ$  (McGetchin a kol., 1974), přičemž v případě širších výletových úhlů by bylo zapotřebí mnohem více materiálu, aby výsledné těleso mělo tvar kužele. Nejprve se tvoří prvotní okraj okolo kráteru, který ovšem dorůstá až do maximálního úhlu soudržnosti svahu, který je v případě pyroklastického materiálu  $31^\circ - 38^\circ$  (McGetchin a kol., 1974). Pro sypký materiál existuje fyzikální veličina s názvem sypný úhel (viz obr. 1), která představuje největší úhel, který může svírat vodorovná rovina s povrchovou přímkou kužele (Mehta a Barker, 1994). Po překročení tohoto úhlu dochází k lavinovému efektu, kdy se část materiálu přesune do nižších poloh (Riedel a kol., 2003; Brož a kol., 2014), vlivem čehož dochází ke zvětšování průměru základny kužele a snižování jeho výšky. Sesouváním se zvětšuje základna sypaného kužele tak dlouho, dokud je na povrch vyvrhován nový materiál.



Obrázek 1: Nákres kuželovitého tělesa vzniklého ze sypkého materiálu. Synpný úhel je znázorněn úhlem  $\alpha$  (převzato a upraveno z Riedel a kol., 2003).

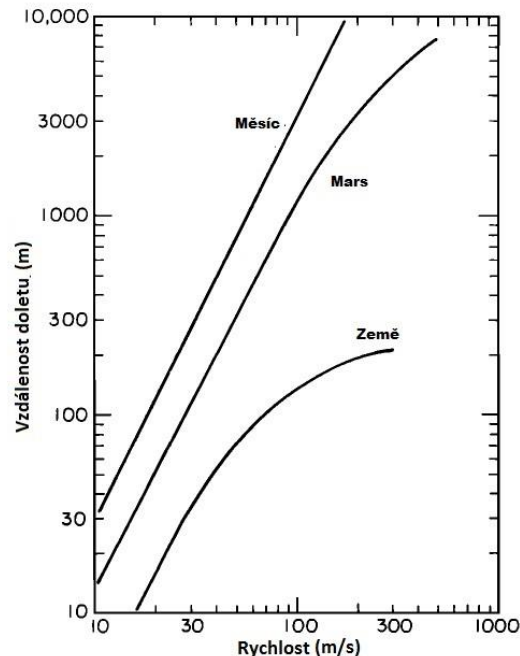
### 2.3 Co ovlivňuje tvary sypaných kuželů

Na tvar sypaného kužele má vliv řada faktorů, které mohou být proměnlivé v čase, jako např. složení magmatu nebo celkové množství vyvrženého materiálu (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 688), i neměnné, jako například gravitační konstanta. Roli hraje i soudržnost materiálu při určitém sklonu svahu a charakter pyroklastického materiálu (Riedel a kol., 2003).

Částice, které vylétávají během sopečné erupce z kráteru, jsou různě velké v závislosti na stupni fragmentace magmatu. Nejčastěji se jedná o lapilli nebo sopečný popel s velikostí zrn v rozsahu 10-40 mm (Riedel a kol., 2003). Méně často se vyskytují i sopečné bomby (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 684), které mají velikost větší než 64 mm. Výše zmíněné druhy částic pak formují tvar sypaného kužele, a pokud byla trajektorie letu dostatečně krátká, nedojde k významné ztrátě tepla částice během letu. Proto může v některých případech dojít ke spečení vyvržených částic na svahu kužele, což umožňuje, že v částech svahů může být překonán kritický úhel soudržnosti pro strusku. Pro struskové sypané kužele v pozemských podmínkách je maximální synpný úhel v hodnotě okolo  $30^\circ$  a pokud je tento kritický úhel překročen, dochází k sesuvu materiálu a rozrůstání kužele do šířky (Riedel a kol., 2003). V tomto případě je podstatná i velikost částic, kdy menší částice lépe vyplní prostory mezi většími částicemi a svah se tak zpevní (Riedel a kol., 2003).

Tvar sypaných kuželů ovlivňuje také gravitace (McGetchin a Ullrich, 1973) a přítomnost atmosféry, respektive její hustota (Glaze a Baloga, 2000; Wilson a Head, 2007). V podmínkách s menší gravitační konstantou doletí částice dále, než v podmínkách silnější gravitace, pokud by byla částice vyvržena na obou tělesech stejnou rychlostí, a měla stejné parametry (Head a Wilson, 2017). Současně se s klesající hustotou zmenšuje množství plynu, který by letící částici kladl odpor (McGetchin a kol., 1974), takže částice může doletět ve výsledku opětovně dále (viz obr. 2). Proto může vyvržená částice na tělesech se slabou gravitací a absencí atmosféry doletět dále, než by byla schopna na Zemi. V pozemských podmínkách navíc letí vystřelená částice po balistické křivce (Saunderson, 2008), kdežto na jiných tělesech bez atmosféry (např. na Měsíci) letí částice po parabole tak daleko, dokud

částici nedojde kinetická energie. Téměř nulový odpor atmosféry by tak měl dovolit částicím tvořit kužele s několikanásobně větším průměrem základny než v pozemských podmínkách (Brož a kol., 2018). Absence atmosféry má také za následek, že částice nejsou efektivně ochlazovány jako na Zemi a proto si uchovávají větší tepelnou energii po delší dobu.



Obrázek 2: Znárodnění trajektorií letu částic v atmosférických podmínkách Měsíce, Země a Marsu. Nepočítají se povětrnostní vlivy, ovšem je započítán odpor plynu v atmosféře (převzato a upraveno z McGetchin a kol., 1974).

Dalšími podstatnými činiteli, kterými jsou výsledné tvary sypaných kuželů ovlivněny, jsou úhly, pod kterými vylétávají částice na povrch, a počáteční rychlost, kterou jsou částice z kráteru vyvrhovány (Wilson a Head, 1981). Rychlost vylétávání částic je podmíněna dekompresí rozpuštěných sopečných plynů v magmatu, a je dána poměrem počátečního tlaku plynu vůči tlaku okolní atmosféry (Head a kol., 2002). Rychlejší částice doletí dále od kráteru, a mohou tak rozprostřít vyvržený materiál na větší plochu. Sypané kužele formované částicemi s vyšší počáteční rychlostí tak mají větší průměry základny a menší sklony svahů (Brož a kol., 2018). Průměr základny sypaného kužele také ovlivňuje úhel, pod kterým je částice vyvržena na povrch. Tento úhel je ovlivněn hloubkou, ve které probíhá fragmentace magmatu (Wilson a Head, 1981). Pokud tento děj probíhá ve velmi velké hloubce, úhly vylétávajících částic jsou relativně menší (kolem 5°) a částice se následně kumulují poblíž kráteru. Pokud naopak k fragmentaci dojde blíže k povrchu, mohou být výletové úhly širší a materiál se může rozprostřít na širší oblast, což povede ke vzniku kužele s pozvolnějšími svahy (Brož a kol., 2018).

Faktorem ovlivňujícím tvary kuželů jsou také tvar a hmotnost, potažmo hustota částice. V pozemských podmínkách, kde je přítomna relativně hustá atmosféra, dokáže kulovitý tvar částic lépe překonat delší vzdálenosti, než ploché částice kvůli tomu, že kulovitá částice bude klást menší aerodynamický odpor (Sherwood, 1967). V případě hmotnosti pak platí, že těžší částice doletí v prostředí s odporem vzduchu dříve na povrch. Ve vakuu ovšem nemá hmotnost částice vliv na její let.

## 2.4 Výskyt sypaných kuželů

Sypaný kužel je nejčastěji se vyskytující typ sopky na Zemi (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 683) a současně byla jeho přítomnost navržena i pro Mars (Lanz a kol., 2010; Brož a Hauber, 2012; Brož a kol., 2015) a pro Měsíc (Lawrence a kol., 2013; Sruthi a Kumar, 2014). Na Zemi se nacházejí sypané kužele nejčastěji v oblastech riftových zón (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 690), kde se vyskytují jako jednotlivé kužele, či vytvářejí sopečná pole čítající až stovky útvarů. Často bývají pozorovány jako parazitické sopky na jiném, větším sopečném tělese, jako například na svazích kompozitních nebo štítových sopek (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 692).

### 2.4.1 Lokality na Zemi

Na Zemi je známo přes několik tisíc sypaných kuželů s výskytem v oblastech s různou tektonickou i sopečnou historií. Konkrétně jedná o oblasti, kde je sopečná činnost výsledkem přítomnosti plášťových plum, subdukčních či riftových zón apod. (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 689).

Mezi oblasti riftových zón patří například oblast Neovulkanického pohoří v Mexiku, kde se na rozloze 60 000 kilometrů čtverečních nachází přes 1000 sopek včetně sypaných kuželů (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 690). Nejmladším z nich je sypaný kužel Paricutín (viz obr. 3). Dalšími oblastmi je riftový systém Rio Grande v Severní Americe nebo riftový systém Tibesti na hranicích Čadu a Lybie (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 691).

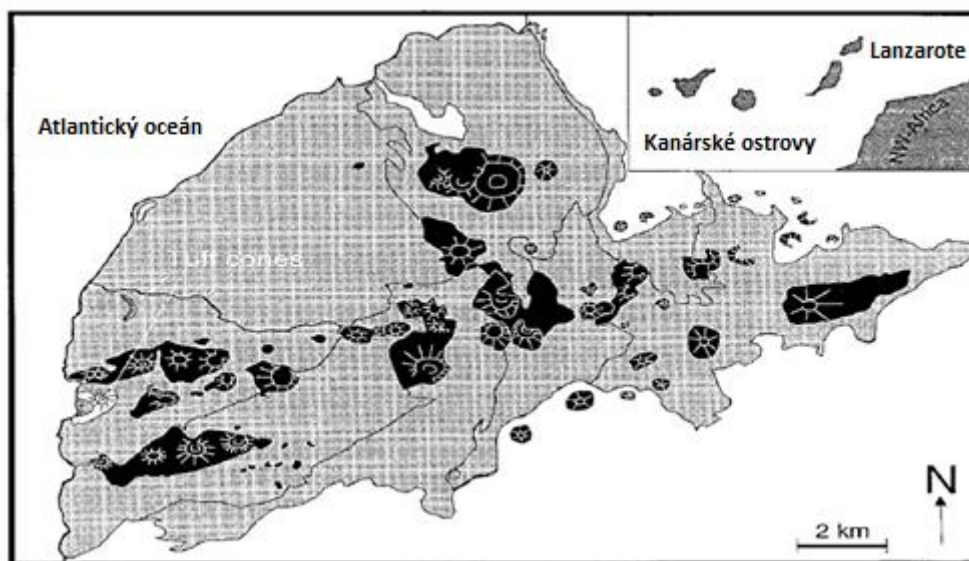


Obrázek 3: Sypaný kužel Parícutín v Mexiku. Zdroj: (<http://www.westfield.ma.edu/personalpages/draker/edcom/final/webprojects/sp14/naturalwonders/paricutin.html>, 2019)

Dalším typem tektonického prostředí kde mohou vznikat sypané kužele, je výskyt tzv. plášťových plum. Tento jev souvisí s výskytem materiálu s vyšší teplotou v plášti, který konvekcí stoupá vzhůru k zemskému povrchu (Wilson, 1963). Příkladem jsou např. Kanárské ostrovy, kde se nachází sopečné

pole na ostrově Lanzarote (viz obr. 4). Další lokality podobného typu jsou jihokorejský ostrov Cheju, kde bylo pozorováno přes 300 sypaných kuželů, Island či Reunion (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 690).

