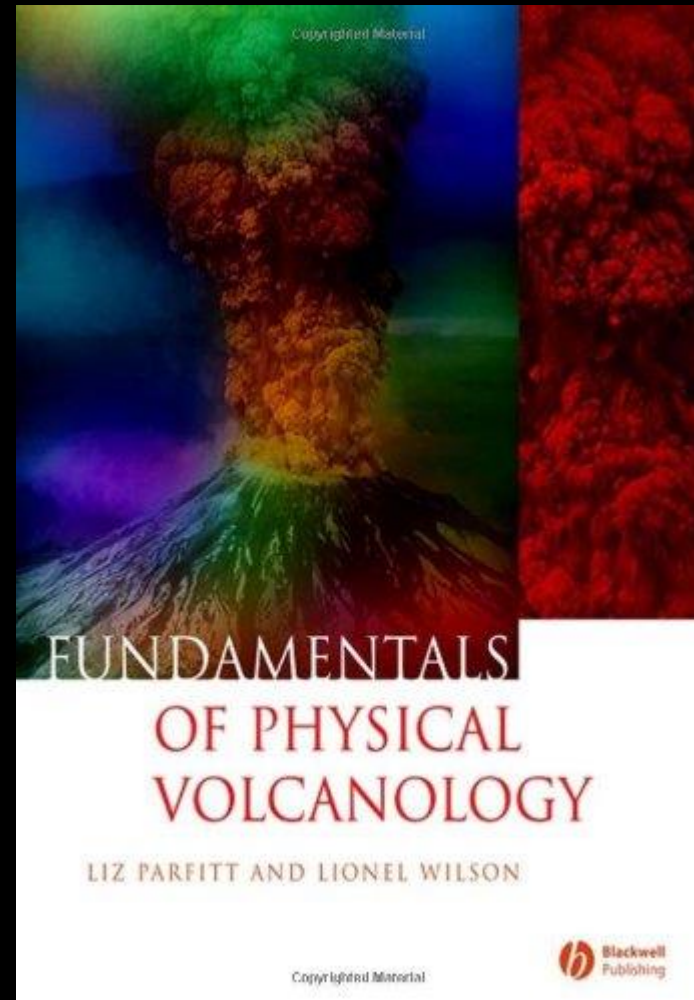
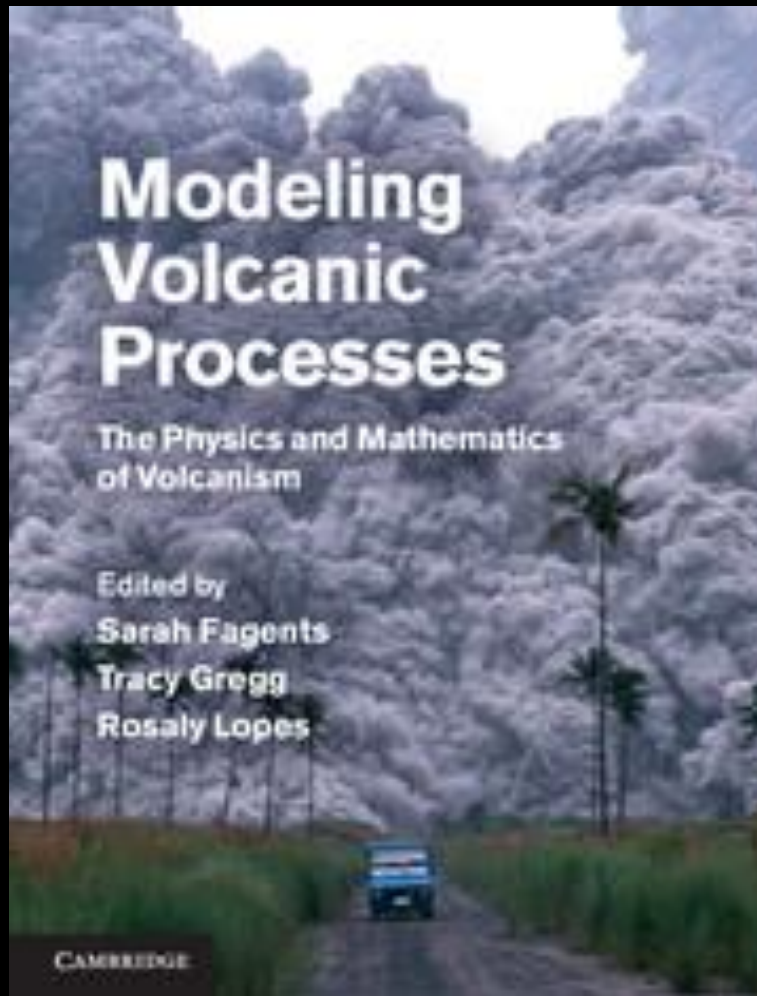




Měsíc

základní představení

- Zkoumán od nepaměti
 - Světlé a tmavé oblasti
- Průměr 3476 km (0,273 Země)
- Střední hustota 3,34 g/cm³
(Země 5,51 g/cm³)
- Gravitace na rovníku
1,622 m/s² (0,1654 g)
- Vázaná rotace
- Těleso bez atmosféry
- Jediné těleso ve Sluneční soustavě (vyjma Země), u kterého víme, odkud pochází zkoumané vzorky...

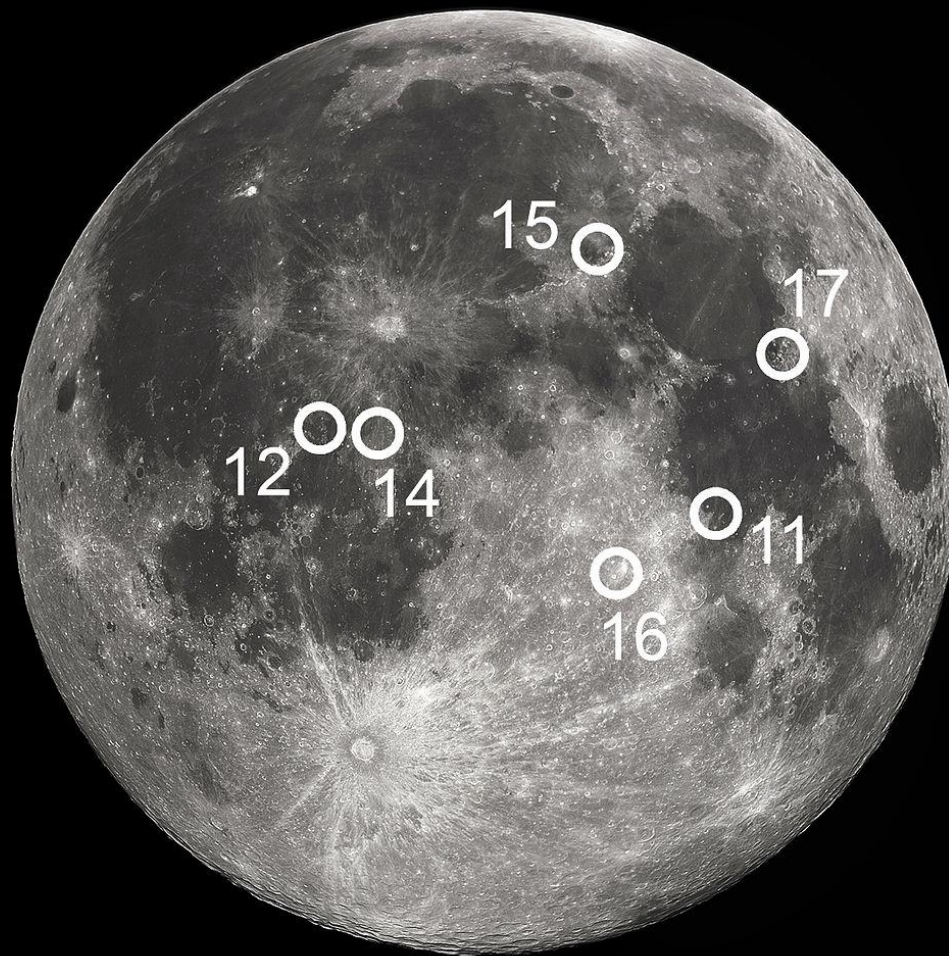


Přistání člověka na Měsíci



Geologické kladivo!!!