Současně je na Zemi pozorován fenomén parazitických sypaných kuželů, které se nejčastěji vyskytují v souvislosti se štítovými sopkami, tvořenými vrstvami velmi málo viskózní lávy, nebo v souvislosti s kompozitními sopkami, které jsou tvořeny nepravidelně se střídajícími vrstvami lávy a pyroklastického materiálu. Tyto parazitické kužele se vyskytují přímo na svazích hostitelských sopek, nebo v širším okolí, kde jsou přírodními drahami napojeny na hlavní sopečný komín. Mezi nejznámější parazitické sopky patří útvary na svazích kompozitní sopky Etny na Sicílii (Mazzarini a Armienti, 2001) nebo sypané kužele na svazích štítové sopky Mauna Kei na Havaji (Porter, 1972).



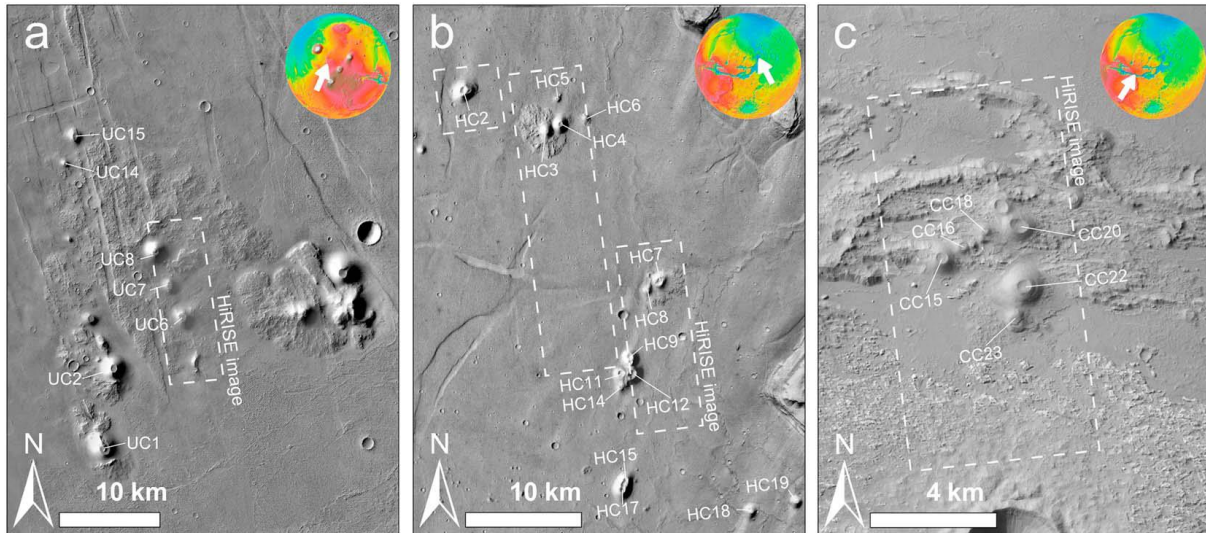
Obrázek 4: Sopečné pole na ostrově Lanzarote. Tento ostrov je součástí Kanárských ostrovů, které vznikly vlivem plášťové plumy (převzato a upraveno z Vespermann a Schmincke, 2000).

#### 2.4.2 Lokality na Marsu

Vyjma Země byla přítomnost sypaných kuželů popsána i na Marsu a to na základě výzkumu jejich tvarů a vazeb na okolní geologické jednotky. Popsané lokality se vyskytují v různých částech rudé planety, jak v oblastech známých sopečných provincií, tak i v severních nížinách. Mezi nejperspektivnější oblast (viz obr. 5a), kde by se marsovské sypané kužele mohly vyskytovat, patří Ulysses Colles (10,6° s. š., 123,07° z. d.) nacházející se v oblasti Tharsis, největší známé sopečné provincii ve Sluneční soustavě, která zabírá téměř 25% povrchu planety (Solomon a kol., 1982). Oblast je tvořena 29 kuželovitými tělesy, kde je s ohledem na místo vzniku nepravděpodobné, že by vznikly jinak než explozivním vulkanismem (Brož a Hauber, 2012). Další dvě oblasti (viz obr 5 b,c), kde se vyskytují kužele tvarově i velikostně podobné kuželům v Ulysses Colles, jsou Hydraotes Colles (Meresse a kol., 2008) a Coprates Chasma (13,4°j.š., 61,1°z.d.; Harrison a Chapman, 2008). Detailní výzkum jejich tvarů odhalil, že kužele v těchto oblastech jsou větší, než jejich pozemské analogy a současně že mají pozvolnější svahy. Předpokládá se, že tyto rozdíly jsou dány různým množstvím pyroklastického materiálu, který byl během sopečné erupce vyvržen na povrch Marsu a rozdílnými

podmínkami, konkrétně atmosférickým tlakem, panujícími mezi těmito třemi sopečnými poli (Brož a kol., 2015).

Přítomnost sypaných kuželů byla také navržena pro jednu oblast v rámci formace Vastitas Borealis v oblasti Utopia Plantia na severní polokouli Marsu (30,5° s. š., 262° z. d.). Pole je tvořené tělesy, které nesou podobné morfologické rysy jako pozemské sypané kužele vzniklé v oblastech riftových zón (Lanz a kol., 2010).



Obrázek 5: Sypané kužele na povrchu Marsu. Část zobrazuje (a) Ulysses Colles (b) Hydraotes Colles (c) sopečné pole v oblasti Coprates Chasma (převzato z Brož a kol., 2015).

### 3. LOKALITY VÝSKYTU SYPANÝCH KUŽELŮ NA MĚSÍCI

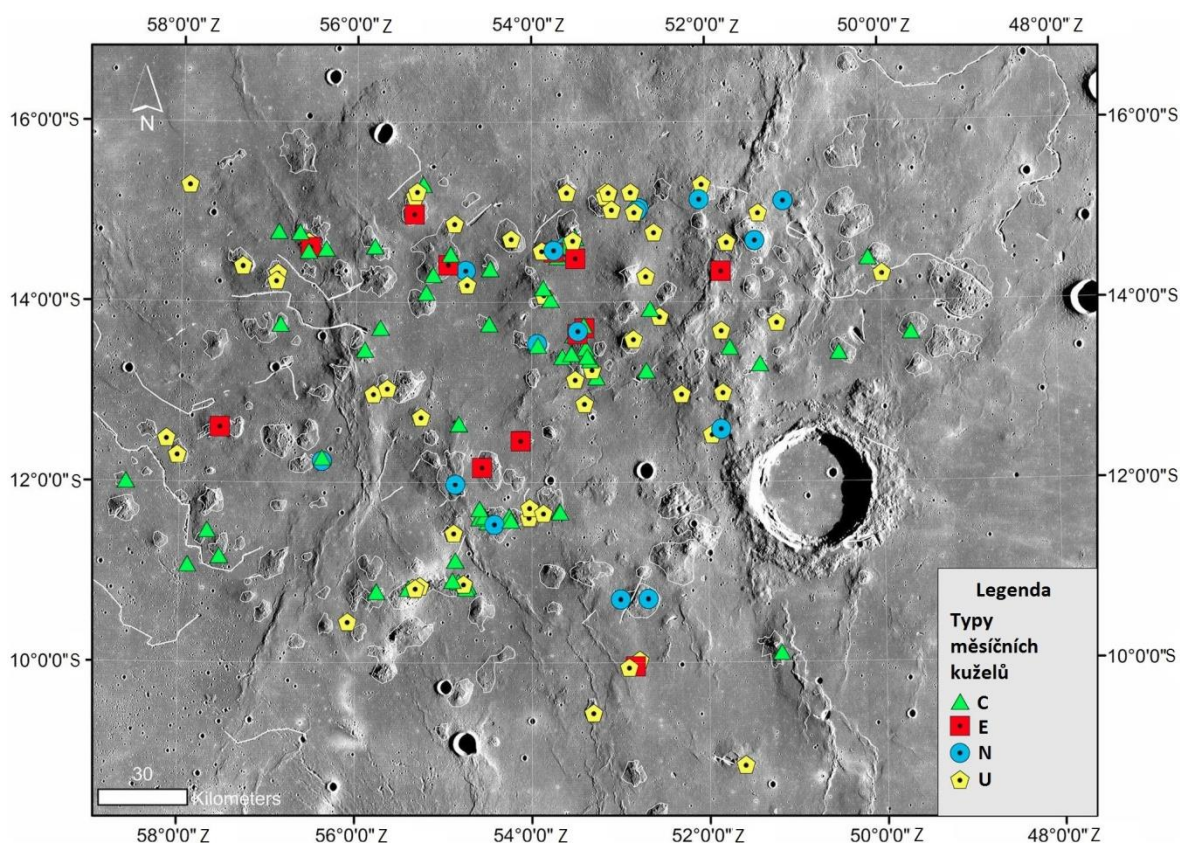
Na Měsíci bylo popsáno několik oblastí (viz příloha), ve kterých se vyskytují kuželovitá tělesa různých tvarů a velikostí. Bylo navrženo, že vznik těchto kuželovitých těles by mohl být spjat s explozivním vulkanismem a následnou akumulací pyroklastického materiálu, nicméně existují i alternativní scénáře jejich vzniku, které nejsou spjaty se sopečnou činností (Ashley a kol., 2016). V některých oblastech, jako v případě Marius Hills nebo impaktní pánve South Pole – Aitken, jsou kužele společně s dómovitými tělesy součástí větších sopečných polí. V jiných případech se vyskytují v okolí impaktních kráterů nebo geochemických anomálií. Většina těchto oblastí se nachází v lokalitách měsíčních moří, což jsou velké impaktní pánve zalité vrstvou bazaltů vzniklých tavením svrchního pláště (Lawrence a kol., 2013).

#### 3.1 Lokalita Marius Hills

Oblast Marius Hills (13,4° s.š., 304,6° v.d.) má rozlohu 35000 km<sup>2</sup> a nachází na přivrácené straně Měsíce v lokalitě Oceanus Procellarum, největší depresi zalité bazalty, která je na povrchu Měsíce. Jedná se o sopečné pole v okolí impaktního kráteru Marius, které je tvořeno převážně sopečnými dómy (Lawrence a kol., 2013).

Oblast získala své jméno pro velké množství kuželovitých a dómovitých těles, které se v oblasti vyskytují (viz obr. 6). Kužele se nacházejí i v oblastech mezi dómy, ovšem většina z nich se nachází

na svazích, nebo na vrcholcích dómů. Na základě výzkumu tvarů těchto dvou typů těles, velikostí i chemického složení (Lawrence a kol., 2013), převládá ve vědecké obci názor, že tyto útvary jsou sopečného původu. Vyjma kuželovitých a dómovitých těles, které byly interpretovány jako sypané kužele a lávové dómy se zde vyskytují i zvláštní koryta, tzv. sinusové brázdy (z anglického termínu *sinuous rilles*), které jsou dokladem mechanicko-tepelné eroze podloží vlivem tekoucí lávy. Dómovitá tělesa, která se v oblasti vyskytují, se dají rozdělit do dvou základních typů na základě sklonu svahů. Jeden druh má sklon svahu 2 až 3°, druhý 6 až 7°. Je předpokládáno, že rozdílné sklony svahů jsou způsobeny změnami ve složení magmatu. Nicméně přesné chemické složení materiálu, který proudy i kužele tvoří, není doposud známé (Lawrence a kol., 2013)



Obrázek 6: Sopečné pole v okolí impaktního kráteru Marius včetně klasifikace jednotlivých kuželovitých těles (převzato a upraveno z Lawrence a kol., 2013).

Některé sopečné dómy mají ve své svrchní části prudší spád než v dolní části. To značí změny obsahu křemíku v magmatu, potažmo jiné teploty výlevu (Lawrence a kol., 2013). Tyto tělesa mají 1-2 km v průměru a podle uspořádání kuželů na vrcholu se můžeme domnívat, že sopečné dómy vznikly dříve než sopečné kužele, které naopak spadají do poslední etapy sopečné činnosti oblasti Marius Hills (Lawrence a kol., 2013).

V oblasti se vyskytuje 93 kuželovitých těles, které byly interpretovány jako měsíční obdoby pozemských sypaných kuželů, přičemž některé z nich již dříve popsali Weitz a Head (1999), a Withford-Stark a Head (1977). Jejich interpretace ale není jednoznačná, proto může nastat situace, že kuželovité útvary jsou současně identifikovány jako sopečné dómy. Popřípadě je obtížné s ohledem na

degradaci jejich povrchu určit, zda se jedná o sypaný kužel nebo o kompozitní sopku (Lawrence a kol., 2013). Sypané kužele v této lokalitě byly roztrženy do čtyř základních typů, jejichž charakteristika je předmětem následující kapitoly.

Kužele v této lokalitě vznikaly v různých morfologických podmínkách, mezi které můžeme zařadit například rozpraskané podloží nebo ukloněný povrch. Kužele ovšem nesou společné znaky v podobě sklonu svahů, které jsou ve všech případech pod  $17^\circ$ , a průměru základu, ten je v rozmezí od 500 m do 2 km (Lawrence a kol., 2013). Současně je u popisovaných těles v této lokalitě pozorováno i vyklenutí na jedné straně kužele, v angličtině označováno slovem *gap*. Tento výřez je pozorován i u pozemských sypaných kuželů, a bývá tvořen proražením stěny kužele vytékající lávou.

Dalším společným znakem je přítomnost až 28 metrů velkých kamenných bloků, které se nacházejí v bezprostřední blízkosti kuželů. Tyto kamenné úlomky byly interpretovány jako pozůstatek materiálu, který tvořil překážku magmatu vystupujícímu na povrch, popřípadě zbytky lávové vrstvy, která překrývala kráter sopky (Lawrence a kol., 2013). Menší kamenné bloky se zpravidla vyskytují na konci zvláštních pozitivních útvarů vzniklých tečením (v angličtině označované termínem *lobate flows*). Jedním z možných vysvětlení je, že bloky byly unášeny od kráteru sopky lávou, což by potvrdilo i pozorování, že čím jsou bloky dále od kráteru, tím byly pozorovány více viskózní lalokovité proudy s větší tloušťkou (Anderson a kol., 1998).

V oblasti Marius Hills se kužele vyskytují v podobě sopečného pole, což může být vysvětleno přítomností žil blízko povrchu (Head a Wilson, 1993), fraktur pod povrchem (Porter, 1972; Corazzato a Tibaldi, 2006; Sutawidjaja a Sukhyar, 2009), nebo migrací lávy podél svahu dómu (Porter, 1972; Sutawidjaja a Sukhyar, 2009). Lawrence a kol. (2013) také konstatuje, že kužele v této lokalitě mají podobné poměry průměrů kráterů a základu s dalšími měsíčními lokalitami Isis a Osiris, jež jsou popsány níže, což může naznačovat podobné podmínky vzniku.

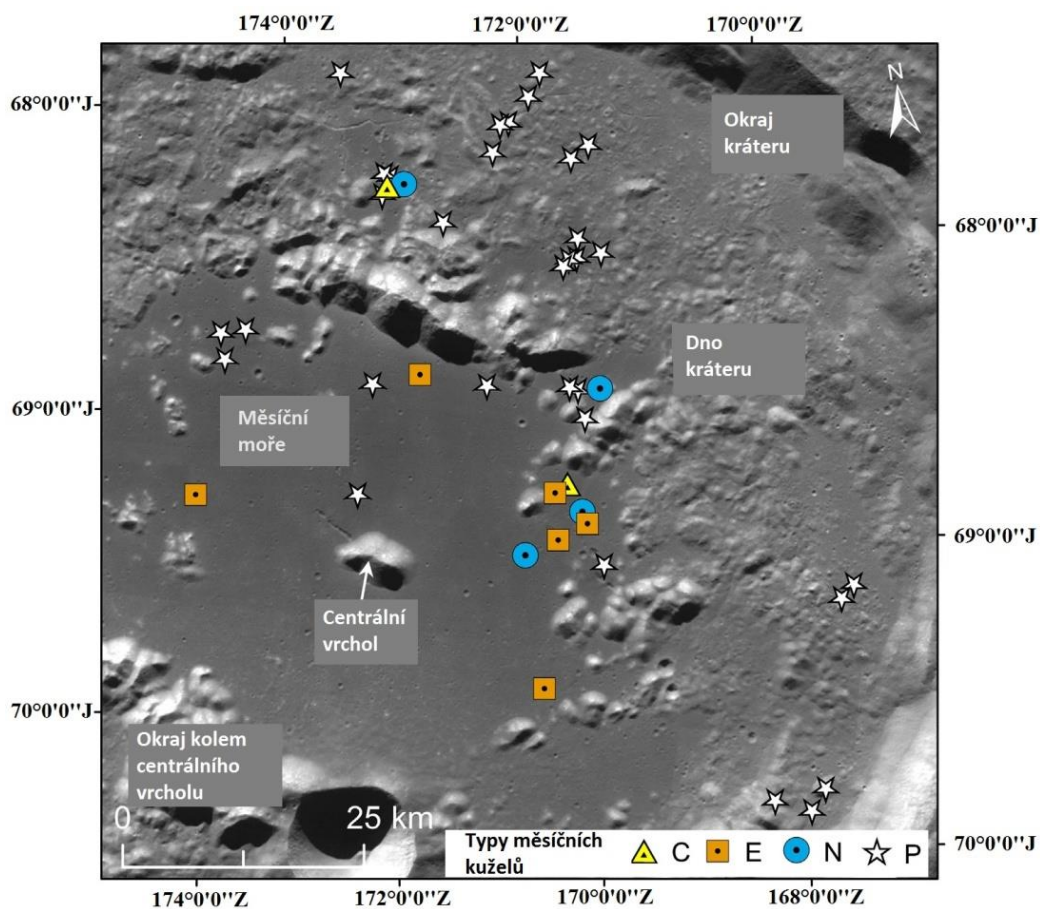
### **3.2 Sopečné pole Antoniadi v lokalitě South Pole-Aitken**

South Pole-Aitken ( $53^\circ$  j.š.,  $169^\circ$  z.d.) o průměru 2500 km je oblast na odvrácené straně Měsíce, která je datována jako nejstarší impaktní kráter na Měsíci. Bylo zjištěno, že horniny vyplňující dno této impaktní pánve jsou mladší než horniny v okolí impaktní pánve (Sruthi a Kumar, 2014). Dle některých interpretací to svědčí o epizodickém vulkanismu, při kterém se žilami na povrch dostávalo velmi viskózní magma (Sruthi a Kumar, 2014).

Při pozorování impaktní pánve sondou Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) byly nalezeny v sopečném poli Antoniadi pyroklastické uloženiny a 45 kuželovitých těles, které jsou tvarově i velikostně velmi podobné některým kuželům z oblasti Marius Hills. Toto sopečné pole o rozloze 143 km<sup>2</sup> leží nedaleko impaktního kráteru Antoniadi. Kužele v této oblasti mají kruhovou základnu o průměru v rozmezí 620 až 890 m a výšku v rozmezí 150 až 170 m. Pozorované tělesa jsou tak menší, než kužele známé z oblasti Marius Hills. V centrální oblasti měsíčního moře, které se nachází mezi okrajem pánve a centrálním vrcholem (viz obr. 7), byly pozorovány i protažené kužele podobné

protaženým kuželům z Marius Hills (Sruthi a Kumar, 2014). Také se zde vyskytují kuželovitá tělesa, u kterých nelze přesně určit jejich charakter a nedá se tedy jednoznačně stanovit, jestli vznikla sopečnou činností či nikoliv. Je to dáno tím, že není rozpoznatelný centrální kráter ani nelze pozorovat doprovodné lávové proudy či další znaky dokládající sopečný původ (Sruthi a Kumar, 2014). Výška a rozměry základny těchto kuželů jsou podobné jako u ostatních těles popsanych v oblasti Marius Hills a Antoniadi, jež byly interpretovány jako sypané kužele. Jejich základna má v průměru 300 až 2300 m (Sruthi a Kumar, 2014).

Stejně jako v předchozí lokalitě, i v lokalitě Antoniadi byl zaznamenán výskyt velkých kamenitých bloků v okolí objevených kuželů. Jejich průměr je mezi 2 až 12 m, přičemž velikost bloků se zvětšuje se zvětšujícím se průměrem kráteru dané sopky (Sruthi a Kumar, 2014). Větší množství, zato však menších bloků kamene, se nachází v okolí kráteru sopek, kde byly pravděpodobně uloženy následkem několikastupňové fragmentace magmatu (Kumar a kol., 2014). Nicméně podobné velikostní distribuce by bylo možné dosáhnout i jednou, velmi silnou erupcí (Sruthi a Kumar, 2014). Úložiště pyroklastik jsou také pozorovány v okolí žil, kterými proudilo magma na povrch. Jejich přítomnost by tak napovídala o přítomnosti sopečných plynů v magmatu a o jeho následném odplynění, které mohlo změnit typ erupce, velikosti kráteru i dynamice erupce (Sruthi a Kumar, 2014).



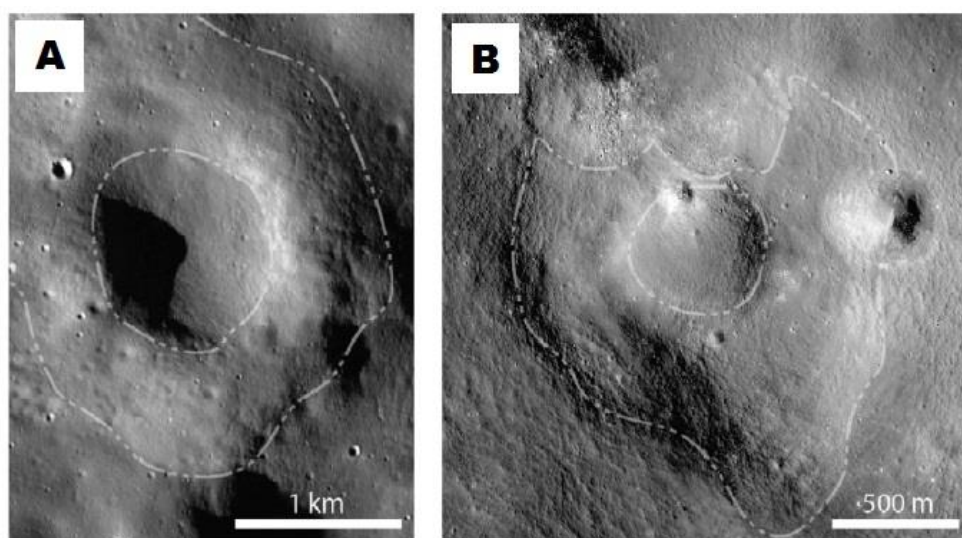
Obrázek 7: Sopečné pole Antoniadi v oblasti South Pole-Aitken. Na obrázku je patrná centrální část zalitá bazaltem, kde se nachází nejvíce kuželů typu C a E (převzato a upraveno z Sruthi a Kumar, 2014).