Místa přistání misí Apollo



Celkem přivezeno 2200 úlomků o hmotnosti 382 kg (navíc 300 gramů ze 3 dalších míst dovezly sovětské Luny)

Apollo 11

A zase ten bazalt...

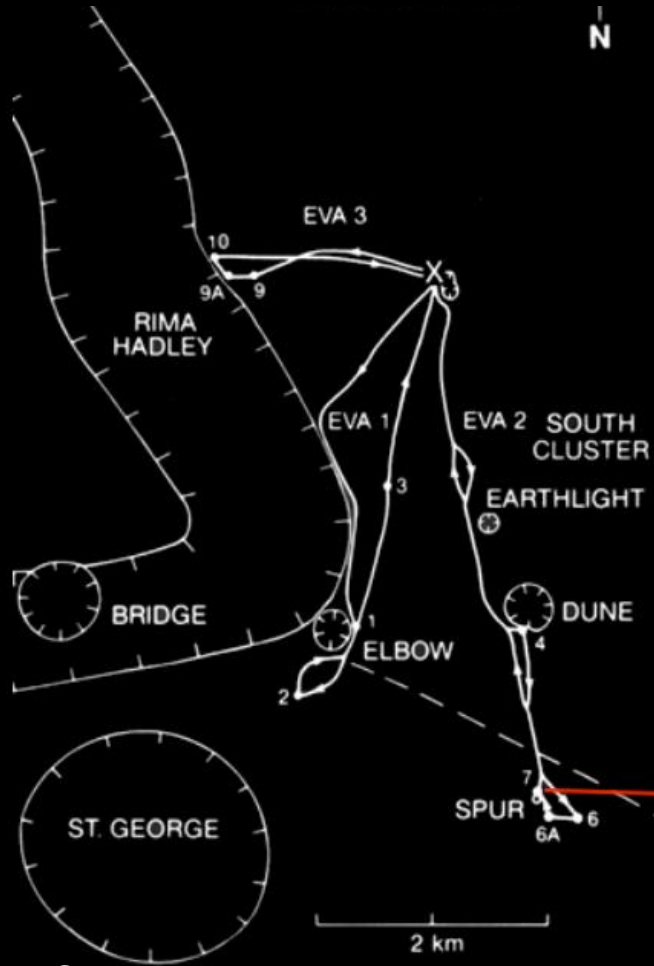


NASA

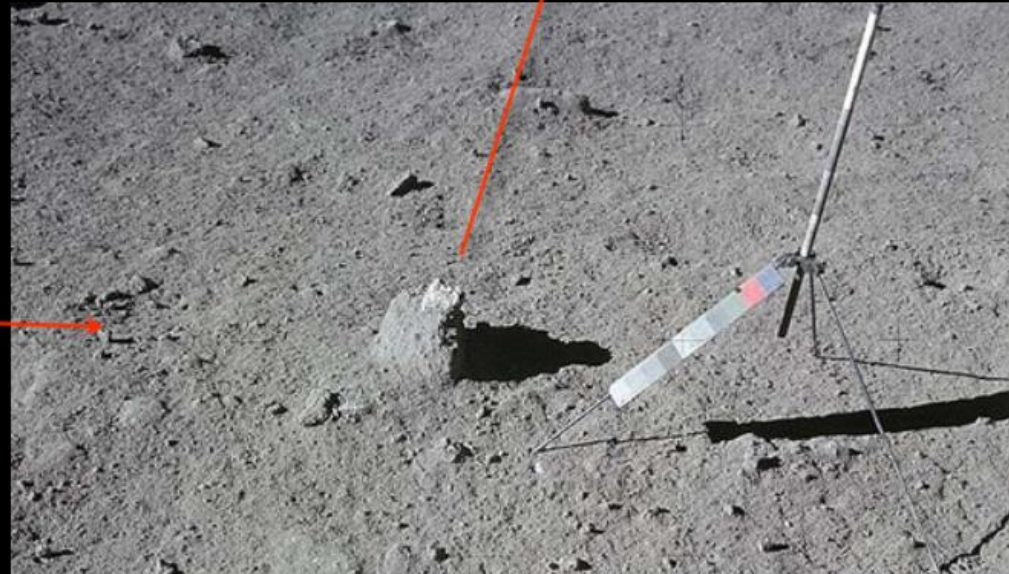
10049,0

... v doprovodu s anortozitem

Intruzivní hornina tvořená převážně jen živci (90 až 100 %) a naprostým minimem mafických (tmavých) minerálů