### 3.3 Ostatní lokality

Další oblasti, ve kterých bylo navrženo, že by se tam mohly sypané kužele vyskytovat, jsou sopečný komplex Compton–Belkovich (Chauhan a kol., 2015), okolí impaktního kráteru Lassel (Ashley a kol., 2016) a lokality Milichius, Aristarchus, Isis a Osiris (Wöhler a kol., 2006). Zmínky o přítomnosti těles s kuželovitým tvarem jsou také v okolí impaktního kráteru Oppeheimer (Bennet a kol., 2016) a dále pak oblasti, které pozoroval ve své práci Stopar a kolektiv (2015), konkrétně v regionech Hortensius–Tobias Meyer, Rimae Parry a Mons Euler.

#### 3.3.1. Sopečný komplex Compton–Belkovich

Tato oblast (61,1° s.š., 99,5° v.d.) představuje vulkanický komplex, který se nachází na odvrácené straně Měsíce mezi impaktními krátery Compton a Bel'kovich. Bylo zde nalezeno několik domovitých a kuželovitých těles tvarově podobných tělesům v Marius Hills, nicméně se zde nevyskytují žádné sinusové brázdy. V centrální části komplexu je nepravidelně tvarovaná deprese, která byla interpretována jako kaldera vzniklá po fázi tvorby sopečných dómů (Chauhan a kol., 2015). Vyskytují se zde také různé velké uloženy pyroklastického materiálu bohatého na křemík jako pravděpodobné reliktů po explosivním vulkanismu. Podobně jako ve dvou předchozích lokacích, i zde jsou popsány kuželovitá tělesa (viz obr. 8a) interpretovaná jako sypané kužele, ovšem v některých případech mohou být zaměněny za sopečné dómy (Chauhan a kol., 2015). Vyskytují se převážně na východě komplexu. Kužele jsou nižší než kužele z oblasti Marius Hills, mají menší průměr základny i kráteru na vrcholu. Spektrální měření ukazují, že oblast představuje thoriovou anomálii, která vznikla, když byly z magmatu při chladnutí vyčleněny nekompatibilní prvky jako např. thorium (Jolliff a kol., 2011; Warren, 2001). Pozorujeme zde kromě efuzivního vulkanismu i explozivní vulkanismus, který je charakteristický hlavně pyroklastickým materiálem s vysokým obsahem křemíku (Chauhan a kol., 2015).



Obrázek 8: Snímek z povrchu Měsíce, kde (a) je kužel v oblasti Compton-Belkovich (b) je pravděpodobný kužel v oblasti impaktního kráteru Lassel (převzato a upraveno z Ashley a kol., 2016).

### 3.3.2. Lokalita impaktního kráteru Lassel

Lokalita Lassel (21,3° j.š., 16,6° z.d.) je tvořena impaktním kráterem Lassel C a několika menšími krátery v měsíčním moři Mare Nubium na přivrácené straně Měsíce. V lokalitě byly pozorovány pyroklastické uloženiny, lávové proudy a lalokovité proudy (Ashley a kol., 2016). Také byly na dně kráteru Lassel pozorovány balvany, které jsou částečně zasypány regolitem (Gustafson a kol., 2012). Pyroklastický materiál, který byl vyvrhován a ukládán v kráteru, nemá charakter kužele, ale pouze tenké uloženiny. Jediný útvar, který má tvar kužele (viz obr. 8b), má vnitřní úhel stěn 5° a vnější 4-10°, a nachází se na jihu lokality Lassel (Ashley a kol., 2016). Výška tohoto tělesa je zhruba 60 m, průměr základny je 1850 m a průměr centrálního kráteru je 740 m. Vyvržený pyroklastický materiál má ale jiné složení, než v jiných částech Měsíce, je totiž bohatší na thorium a křemík, ale chudší na železo. Předpokládá se, že tento objekt vznikl menší erupcí explosivního charakteru, ovšem nelze vyloučit, že se jedná o degradovaný impaktní kráter (Ashley a kol., 2016). Na rozdíl od kráteru Lassel C zde v bezprostřední blízkosti kužele nepozorujeme výskyt balvanů. Ovšem v této lokalitě se také jako v lokalitě Marius Hills nacházejí zvláštní lalokovité proudy (*lobate flows*) a další známky naznačující historickou přítomnost bazaltového vulkanismu. V závěru Ashley a kol. (2016) vyslovuje myšlenku, že celý komplex Lassel je podobný komplexu Compton–Belkovich, a to jak v obsahu křemíku a thoria, tak ve výskytu těles, jež je možné interpretovat jako sypané kužele či lalokovité proudy.

### 3.3.3 Lokality Milichius, Aristarchus, Isis a Osiris

Další lokality na povrchu Měsíce, pro které byla přítomnost sypaných kuželů navržena, jsou popsány v práci týmu Wöhler a kol. (2006). Jedná se o kužel v oblasti impaktního kráteru Milichius (10° s.š., 30,2° z.d.), který se nachází v západní části lokality s dalšími objekty, které by také mohly mít charakter sypaného kužele. Jsou popsány jako kuželovité objekty, které byly tvořeny akumulací strusky a mají typicky mírnější stěny svahů (Wöhler a kol., 2006). Dále to jsou lokality sopečných kráterů Isis (18,95° s.š., 27,48° v.d.) a Osiris (18,65° s.š., 27,65° v.d.), kde se vyskytují v rámci sopečného pole společně se sopečnými dómy. Tyto kužele mají malé průměry základny a sklony svahů okolo 3°. Mezi kužele vzniklé sopečnou činností by mohly patřit i kužele v oblasti Aristarchus (23,7° s.š., 47,4° z.d.; Wöhler a kol., 2006).

### 3.3.4 Lokality Oppenheimer, Hortensius-Tobias Meyer, Rimae Parry a Euler

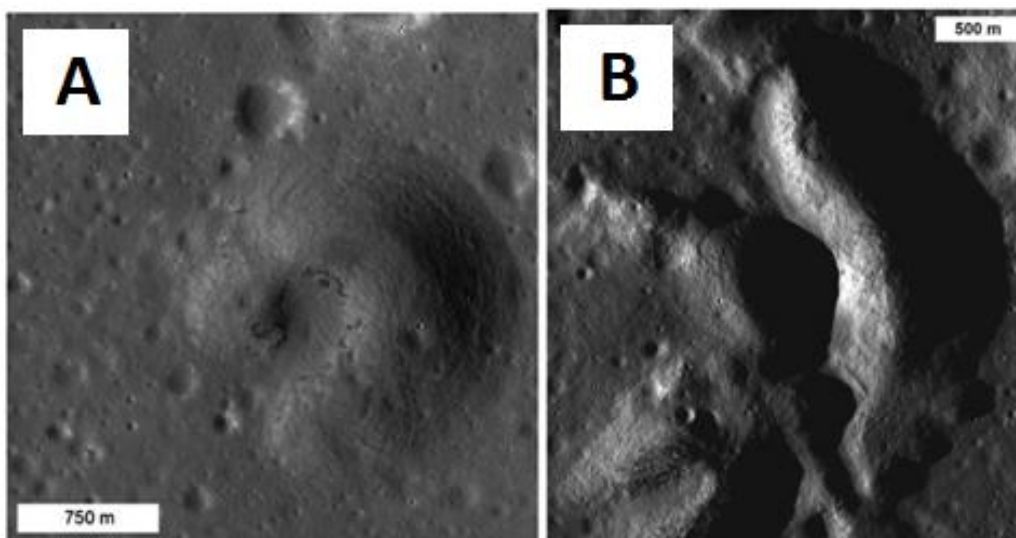
Objekty, které také připomínají sypané kužele, se také nacházejí v oblastech impaktního kráteru Oppenheimer (Bennet a kol., 2016), v regionu Hortensius-Tobias Meyer, Rimae Parry a Mons Euler (Stopar a kol., 2015). V severní části první zmíněné lokality byl pozorován malý kuželový útvar s vysokým obsahem sopečného skla. Je proto pravděpodobné, že objekt vznikl havajským stylem erupce v prostředí rozpraskaného dna kráteru (Bennet a kol., 2016). Ve zbývajících lokalitách Stopar a kol. (2015) zmiňuje kužele se základnou <3,5 kilometrů a s konickým nebo protaženým tvarem. Jejich určení jakožto sypaného kužele, stejně jako u předchozích lokalit v kapitole 3, záviselo na poměru velikosti základny vůči průměru kráteru sopky.

#### 4. MORFOLOGICKÉ TYPY MĚSÍČNÍCH SYPANÝCH KUŽELŮ

Níže popsaná klasifikace je převzata z práce Lawrence a kol. (2013), ve které byly zkoumány kuželovitá tělesa v lokalitě Marius Hills. Výzkum odhalil, že se kuželovité útvary dají rozdělit do čtyř základních skupin. Tato klasifikace se následně dočkala použití i v práci Sruthi a Kumar (2014) v rámci jejich výzkumu zaměřující se na sopečné pole Antoniadi v lokalitě South Pole-Aitken. Ti si nicméně upravili některé názvy typů sopek pro své potřeby.

##### 4.1 Morfologický typ C

Prvním zástupcem této klasifikace je kuželovité těleso ve tvaru otevřeného kruhu, neboli typ C (viz obr. 9a). Tento typ kužele se vyznačuje průměrem základny 500 m až 4 km na základě měření velikostí těles v lokalitě Marius Hills a průměrem 600 až 900 metrů pro tělesa v lokalitě Antoniadi. Jedná se o nejčtenější typ kužele vyskytujících se v těchto lokalitách. Tato tělesa mají největší podobnost ve vzhledu s pozemskými sypanými kužely ve smyslu velikosti, nicméně se liší od pozemských sypaných kuželů sklonem bočních svahů. U sopek na Zemi dosahují vnější stěny úhlu  $30^\circ$ , což je obvyklá hodnota pro nově vytvořené sypané kužele na Zemi (Riedel a kol., 2003), u měsíčních kuželů dosahují úhly vnějších svahů mnohem menších hodnot, a to méně než  $17^\circ$  (Lawrence a kol. 2013). Pro tento typ je také typické, že jsou svahy kužele proraženy (v angličtině označovány jako *gap*). Předpokládá se, že to je způsobeno vytečením lávy z kráteru. V oblasti Marius Hills nejsou ale lávové proudy vycházející z kráteru kužele zpravidla pozorovatelné, nejspíše kvůli pokrytí povrchu regolitem. Topografická data ukazují, že ve většině případů k protržení svahu došlo v místě, kde je svah orientován směrem z kopce (Lawrence a kol., 2013). Tento výřez je v některých případech pozorován i u dalších měsíčních typů kuželů (viz obr. 9b). Charakteristické pro tento typ je i výskyt kamenitých bloků.



Obrázek 9: Dvojice kuželů s výklenkem z oblasti Marius Hills. U kuželu (b) je patrný protáhlý tvar základny (převzato a upraveno z Lawrence a kol., 2013).