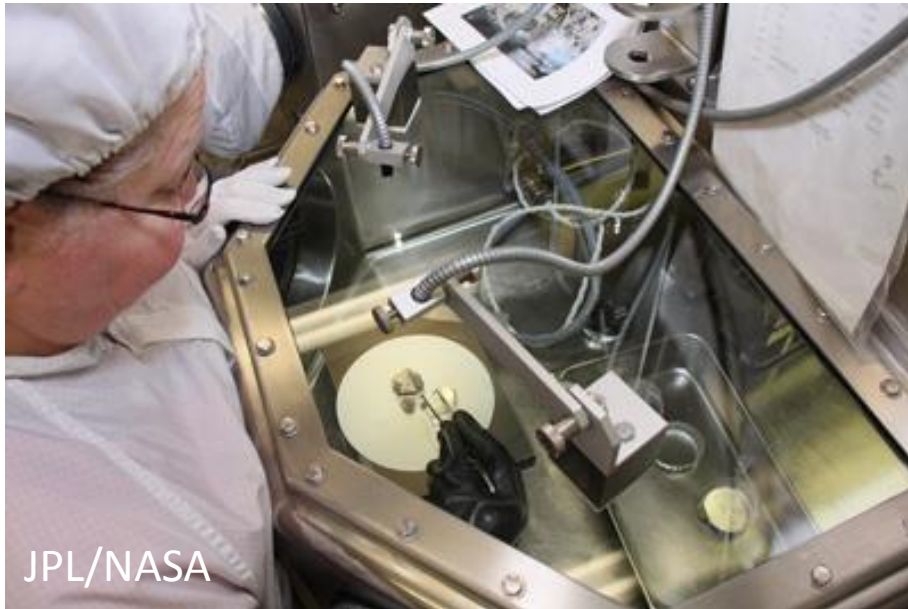


8 cm across

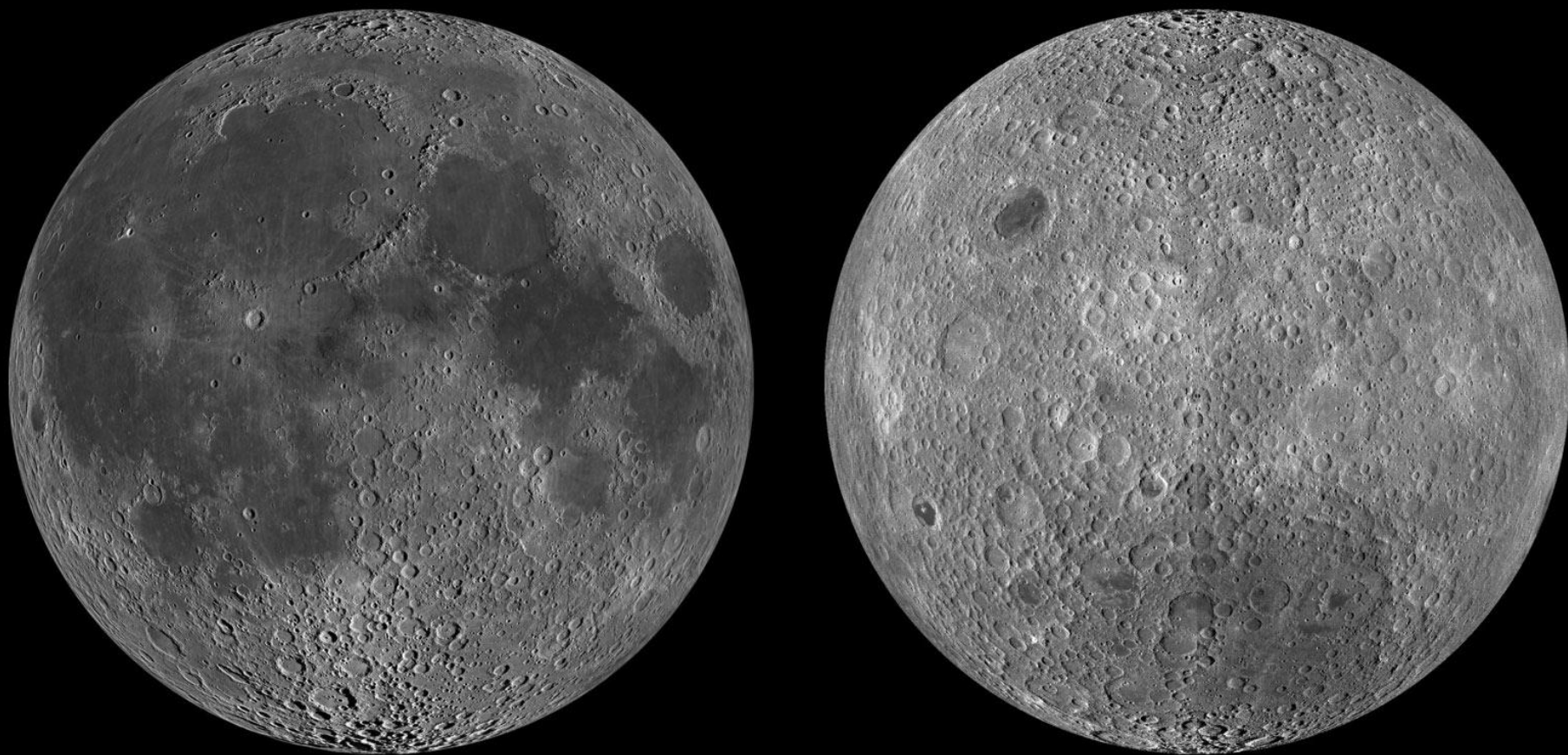


Určení stáří měsíčních vzorků

- Návrat vzorků z Měsíce umožnil detailní průzkum v pozemských laboratořích, včetně určení stáří za pomoci přirozeného rozpadu radioaktivních prvků
 - Anortozity starší (4,56 až 4,29 Ga)
 - Bazalty mladší (4,2 až 1,2 Ga)



Tmavé oblasti tvořené bazaltem, světlé anortozitem



Petrologem na vzdálenost 384 400 km...

Měsíční moře

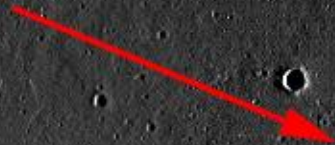
(mare)

- Moře rozloženy nerovnoměrně
- Celkově pokrývají přibližně $7 \times 10^6 \text{ km}^2$ (17 % povrchu Měsíce)
- 31,2 % přivrácené strany,
- Jen 2,6 % strany odvrácené

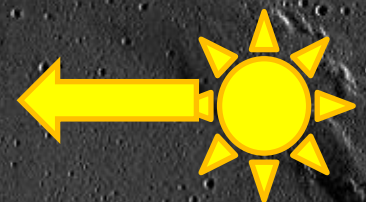


Co tvoří měsíční moře?

Lávové proudy



- Dlouhé až tisíce kilometrů
- Materiál o extrémně nízké viskozitě
- Různé bazaltové složení měnící se v čase



Stáří měsíčních moří

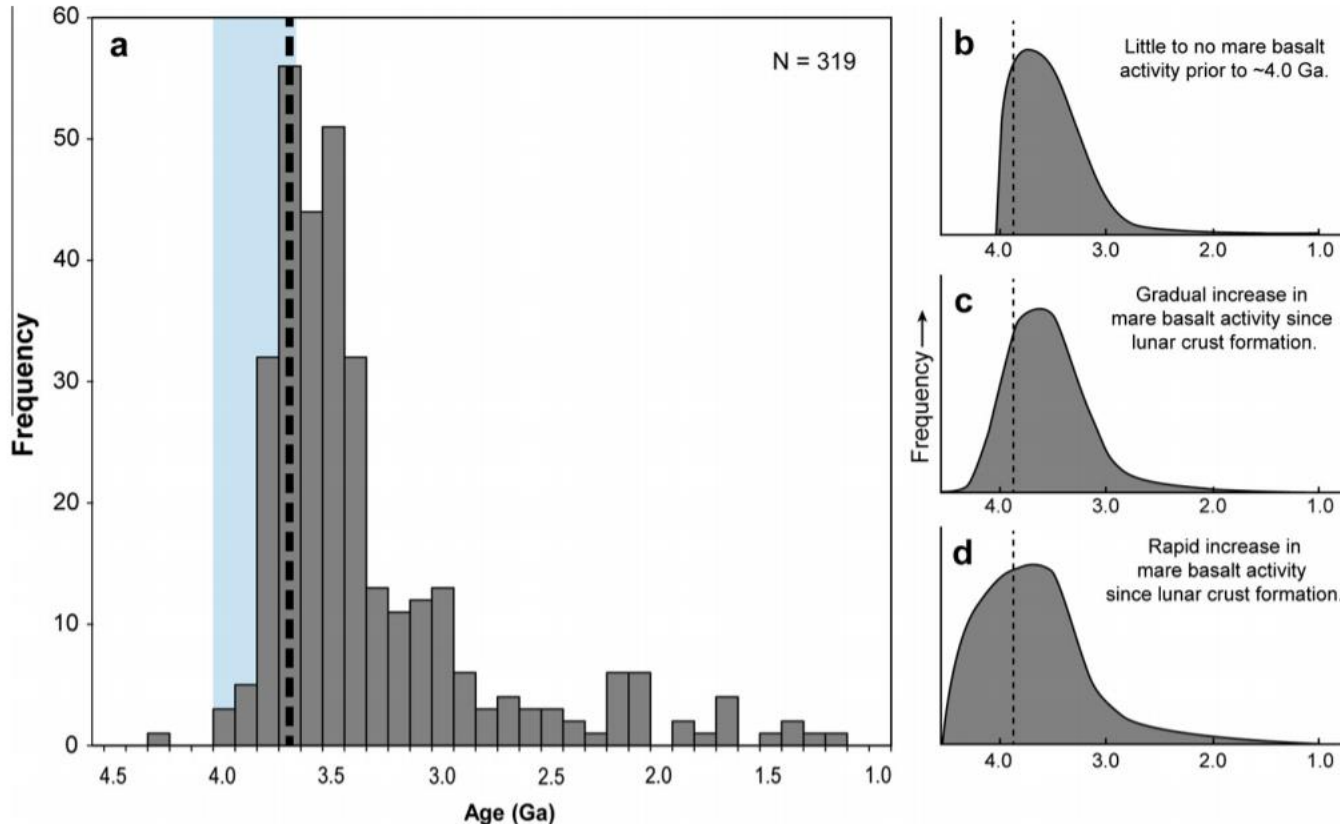


Fig. 1. (a) Histogram of model ages (gray bars) of surficial mare deposits, derived from crater size–frequency distributions (Hiesinger et al., 2011; Whitten et al., 2011). ‘N’ represents the number of ages included in the histogram. The start of exposed mare basalt emplacement appears to occur abruptly at ~3.8 Ga and slowly trails off over the next 2.5 Gy. Most of the mare basalts were erupted during a peak of volcanic activity 3.7 Ga, the mode of this mare basalt age distribution (vertical dashed black line). The average mare basalt age, based on these data, is 3.3 Ga. Vertical blue band represents the range of inferred isotope ages for impact basins derived from returned lunar samples: Orientale = 3.72–3.85 Ga, Imbrium = 3.77–3.91 Ga, Crisium = 3.84–3.89 Ga, Serenitatis = 3.87–3.98 Ga, and Nectaris = 3.85–4.10 Ga. Basin ages are from Stöffler et al. (2006). (b)–(d) Three scenarios for the eruption of ancient mare basalts. Dashed vertical line denotes 3.9 Ga. (b) Mare basalts began to rapidly erupt onto the lunar surface around 4.0 Ga. (c) Mare basalts began erupting onto the surface shortly after lunar crustal formation, with production peaking around 3.7 Ga. (d) Mare basalts began to rapidly erupt onto the lunar surface shortly after crustal formation and continued to erupt at a high rate until ~3.4 Ga. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Cryptomaria

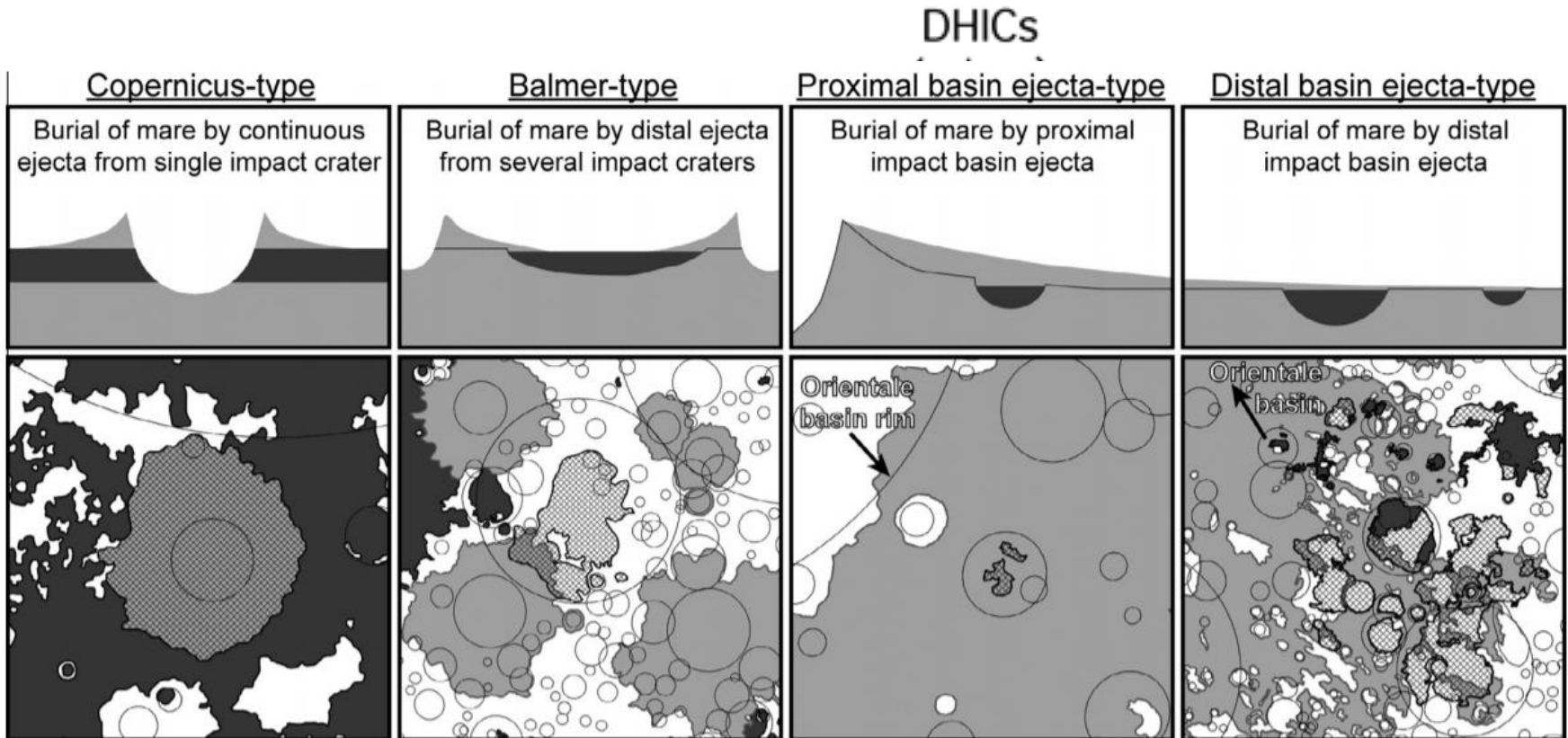


Fig. 3. Diagram of the four distinct types of cryptomaria (Copernicus-type, Balmer-type, proximal basin ejecta-type, and distal basin ejecta-type) that are formed by different processes. Cross-section (top row) and map-view (bottom row) diagrams of each formation process. Maria are indicated by dark gray, high-albedo ejecta are shown in light gray, impact crater rims (>20 km) are delineated by black circles, and cryptomaria are shown as hatched shapes. Highland regions are shown in white.