## 4.2 Morfologický typ N

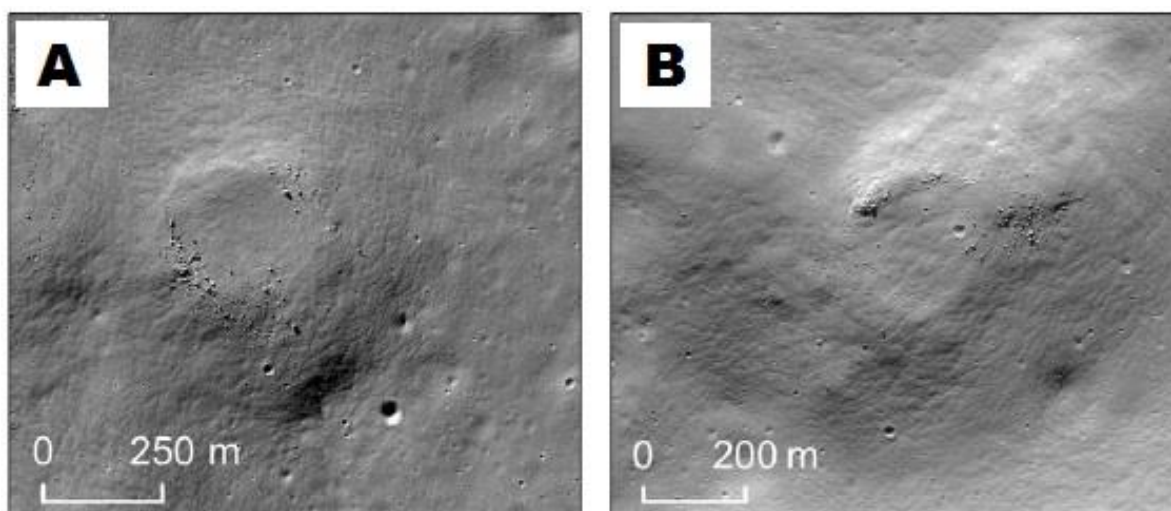
Velmi podobným typem kužele k typu C je typ N (podle anglického termínu *No gap* - bez výřezu), kde pozorujeme typickou morfologii sypaného kužele včetně strmých svahů a kráteru na vrcholu, ovšem nepozorujeme charakteristické protržení svahu (Lawrence a kol., 2013). Tyto kužele jsou velikostně podobné typu C, a popisují je ve svých pracích Lawrence a kol. (2013) i Sruthi a Kumar (2014).

## 4.3 Morfologický typ E

E-typ (podle anglického termínu *elongate* - prodloužený) je další typ kužele v oblasti Marius Hills a Antoniadi, jehož tvar základny je protažený (viz obr. 9b). Předpokládá se, že magma vystupovalo na povrch nikoliv jako bodový zdroj, ale po delším úseku trhliny, popřípadě zlomu v měsíční kůře (Lawrence a kol., 2013). V lokalitě Antoniadi bylo popsáno 6 kuželů protáhlého tvaru s parametry základny od 600 m do 1500 m a kráteru na vrcholu kužele v rozmezí od 300 m do 900 m. Všechny jednotky byly pozorovány v oblasti měsíčního moře. V Marius Hills bylo naopak pozorováno 12 kuželů tohoto typu a na rozdíl od lokality Antoniadi většina z nich má výřez ve stěně svahu, stejně jako u těles typu C. V obou lokalitách můžeme poblíž kráteru těles tohoto typu pozorovat kamenité bloky (Sruthi a Kumar, 2014).

## 4.4 Morfologický typ U

Tento typ U (z anglického termínu *uncertain* – neurčitý) je typ kužele, u kterého nebyl přesně určen charakter tělesa (viz obr. 10). Sruthi a Kumar (2014) zavedli pro tento typ označení typ P (z anglického termínu *possible* – pravděpodobný). Lawrence a kolektiv (2013) definuje tento typ jako těleso s pozitivním reliéfem, s poloměrem základny 500 m až 4 km a podobné ostatním sypaným kuželům v Marius Hills, které ovšem nejsou snadno rozlišitelné od erodovaných impaktních kráterů, erodovaných lávových toků nebo jiných geologických jednotek. Stejně jako ostatní kuželové útvary v oblasti Marius Hills mají sklony svahů pod 16° (Lawrence a kol., 2013) a většinou nemůžeme pozorovat ani vrcholový kráter (Sruthi a Kumar, 2014). Velmi často vidíme pouze plochý vrchol a jen zřídka kamenité bloky. V oblasti Antoniadi bylo pozorováno 33 kuželů tohoto typu v severozápadní části oblasti (Sruthi a Kumar, 2014) a 55 kuželů tohoto typu v oblasti Marius Hills (Lawrence a kol., 2013).



Obrázek 10: Dva snímky zobrazující tělesa, u kterých nebyl přesně určen jejich charakter. Na obrázku (a) jsou patrné kamenité bloky (převzato a upraveno z Sruthi a Kumar, 2014).

## 5. DISKUZE: POZORUJEME NA MĚSÍCI SYPANÉ KUŽELE ?

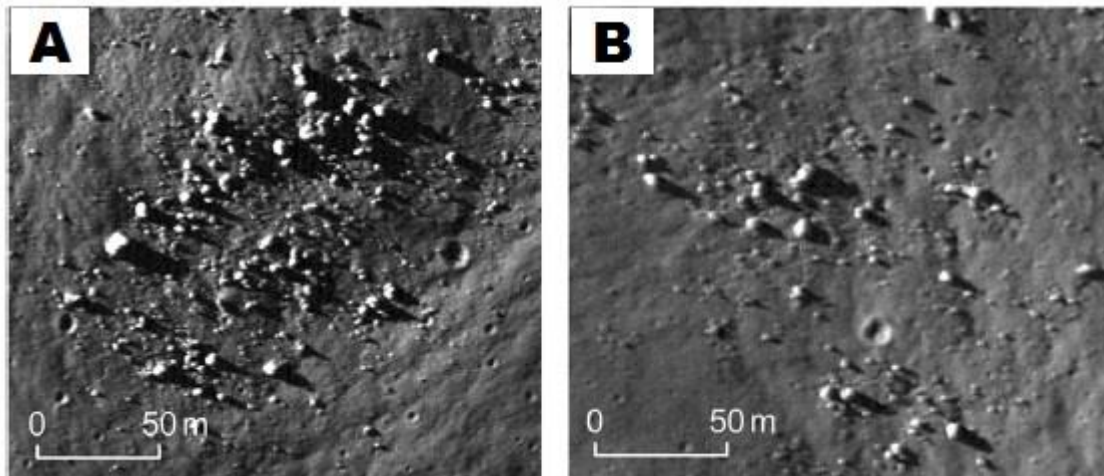
### 5.1 Jsou měsíční útvary sypanými kužely?

V této rešeršní práci byly popsány oblasti na povrchu Měsíce, o kterých se předpokládá, že by mohly obsahovat sypané kužele, a současně jsou zde uvedeny základní charakteristiky sypaných kuželů na Zemi i jejich možných obdob na povrchu Marsu. Byly zde popsány lokality výskytu (viz kap. 3) a různé typy měsíčních kuželů (viz kap. 4). Ovšem argumenty obsažené v odborné literatuře nemohou s jistotou potvrdit, zda se jedná o sypané kužele. K tomu by byly potřeba i vzorky odebrané přímo v měsíčních lokalitách.

Na Měsíci byly kužele pozorovány ve formě sopečných polí spolu se sopečnými dómy (Lawrence a kol., 2013; Sruthi a Kumar, 2014; Wöhler a kol., 2006; Chauhan a kol., 2015), ale i jako samostatná tělesa (Ashley a kol., 2016; Wöhler a kol., 2006; Stopar a kol., 2015; Bennet a kol., 2016). V lokalitách Marius Hills a Antoniadi jsou popsány desítky kuželů, které jsou si typově podobné – mají kuželovité tvary (typ N), protažené tvary (typ E), nebo mohou mít i výřezy po úniku lávy (typ C). V těchto lokalitách se také vyskytují tělesa, jejichž mechanismus vzniku je těžké určit (typ U). Vyjma obecných tvarů jsou si tělesa v těchto oblastech podobná i v některých morfometrických parametrech. Konkrétně v poměru velikosti kráteru kužele vůči jeho základně, kdy v oblasti Antoniadi je tento poměr v rozmezí 0,38 až 0,40 a v případě Marius Hills okolo 0,45 (Lawrence a kol., 2013; Sruthi a Kumar, 2014). V obou případech byly pozorovány několik metrů velké kamenné bloky, které jsou nejspíše pyroklastické uloženiny (Sruthi a Kumar, 2014).

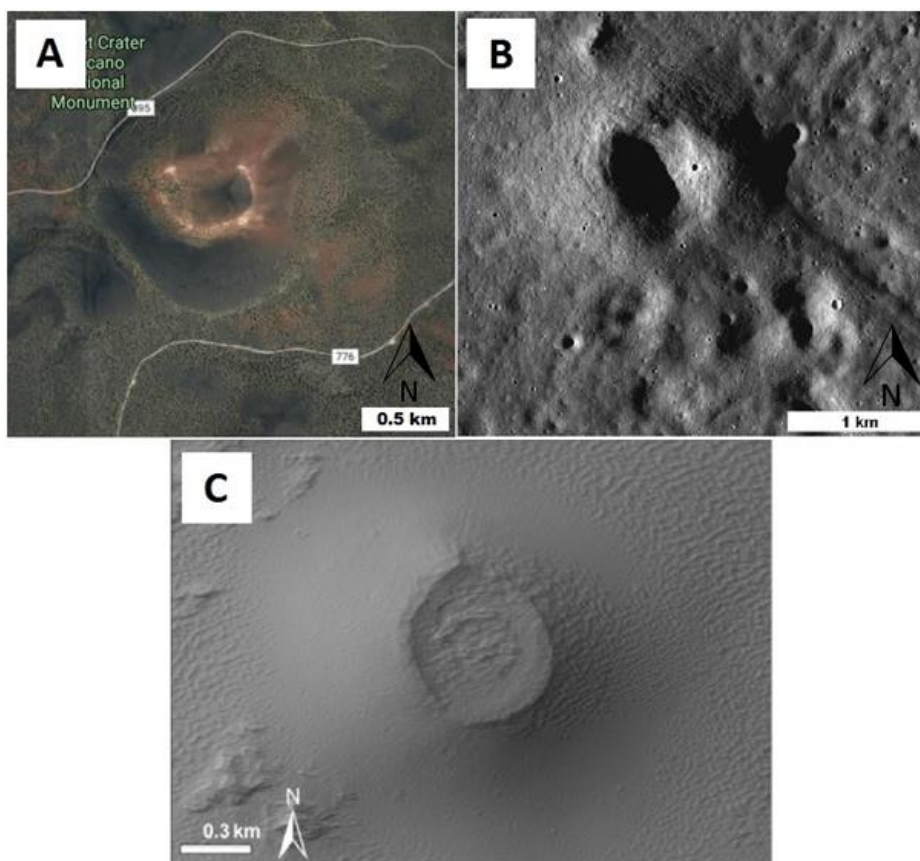
Oproti tomu jednotlivé kužele vznikají často v okolí velkých impaktních kráterů, kde mimo kužele pozorujeme i pyroklastické deposity (Bennet a kol., 2016; Ashley a kol., 2016). Jedná se o oblasti rozpraskaných podloží kráterů nebo sinusových brázd (Gaddis a kol., 1985), kde byla ztenčena kůra a magma se tak snadněji dostala na povrch Měsíce (Gustafson a kol., 2012). V okolí těchto výstupních

bodů se následně kumuloval pyroklastický materiál i ve formě větších kamenných bloků (viz obr. 11). Tyto bloky byly pozorovány ve většině oblastí s výskytem sypaných kuželů, jako např. Marius Hills (Lawrence a kol., 2013) nebo Antoniadi (Sruthi a Kumar, 2014). Ovšem existují i oblasti s výskytem kuželovitých těles (impaktní kráter Lassel), kde v okolí kužele nebyly pozorovány žádné kamenné bloky a autoři studie kteří prováděli pozorování dané oblasti, vyjadřují myšlenku, zdali se nejedná pouze o degradovaný impaktní kráter (Ashley a kol., 2016). Tento tým zároveň vyjadřuje pochybnosti i existenci sypaných kuželů v oblasti Compton-Belkovich.