Cryptomaria

- Pokrývají 1,8 % povrchu Měsíce [Whitten a Head, 2015](#)
- Měsíční moře jsou tak rozšířenější, než se zdá

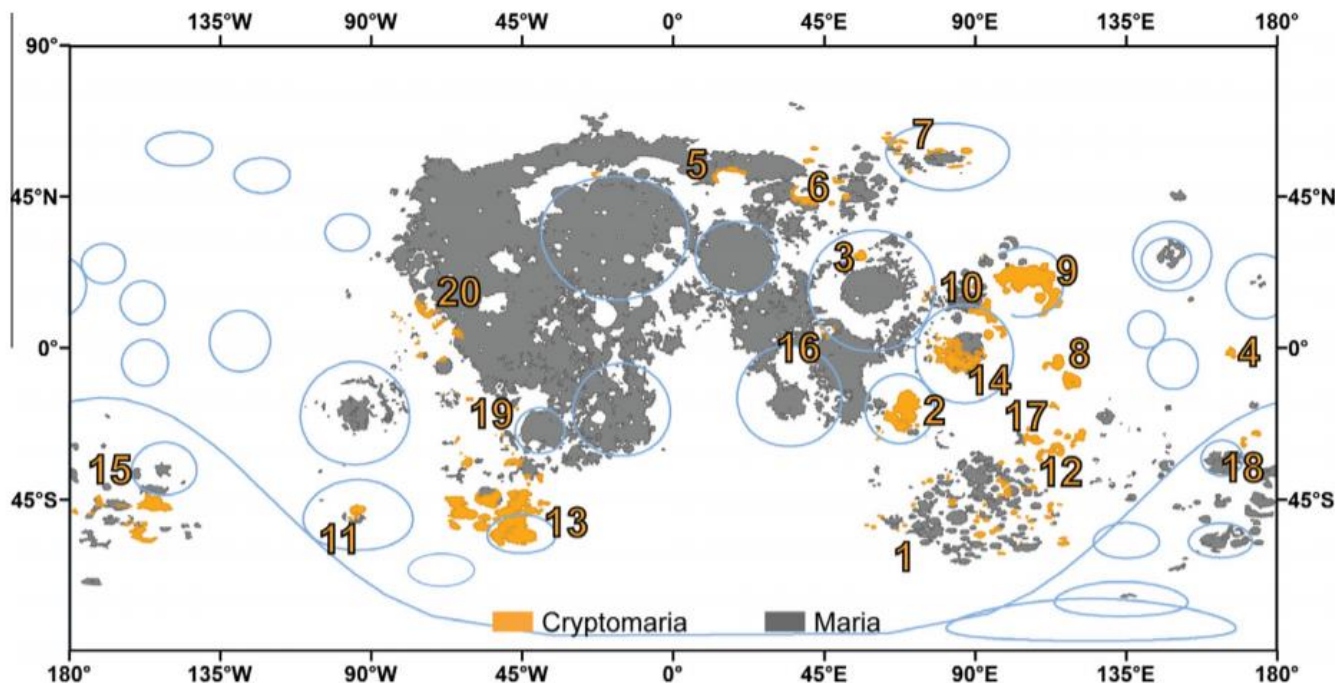


Fig. 5. The distribution of the cryptomaria deposits (orange) confirmed in this study. This figure shows how the cryptomaria increase the areal coverage of basalts more extensively in the eastern hemisphere (a 2.6% increase in areal coverage of basalts), compared to the western hemisphere (a 1.0% increase). Numbers correspond to the identified cryptomaria listed in [Table 2](#). Maria are shown in gray ([Wilhelms and McCauley, 1971](#); [Scott et al., 1977](#); [Wilhelms and El-Baz, 1977](#); [Lucchitta, 1978](#); [Stuart-Alexander, 1978](#); [Wilhelms et al., 1979](#)) and basins are shown in blue ([Wilhelms and El-Baz, 1977](#); [Maxwell and Andre, 1981](#); [Head et al., 2010](#)). See [Fig. 6](#) for a detailed view of each cryptomare region. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Stáří měsíčních moří včetně pohřbených

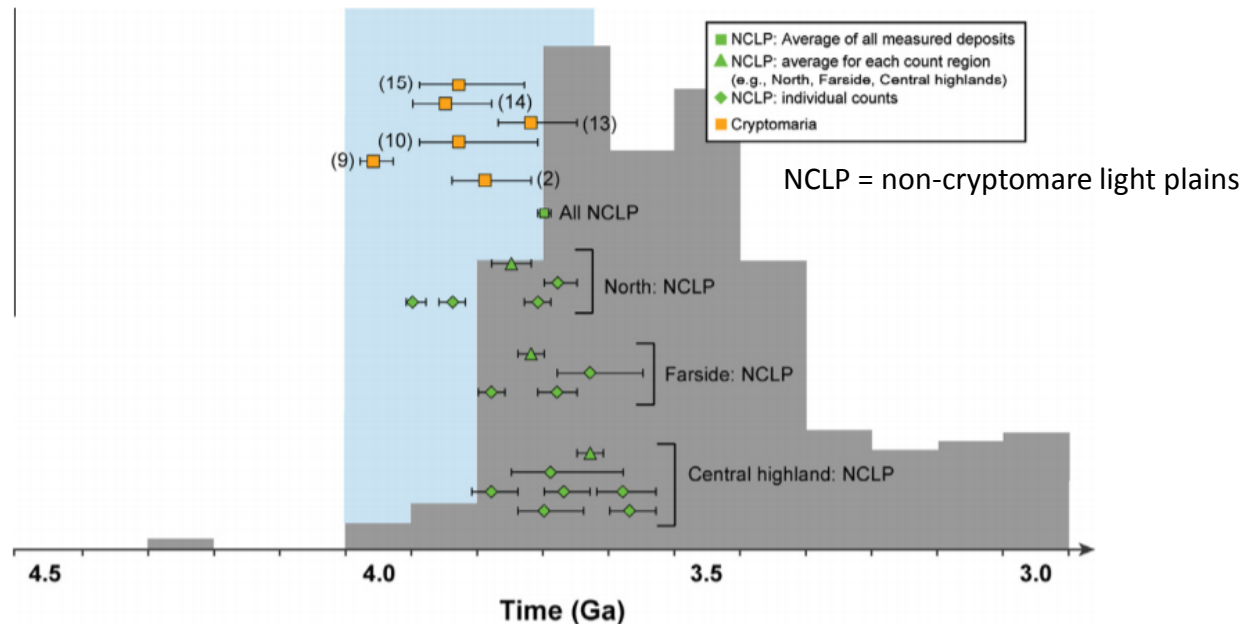
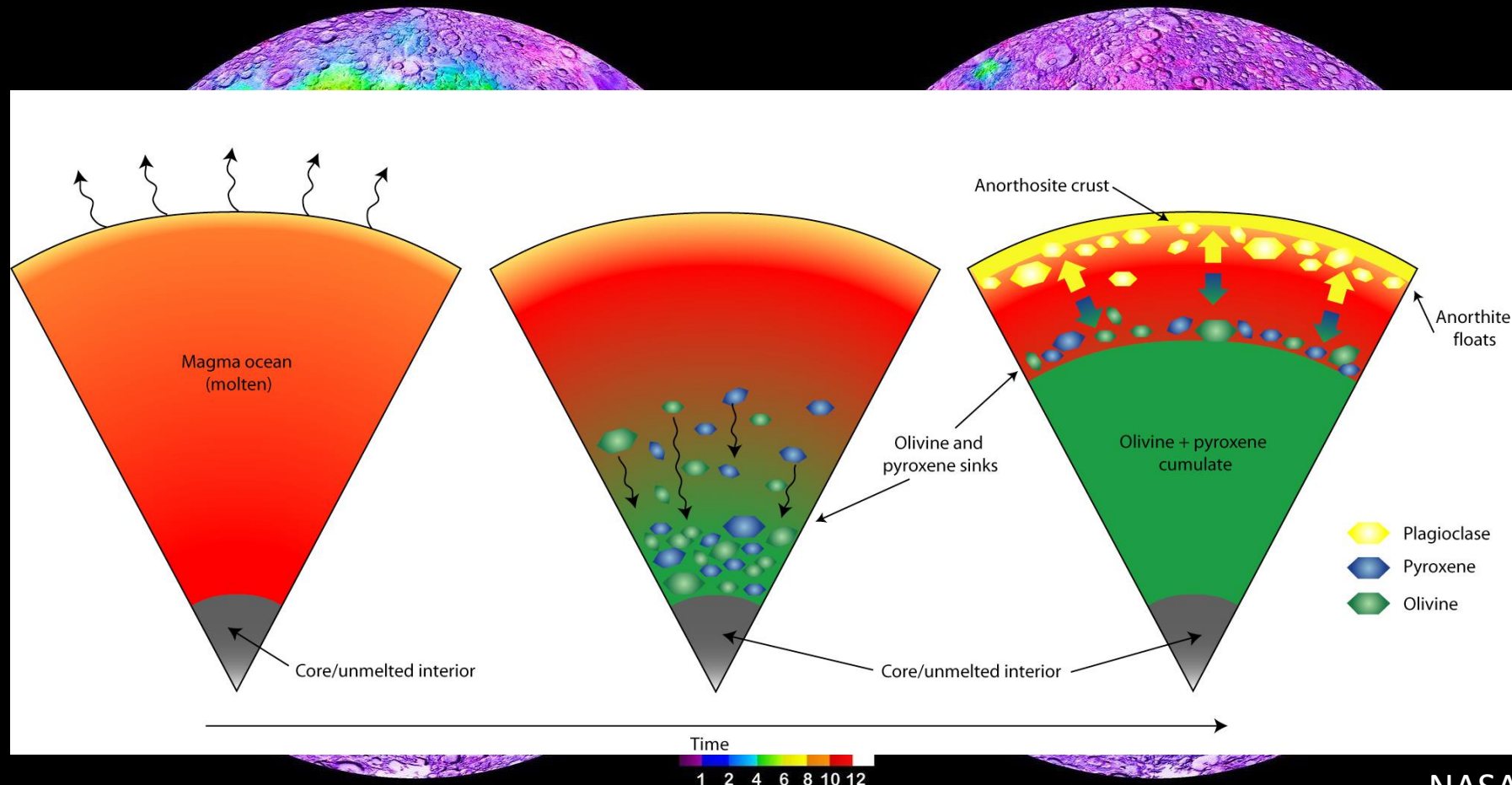


Fig. 13. Model ages determined for large continuous cryptomaria (orange symbols; Table 2) and the NCLP (green symbols; Fig. S1, Table 3). Cryptomare data are labeled by number (Fig. 4, Table 2). The diamond symbols represent the model age for each individual NCLP deposit measured (blue outlines in Fig. S1b–d) and the triangles represent the average age for all deposits within a defined count region (north, farside, or central highland). The green square is the average model age for all measured NCLP. See Tables 2 and 3 for specific model ages and associated errors. The histogram (light gray) of exposed mare basalt ages (Fig. 1) is superposed for comparison and the blue field represents the range of predicated basin ages for Nectaris, Serenitatis, Crisium, Imbrium, and Orientale (from Fig. 1). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Vznik měsíčních moří



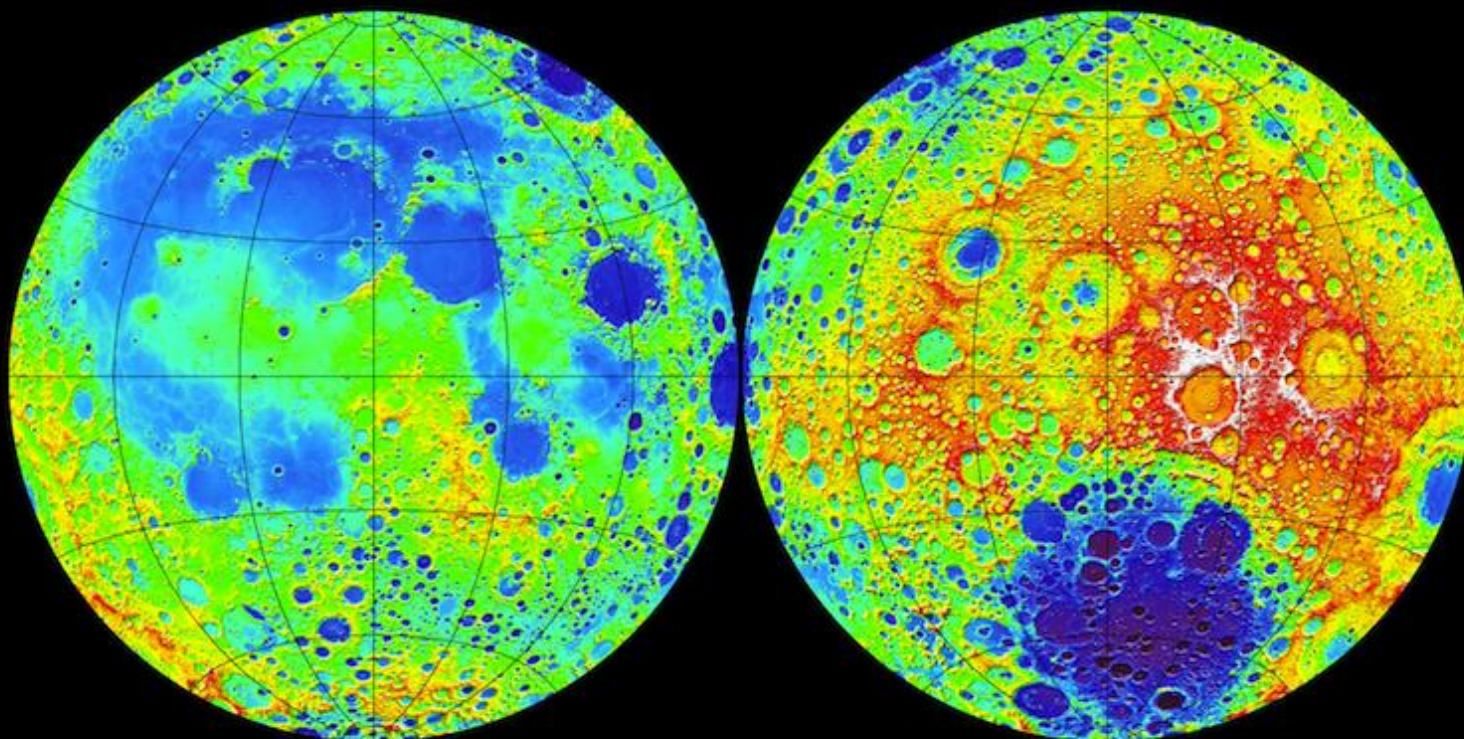
NASA

Měření odhalila horniny nabohacené o K, U, a Th – to svědčí o částečném tavení ultramafického pláště v hloubce 60 až 500 km (např. Wilhelms 1987; Hiesinger & Head 2006)