Obrázek 11: Snímky kamenitých útvarů v okolí vrcholů kuželů v sopečném poli Antoniadi. Pravděpodobně se jedná o součást pyroklastického materiálu (převzato a upraveno z Sruthi a Kumar, 2014).

Kužele na Měsíci mají v lokalitách Marius Hills a Antoniadi průměr základny v rozmezí od 500 m do 2 km a jsou vysoké do 170 m. Sklony jejich svahů byly naměřeny pod  $16^\circ$  (Lawrence a kol., 2013; Sruthi a Kumar, 2014). Jsou tak v řadě parametrů rozdílné se svými pozemskými i možnými marsovskými obdobami (viz obr. 12). Oproti pozemským sypaným kuželům, které dosahují velikosti základny od 250 m až 2,5 km s výškou až 400 m (Paricutín; Vespermann a Schmincke, 2000, str. 693), jsou měsíční kužele nižší, ovšem rozlehlost základny je velmi podobná. Sklony svahů jsou na Měsíci pozvolnější, vzhledem k tomu, že nově vytvořené a neerodované sypané kužele na Zemi mají svažitosť kolem  $30^\circ$  (Vespermann a Schmincke, 2000, str. 688). Při srovnání s možnými marsovskými sypanými kuželami se jeví, že jsou měsíční kužele menší, protože rozměry základen kuželů Ulysses Colles, Hydraotes Chaos a Coprates Chasma jsou v rozmezí od 320 m do 4 km, a výška dosahuje 573 m (Brož a kol., 2015). Sklony svahů na Marsu jsou velmi proměnlivé, mohou být od  $7^\circ$  do  $25^\circ$  (Brož a kol., 2015), ovšem v hodnotách se podobají měsíčním kuželům více než ty pozemské. Tyto údaje ukazují, že měsíční kužele nejsou shodné s obdobnými sopkami známými z jiných těles Sluneční soustavy. I přes tuto tvarovou rozdílnost se však jeví, že tyto útvary vznikly explozivním vulkanismem havajského či strombolského typu, protože byly v okolí objeveny lávové proudy, úložiště pyroklastik nebo sopečného skla (Lawrence a kol., 2013; Sruthi a Kumar, 2014; Ashley a kol., 2016).



Obrázek 12: Srovnání parametrů kuželů (a) na Zemi, kde je zobrazen sypaný kužel Sunset Crater v USA, (b) na Měsíci, kde je zobrazen kužel Osiris (c) na Marsu, kde je na snímku zachycen kužel z oblasti Tharsis (převzato a upraveno z Lawrence a kol., 2013; Brož a Hauber, 2011). Snímek (a) vytvořen v Google Earth.

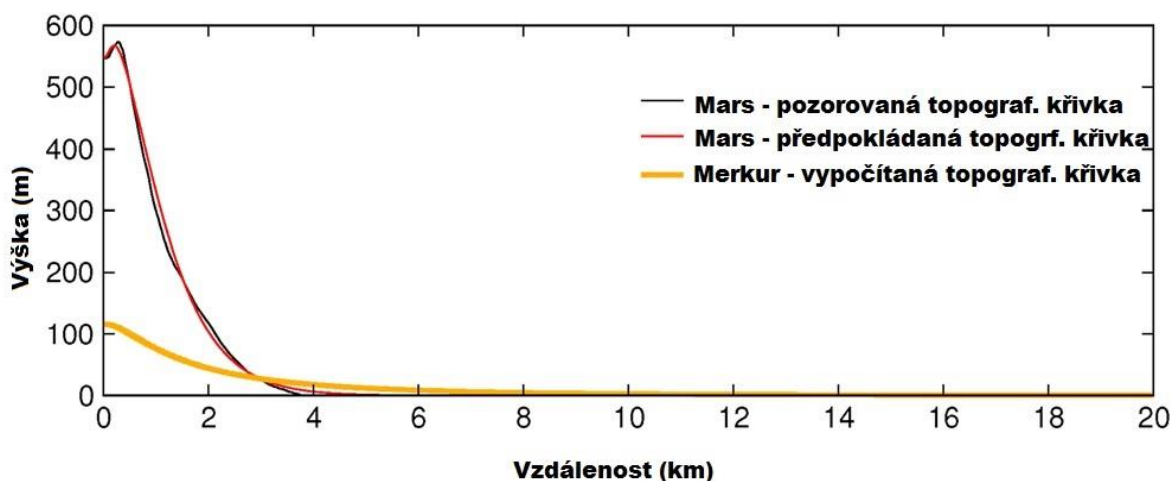
## 5.2 Vliv prostředí na rozptyl vyvrhovaných částic

Shrnutí informací o měsíčních kuželech odhalilo, že se tvarově liší od svých pozemských i marsovských ekvivalentů. Důvodem různých velikostních parametrů kuželů na Zemi, Marsu a Měsíci proto můžeme hledat v rozdílných podmínkách prostředí, ve kterých sopky vznikly. Zatímco Země je obklopena poměrně hustou atmosférou (hustota na hladině moře je  $1,2 \text{ kg/m}^3$ ), atmosféra Marsu je velice řídká (hustota na povrchu je  $0,023 \text{ kg/m}^3$ ) a dosahuje tak pouhých 0,5 % pozemské (Brož a kol., 2015). Měsíc nemá atmosféru v podstatě vůbec. Podobně dramaticky se liší i gravitační konstanta, které dosahuje na Zemi hodnoty  $9,807 \text{ m/s}^2$ , na Marsu  $3,71 \text{ m/s}^2$  a na Měsíci  $1,62 \text{ m/s}^2$  (Brož a kol., 2015). Tyto rozdíly v prostředí totiž mají výrazný dopad na průběh sopečné erupce i ukládání vyvrženého sopečného materiálu a tedy i vzhled výsledného kužele.

Prvním faktorem je hustota atmosféry (Glaze a Baloga, 2000; Wilson a Head, 2007). Na částice je v podmínkách hustší atmosféry kladen větší odpor, a tak nejsou schopny překonat větší vzdálenost (viz podkapitola 2.3). Druhým faktorem je velikost gravitační konstanty (Brož a kol., 2018), která má v případě Měsíce za následek nižší působení gravitační síly na letící částice, které tak doletí dále. Podmínky vzniku sypaných kuželů jsou tak velmi odlišné od Marsu nebo Země, ovšem pozorováním jiných těles ve Sluneční soustavě se ukázalo, že velmi podobné podmínky jako na Měsíci jsou na

Merkuru, kde ani u jednoho z těles není přítomna atmosféra (Brož a kol., 2018). V případě Měsíce však byly pozorovány kužele vzhledově podobné jako na Zemi, které vznikly sopečnou činností (Lawrence a kol., 2013).

Dopad absence atmosféry na vzhled pyroklastických uloženin byl nedávno popsán v práci Brože a kol. (2018), kdy se tým zaměřoval na průběh sopečných erupcí strombolského typu na povrchu Merkuru. Doložil, že se vyvrhovaný materiál bude ukládat na mnohem větší ploše, než na Marsu či Zemi, což ve výsledku nepovede ke vzniku kužele, ale pouze tenkého pokryvu povrchu pyroklastickým materiálem. Byl proveden výpočet, kdy byl uvažován stejný vyvržený objem materiálu na Marsu a na Merkur a vyšlo najevo, že objem  $4.2 \text{ km}^3$  pyroklastického materiálu se na Marsu rozprostře do vzdálenosti okolo 4,5 km od kráteru, kdežto v případě Merkuru je to 20 km od kráteru (Brož a kol., 2018). Výška tělesa na Marsu by pak byla v řádu stovek metrů, v případě Merkuru pak výpočet ukazuje maximální možnou výšku v hodnotě nad 100 m (viz obr. 13). K tomu, aby na takto velké ploše na Merkur vznikl topografický významný kužel, by bylo potřeba o několik řádů více vyvrženého materiálu, což se zdá být mimo možnosti tohoto typu sopečné činnosti.



Obrázek 13: Porovnání topografických profilů kuželů na Merkur a na Marsu, které by vznikly při vyvržení stejného množství materiálu na obou tělesech (převzato a upraveno z Brož a kol., 2018).

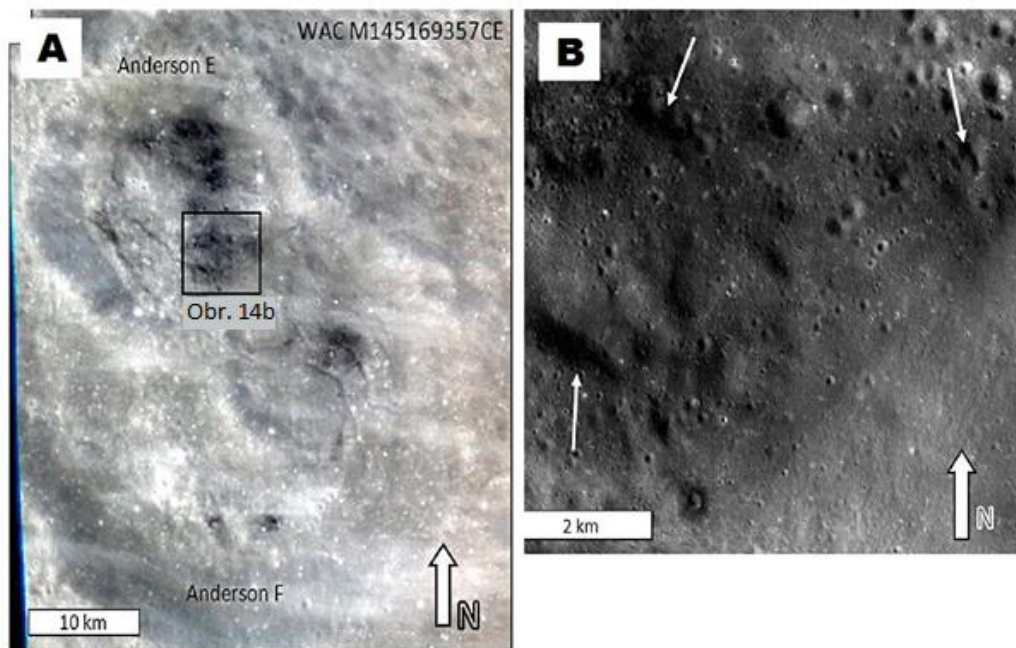
S ohledem na tento studii by se mohlo zdát, že by na Měsíci mohly panovat podobné podmínky rozptylu sopečného materiálu jako na Merkuru, vzhledem k tomu že obě tělesa mají nižší gravitaci a téměř nulovou atmosféru. Vyvrhované částice by tak namísto kuželovitých těles tvořily pouze tenký povrch pyroklastického materiálu rozprostřeným na velké ploše. Tyto uloženiny by mohly mít různou mocnost podle toho, jaké by bylo množství vyvrženého materiálu.