Výšková mapa Měsíce

Přivrácená strana

Odvrácená strana



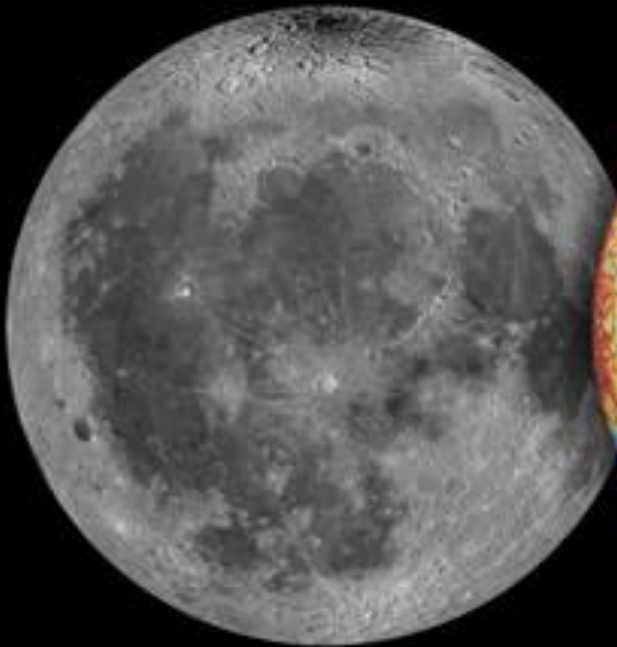
Topography (km)



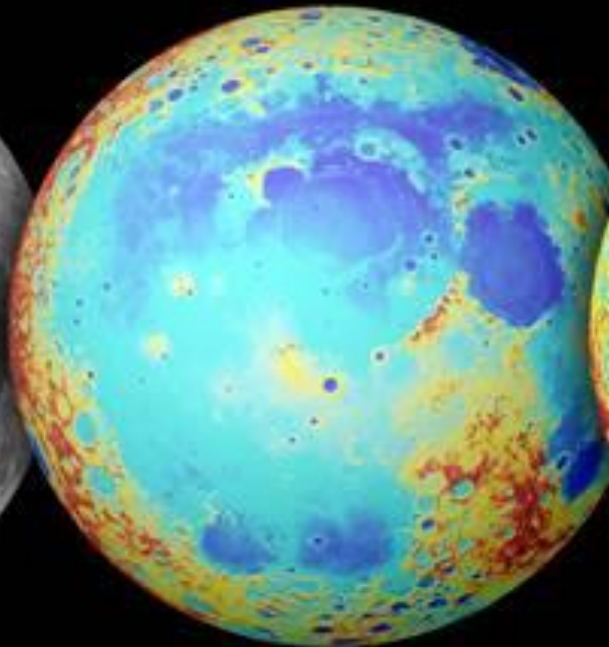
Oceanus Procellarum

- Největší ze všech moří (proto oceán), rozměr přes 2500 km
- Vyplňuje obrovskou impaktní pánev jako ostatní moře či ne?
 - Doklady případné impaktní pánve překryty lávou
- Objevení liniových proháklín, interpretovány jako rifty! [Andrews-Hanna et al., 2014](#)

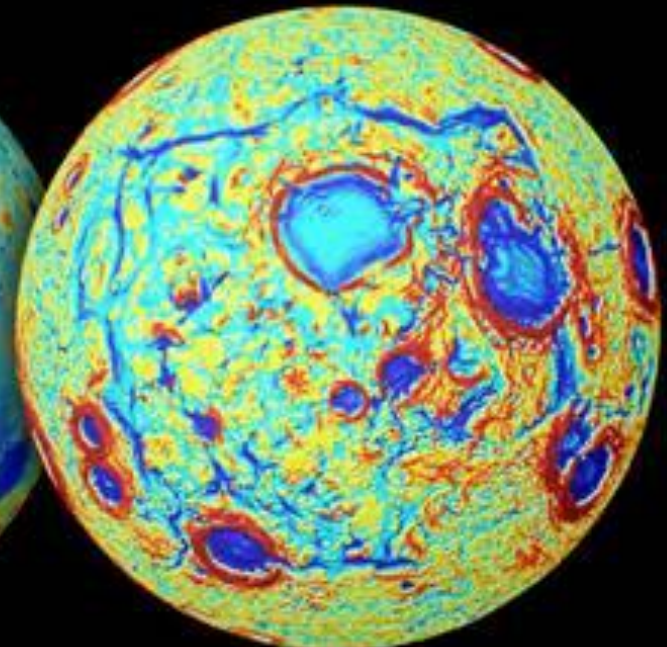
Viditelné spektrum



Topografie



Bouguerův gravitační gradient





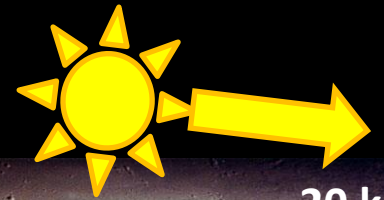
Herodotus Crater

Vallis Schröteri

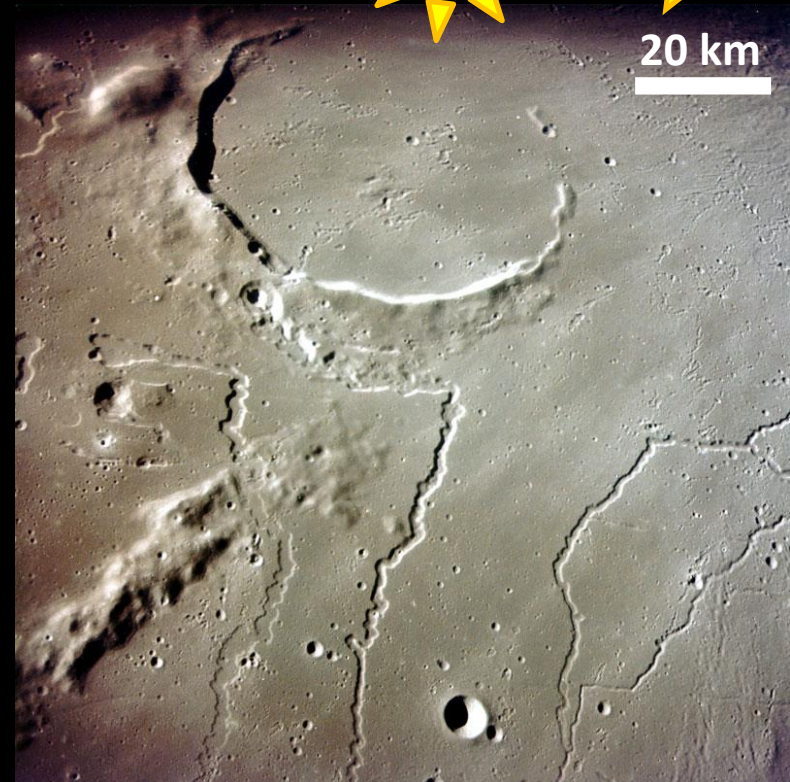
25 km

- Meandrovitá koryta na okrajích hladkých plání
- Šírka mezi několika desítek m až 3 km, délka až 300 km a průměrná hloubka 100 m Schubert et al. 1970; Hurwitz et al. 2012
- Jedná se o výsledek tepelné eroze vlivem tečení lávy po povrchu