### 5.3 Pyroklastické deposity na Měsíci

Při pohledu na povrch Měsíce můžeme skutečně podobné pyroklastické uloženiny najít. Lze je najít v okolí měsíčních moří i vysočin, kde jsou důkazem sopečné činnosti po celém povrchu tělesa (Gustafson a kol., 2012).

Rozlišujeme dva základní typy měsíčních pyroklastických depositů, regionální a lokální, a to na základě jejich rozlehlosti (Gaddis a kol., 1985). Regionální deposity jsou rozlehlejší a vyskytují se častěji, přičemž jsou většinou na okrajích měsíčních moří. Předpokládá se, že vznikly havajským typem erupce v době sopečné aktivity formující měsíční moře (Head, 1974). Velikost regionálních pyroklastických depositů může být až 1000 km<sup>2</sup>. Lokalizované deposity jsou naproti tomu mnohem menší vzniklé pravděpodobně explozivním vulkanismem strombolského nebo vulkánského typu, kdy se uvolnilo náraz velké množství sopečných plynů (Head a Wilson, 1979; Hawke a Head, 1980; Hawke a kol., 1989). Velikost je od pár desítek do pár stovek km<sup>2</sup> (Gustafson a kol., 2012). Lokalizované deposity můžeme na měsíčním povrchu pozorovat v mnoha variantách, jako jsou rozpraskaná dna impaktních kráterů, přidružené k dalším typům depositů, nebo jako izolovaná naleziště v měsíčních vysočinách (Gaddis a kol., 1985; Hawke a kol., 1989).

Tyto deposity jsou často spojovány s frakturami v měsíční kůře (Bennet a kol., 2016), nebo existencí prasklin vně dna impaktních kráterů (Gustafson a kol., 2012). Jsou to oblasti, kde došlo ke ztenčení kůry a magma tak mohlo lépe proudit na povrch Měsíce, jako např. v oblastech impaktních kráterů Anderson E a Anderson F (viz obr. 14; Gustafson a kol., 2012). Pyroklastické deposity jsou tvořeny tzv. *Dark Mantle Deposits*, kde se jedná o jemný materiál, který vznikl nejspíše lávovými fontánami při havajských stylech erupce (Wilson a Head, 1981). Kromě těchto komponent mohou deposity také obsahovat velké množství částic sopečného skla, vzniklých z malých kapek vyvrhnuté lávy, která rychle zchladla během letu v suchém a chladném prostředí Měsíce (Head a Wilson, 1992). Sklo je mimo deposity jako takové pozorováno i v okolí kuželovitých těles, jako například v případě kráteru Oppenheimer (Bennet a kol., 2016) nebo Marius Hills (Lawrence a kol., 2013).



Obrázek 14: Pyroklastické uloženiny typu *Dark Mantle Deposits* v okolí impaktních kráterů Anderson E a Anderson F na povrchu Měsíce. Bílé šipky na obrázku (b) ukazují pravděpodobné krátery měsíčních sopek (převzato a upraveno z Gustafson a kol., 2012).

Četná přítomnost pyroklastických uloženin na povrchu Měsíce tak dokládá, že pyroklastický materiál byl snadno vyvrhován do širokého okolí. Přesto se v podmínkách Měsíce daří nacházet i kuželovité útvary. Nabízí se několik možností, jak tato pozorování vysvětlit.

Tvar produktů explozivního vulkanismu ovlivňuje obsah vyvrženého materiálu, rychlost částic při vylétávání z kráteru, velikost částic nebo úhel, při kterém vylétávají částice z kráteru (viz podkapitola 2.3). Na Měsíci se vlivem nižší gravitace a téměř nulové atmosféry tvoří při sopečných erupcích pyroklastické deposity, ovšem za určitých podmínek se mohou tvořit i akumulace pyroklastik ve tvaru kužele. Toho může být docíleno například fragmentací magmatu ve větších hloubkách (viz podkapitola 2.2), kdy jsou následně částice vystřelovány téměř vertikálně, a následkem toho se usazují nedaleko svého zdroje vylétnutí (Wilson a Head, 1981). Toto by mělo za následek vytvoření kuželovité struktury, která by se mohla následně rozšiřovat do stran po naplnění svého sypného úhlu. Další možností, jak by na Měsíci vznikly kužele namísto pyroklastického depositu je menší rychlost vylétnutí sopečných částic z kráteru (viz podkapitola 2.3). Proto, kdyby byla počáteční rychlost částice nižší, nedolétla by tak daleko od svého zdroje, a začala by formovat kuželovité těleso poblíž kráteru, stejně jako v případě fragmentace magmatu ve větší hloubce. Kužel by také mohl vzniknout následkem vyvržení extrémního množství pyroklastického materiálu.

Výše uvedené argumenty tak nabízejí možnost, že pokud v oblastech, kde se vyskytují sypané kužele, proběhla fragmentace magmatu v menší hloubce, nebo by počáteční rychlost částic byla vyšší, s největší pravděpodobností by sopečná erupce zanechala rozlehlý pyroklastický deposit lokálního charakteru namísto kuželovitého tělesa, které zde pozorujeme. Je tak možné, že místa, kde se možné měsíční sypané kužele nachází, představují oblasti se ztenčenou kůrou, výskytem plášťových plum či geochemických anomálií. Tyto hypotézy by nejspíše potvrdil až výzkum *in situ*.

## 6. ZÁVĚR

V této rešerši byly popsány měsíční lokality s výskytem kuželovitých těles. Zjistil jsem, že se kužele mohou vyskytovat ve formě sopečných polí, i jako samostatná tělesa, vyskytující se v okolí impaktních kráterů. Byly popsány jednotlivé morfologické typy kuželů i s možnými mechanismy vzniku, které se od sebe mohou lišit na základě rozdílné struktury podloží. V rozpukaném masivu by pravděpodobně vznikl protažený typ E charakteristický svým protažením, popřípadě by na nerovném povrchu mohly vzniknout asymetrické kužele. V opačném případě by nejspíše vznikaly kužele typu N a C, které se od sebe liší pouze výklenkem svahu po vytečení lávy. Některé kuželovité objekty také nemusely vznikat sopečnou činností vůbec. Tímto případem je například lokalita Lassel, kde byl popsán kužel, který by mohl být degradovaným impaktním kráterem. Označovat tělesa vzniklá sopečnou činností by mohla např. přítomností kamenitých bloků nebo přítomností sopečného skla.

Následně jsem srovnal základní parametry měsíčních kuželů s obdobnými tělesy na Zemi a na Marsu a vyšlo najevo, že vlivem různorodých fyzikálních podmínek mají kužele na jednotlivých tělesech různé výšky, průměry základen a sklony svahů. Hlavními faktory, které mají na tyto parametry vliv, jsou hustota, respektive existence atmosféry v případě Měsíce, a velikost gravitační konstanty. Tyto dva činitele ovlivňují hlavně rychlost a úhly vylétávajících částic, které mají následně vliv na to, jaký tvar bude výsledná akumulace pyroklastického materiálu mít. V případě že je rychlost vylétávajících částic vyšší, doletí částice mnohem dále od svého kráteru, a materiál se rozprostře na větší ploše. Toto platí i v případě, že budou úhly vylétávajících částic menší. Nižší gravitační konstanta má pak v případě Měsíce vliv na to, že na letící částice působí menší gravitační síla, a ty pak také překonají větší vzdálenosti. V těchto případech tak namísto kuželovitých těles vznikají rozsáhlé deposity pyroklastického materiálu, které mohou mít rozlohu až stovek kilometrů čtverečních, a které jsou pozorovány po celém povrchu Měsíce. V případě lokalit kde se nacházejí kužele, tak může převládat fragmentace magmatu ve větších hloubkách, nebo jsou výletové rychlosti částic nižší.

## 7. POUŽITÁ LITERATURA

Anderson S.W., Stofan E.R., Plaut J.J., Crown D.A., 1998. Block size distributions on silicic lava flow surfaces: Implications for emplacement conditions. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 110(10): 1258–1267.

Ashley J.W., Robinson M.S., Stopar J.D., Glotch T.D., Hawke B.R., van der Bogert C.H., Hiesinger H., Lawrence S.J., Jolliff B.L., Greenhagen B.T., Giguere T.A., Paige D.A., 2016. The Lassell massif—A silicic lunar volcano. *Icarus*, 273: 248–261.

Bennett K.A., Horgan B.H.N., Gaddis L.R., Greenhagen B.T., Allen C.C., Hayne P.O., Bell III J.F., Paige, D. A., 2016. Complex explosive volcanic activity on the Moon within Oppenheimer crater. *Icarus*, 273: 296–314.

Braden S.E., Stopar J.D., Robinson M.S., Lawrence S.J., van der Bogert C.H., Hiesinger H., 2014. Evidence for basaltic volcanism on the Moon within the past 100 million years. *Nature Geoscience*, 7(11). 787–791.

Brož P., Hauber E., 2012. A unique volcanic field in Tharsis Mars: Pyroclastic cones as evidence for explosive eruptions. *Icarus*, 218: 88–99.

Brož P., Čadek O., Hauber E., Rossi A.P., 2014. Shape of scoria cones on Mars: Insights from numerical modeling of ballistic pathways. *Earth and Planet. Science Let.*, 406: 14–23.

Brož P., Čadek O., Hauber E., & Rossi A. P., 2015. Scoria cones on Mars: Detailed investigation of morphometry based on high-resolution digital elevation models. *J. Geophys. Res.: Planets*, 120: 1512–1527.

Brož P., Čadek O., Wright J., Rothery D.A., 2018. The Apparent Absence of Kilometer-Sized Pyroclastic Volcanoes on Mercury: Are We Looking Right? *Geophys. Res. Letters*. 45

Chauhan M., Bhattacharya S., Saran S., Chauhan P., Dagar A., 2015. Compton–Belkovich Volcanic Complex (CBVC): An ash flow caldera on the Moon. *Icarus*, 253: 115–129.

Cole G.H.A., Woolfson M.M., 2013. *Planetary Science: The Science of Planets Around Stars*. CRC Press, 561 str.

Corazzato C., Tibaldi A., 2006. Fracture control on type, morphology and distribution of parasitic volcanic cones: An example from Mt. Etna, Italy. *J. Volc. Geotherm. Res.*, 158: 177–194.

Dohrenwend J.C., Wells S.G., Turrin B.D., 1986. Degradation of Quaternary cinder cones in the Cima volcanic field, Mojave Desert, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 97: 421–427.

Gaddis L.R., Pieters C.M., Hawke B.R., 1985. Remote sensing of lunar pyroclastic mantling deposits. *Icarus*, 61: 461–489.

Glaze L. S., Baloga S. M., 2000. Stochastic–ballistic eruption plumes on Io. *J. of Geophys. Res.*, 105(E7): 17579–17588.

Gustafson J.O., Bell III J.F., Gaddis L.R., Hawke B.R., Giguere T.A., 2012. Characterization of previously unidentified lunar pyroclastic deposits using Lunar Reconnaissance Orbiter Camera data. *J. Geophys. Res.*, 117: 1–21.

Harrison K.P., Chapman M.G., 2008. Evidence for ponding and catastrophic floods in central Valles Marineris Mars. *Icarus*, 198: 351–364.

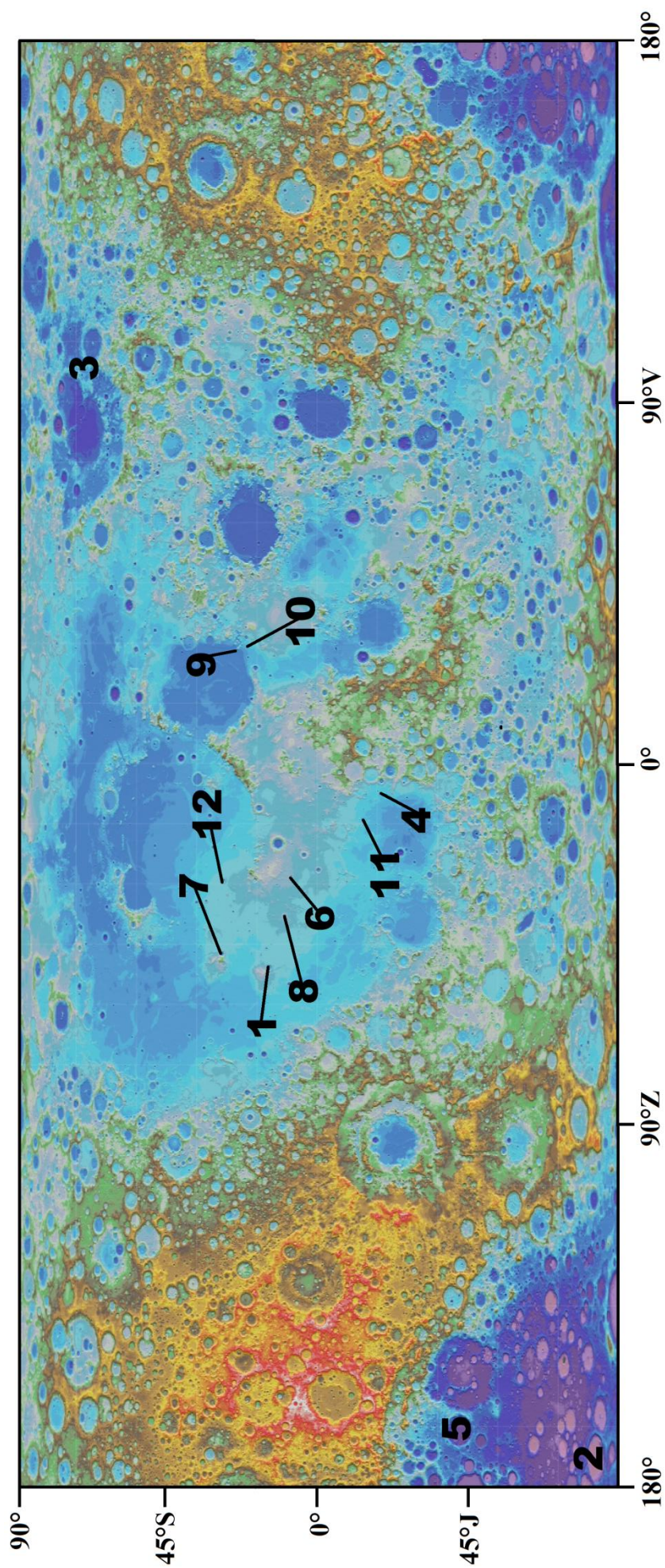
- Hartmann W.K., Davis D.R., 1975. Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus*, 24(4): 504–515.
- Hawke B.R., Head III J.W., 1980. Small dark-mantle deposits of possible pyroclastic origin: Geologic setting, composition, and relation to regional stratigraphy. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 11th, 1980, str. 416–417.
- Hawke B.R., Coombs C.R., Gaddis L.R., Lucey P.G., Owensby P.D., 1989. Remote sensing and geologic studies of localized dark mantle deposits on the Moon, *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 19th, 1989, str. 255–268.
- Head III J.W., 1974. Lunar dark-mantle deposits: Possible clues to the distribution of early mare deposits. *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 5th, 1974, str. 207–222.
- Head III J.W., Wilson L., 1979. Alphonsus-type dark-halo craters: Morphology, morphometry and eruption conditions. *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 10th, 1979, str. 2861–2897.
- Head III J.W., Wilson L., 1992. Lunar mare volcanism: Stratigraphy, eruption conditions, and the evolution of secondary crusts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(6): 2155–2175.
- Head III J.W., Wilson L. 1993. Lunar graben formation due to near surface deformation accompanying dike emplacement. *Planet. Space Sci.*, 41(10): 719–727.
- Head III J.W., Wilson L., Weitz C.M., 2002. Dark ring in southwestern Orientale Basin: Origin as a single pyroclastic eruption. *J. Geophys. Res.*, 107(E1).
- Head III J.W., Wilson L., 2017. Generation, ascent and eruption of magma on the Moon: New insights into source depths, magma supply, intrusions and effusive/explosive eruptions (Part 2: Predicted emplacement processes and observations). *Icarus*, 283: 176–223.
- Jolliff B.L., Wiseman S.A., Lawrence S.J., Tran T.N., Robinson M.S., Sato H., Hawke B.R., Scholten F., Oberst J., Hiesinger H., van der Bogert C.H., Greenhagen B.T., Glotch T.D., Paige D.A., 2011. Non-mare silicic volcanism on the lunar farside at Compton–Belkovich. *Nature Geoscience*, 4(8): 566–571.
- Kereszturi G., Németh K., 2013. Monogenetic basaltic volcanoes: Genetic classification, growth, geomorphology and degradation. *Updates in volcanology—New advances in understanding volcanic systems*, Kap. 1: 3–89.
- Kumar P.S., Lakshmi K. J.P., Krishna N., Menon R., Sruthi U., Keerthi V., Kumar A.S., Mysaiah D., Seshunarayana T., Sen M. K., 2014. Impact fragmentation of Lonar Crater, India: Implications for impact cratering processes in basalt. *J. Geophys. Res.: Planets*, 119(9): 2029–2059.
- Lanz J.K., Wagner R., Wolf U., Kröcher J., Neukum G., 2010. Rift zone volcanism and associated cinder cone field in Utopia Planitia, Mars. *J. Geophys. Res.*, 115(E12).
- Lawrence S.J., Stopar J.D., Hawke B.R., Greenhagen B.T., Cahill J.T.S., Bandfield J.L., Jolliff B.L., Denevi B.W., Robinson M.S., Glotch T.D., Bussey D.B.J., Spudis P.D., Giguere T.A., Garry W.B., 2013. LRO observations of morphology and surface roughness of volcanic cones and lobate lava flows in the Marius Hills. *J. Geophys. Res.*, 118: 615–634.
- Mazzarini F., Armienti P., 2001. Flank Cones at Mount Etna Volcano: Do they have a power-law distribution? *Bulletin of Volcanology*, 62(6-7): 420–430.
- McGetchin T.R., Ullrich G.W., 1973. Xenoliths in Maars and Diatremes with inferences for the Moon, Mars, and Venus. *J. Geophys. Res.*, 78(11): 1833–1853.

- McGetchin T.R., Settle M., Chouet B.A., 1974. Cinder cone growth modelled after North East crater Mt Etna, Sicily. *J. Geophys. Res.*, 79: 3257–3272.
- McSween H.Y., Huss G.R., 2010. *Cosmochemistry*. Cambridge University Press, 549 str.
- Mehta A., Barker G.C., 1994. The dynamics of sand. *Reports on Progress in Physics*, 57(4): 383.
- Meresse S., Costard F., Mangold F., Masson P., Neukum G., HRSC Co-I Team, 2008, Formation and evolution of the chaotic terrains by subsidence and magmatism: Hydraotes Chaos Mars. *Icarus*, 194: 487–500.
- Porter S.C., 1972. Distribution, morphology, and size frequency of cinder cones on Mauna Kea Volcano, Hawaii. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 83: 3607–3612.
- Riedel C., Ernst G.G.J., Riley M., 2003. Controls on the growth and geometry of pyroclastic constructs. *J of Volc. and Geoth. Res.*, 127(1-2): 121–152.
- Saunderson H.C., 2008. Equations of motion and ballistic paths of volcanic ejecta. *Comp. Geosciences*, 34: 802–814.
- Sherwood A.E., 1967. Effect of air drag on particles ejected during explosive cratering. *J. Geophys. Res.*, 72(6): 1783–1791.
- Solomon S.C., Comer R.P., Head III J.W., 1982. The evolution of impact basins: viscous relaxation of topographic relief. *J. Geophys. Res.*, 87: 3975–3992.
- Sparks R.S.J., 1978. The dynamics of bubble formation and growth in magmas: A review and analysis. *J. Volcan. and Geoth. Res.*, 3(1-2): 1–37.
- Sruthi U., Kumar P.S., 2014. Volcanism on farside of the Moon: New evidence from Antoniadi in South Pole Aitken basin. *Icarus*, 242: 249–268.
- Stopar J.D., Robinson M.S., Lawrence S.J., Hawke B.R., Gaddis L., Giguere T.A., Sato H., Sutton S., the LROC Team, 2015. Interpretations Of Volcanic Deposits Associated With Small Lunar Cones. *46th Lunar and Planetary Science Conference*, Texas, USA, March 16-20, 2015
- Sutawidjaja I., Sukhyar R., 2009. Cinder cones of Mount Slamet, Central Java, Indonesia. *J. Geol. Indonesia*, 4(1): 57–75.
- Vespermann D., Schmincke H.U., 2000. Scoria Cones and Tuff Rings. In: Sigurdsson H. (ed.) *Encyclopedia of Volcanoes*. 1<sup>st</sup> ed., Academic Press, str. 683-694.
- Warren P.H., 2001. Compositional structure within the lunar crust as constrained by Lunar Prospector thorium data. *Geophys. Res. Letters*, 28(13): 2565–2568.
- Weitz C.M., Head III J.W., 1999. Spectral properties of the Marius Hills volcanic complex and implications for the formation of lunar domes and cones. *J. Geophys. Res.*, 104(E8): 18933–18956.
- Wilson J.T., 1963. Hypothesis of earth's behaviour. *Nature*, 198 (4884): 925–929.
- Wilson L.W., Head III J.W., 1981. Ascent and eruption of basaltic magma on the Earth and Moon, *J. Geophys. Res.*, 86: 2971–3001.
- Wilson L., Head III J.W., 2007. Explosive volcanic eruptions on Mars: Tephra and accretionary lapilli formation, dispersal and recognition in the geologic record. *J Volcan. and Geothem. Res.*, 163(1-4): 83–97.

Whitford-Stark J.L., Head III J.W., 1977. The Procellarum volcanic complexes—Contrasting styles of volcanism, in *Proc. Lun. Plan. Sci. Conf.*, vol. 8, Pergamon Press and Lunar and Planetary Institute, Houston, str. 2705–2724.

Wöhler C., Lena R., Lazzarotti P., Phillips J., Wirths M., Pujic, Z., 2006. A combined spectrophotometric and morphometric study of the lunar mare dome fields near Cauchy, Arago, Hortensius, and Milichius. *Icarus*, 183(2): 237–264.

# PŘÍLOHA - TOPOGRAFICKÁ MAPA MĚSÍCE S VYZNAČENÝMI KUŽELY



Příloha: Na topografické mapě Měsíce jsou zakresleny polohy měsíčních kuželů popsaných v rešeršní práci. Bod označuje (1) Marius Hills, (2) Antoniadi, (3) sopečný komplex Compton-Belkovich, (4) kráter Lassel, (5) kráter Oppenheimer, (6) komplex Hortensius-Tobias Meyer, (7) kráter Aristarchus, (8) kráter Milichius, (9) kráter Isis, (10) kráter Osiris, (11) Rimaie Parry, (12) Euler. (Podkladová mapa byla převzata z <https://airandspace.si.edu/multimedia-gallery/11850hjpg>, 2019).