Sinuuous rilles



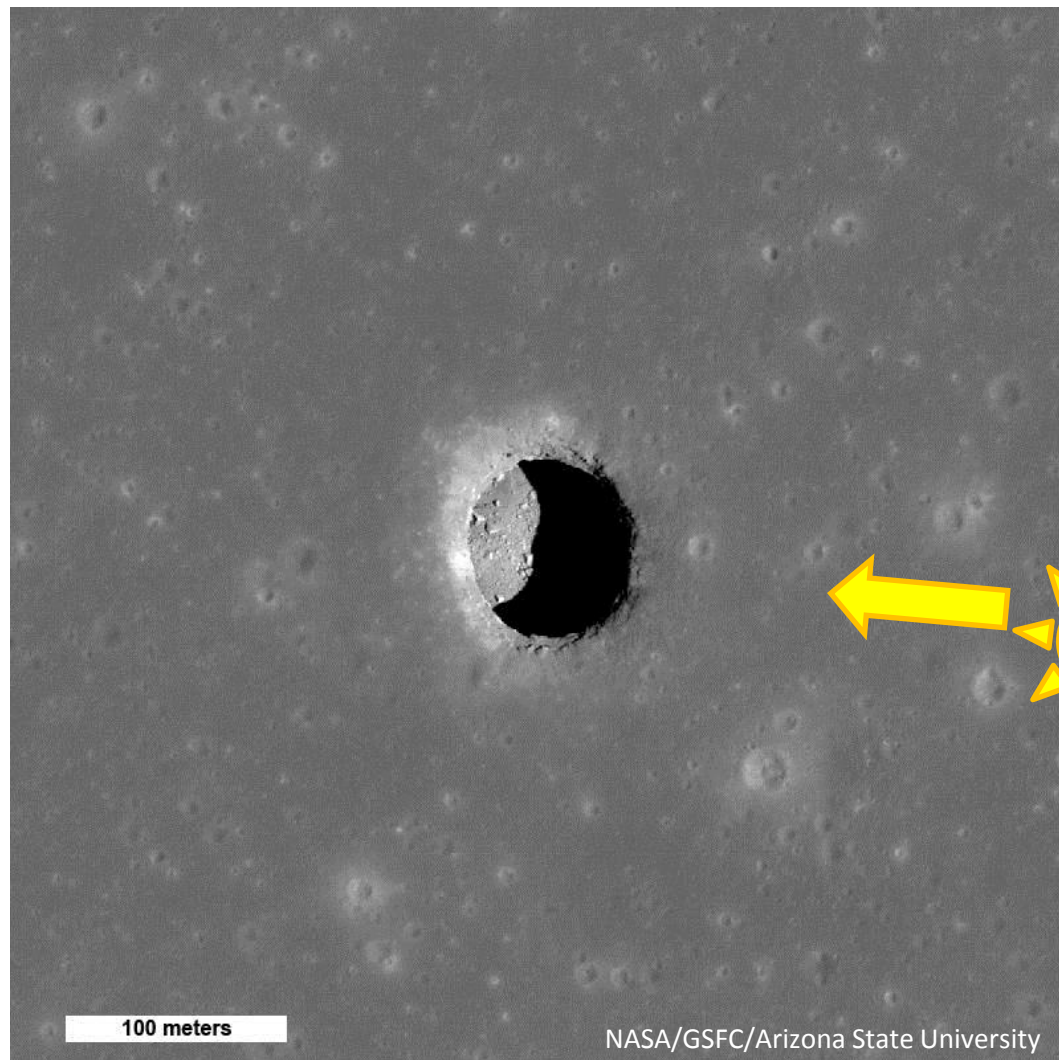
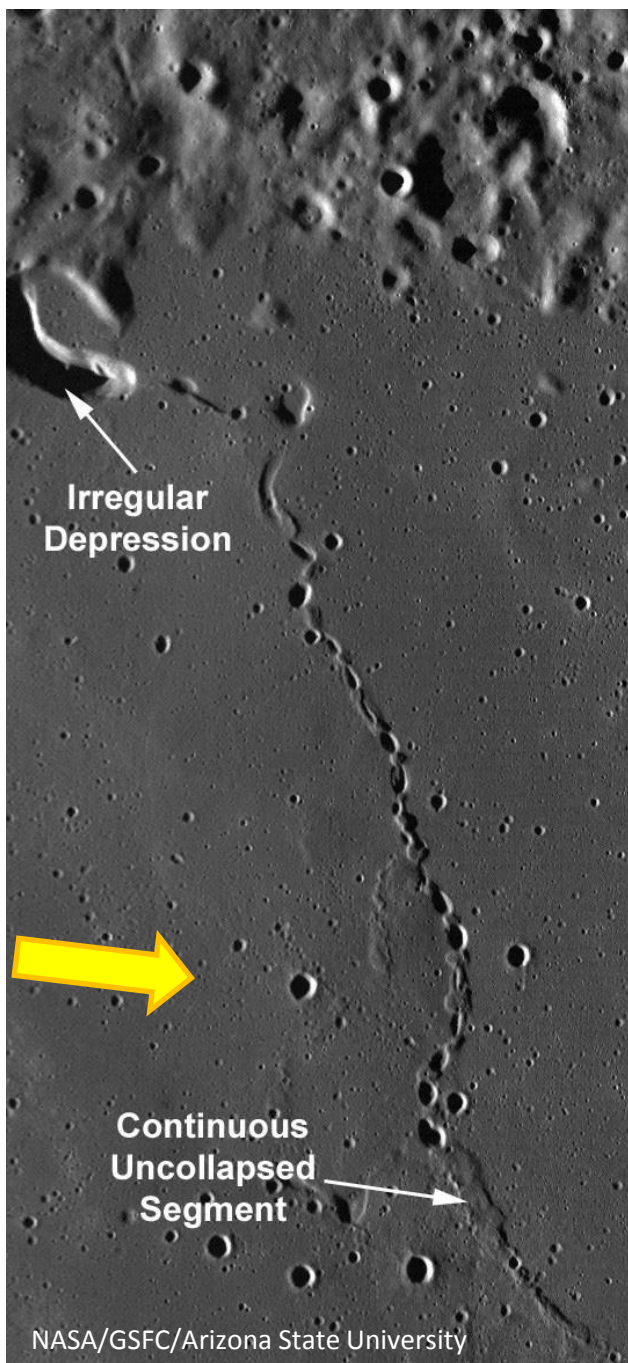
20 km



Hadley Rille



Lávové tunely



Délka pásu propadlin je ca 50 km

Lávové tunely



Dave Bunnell, CC BY-SA 2.5



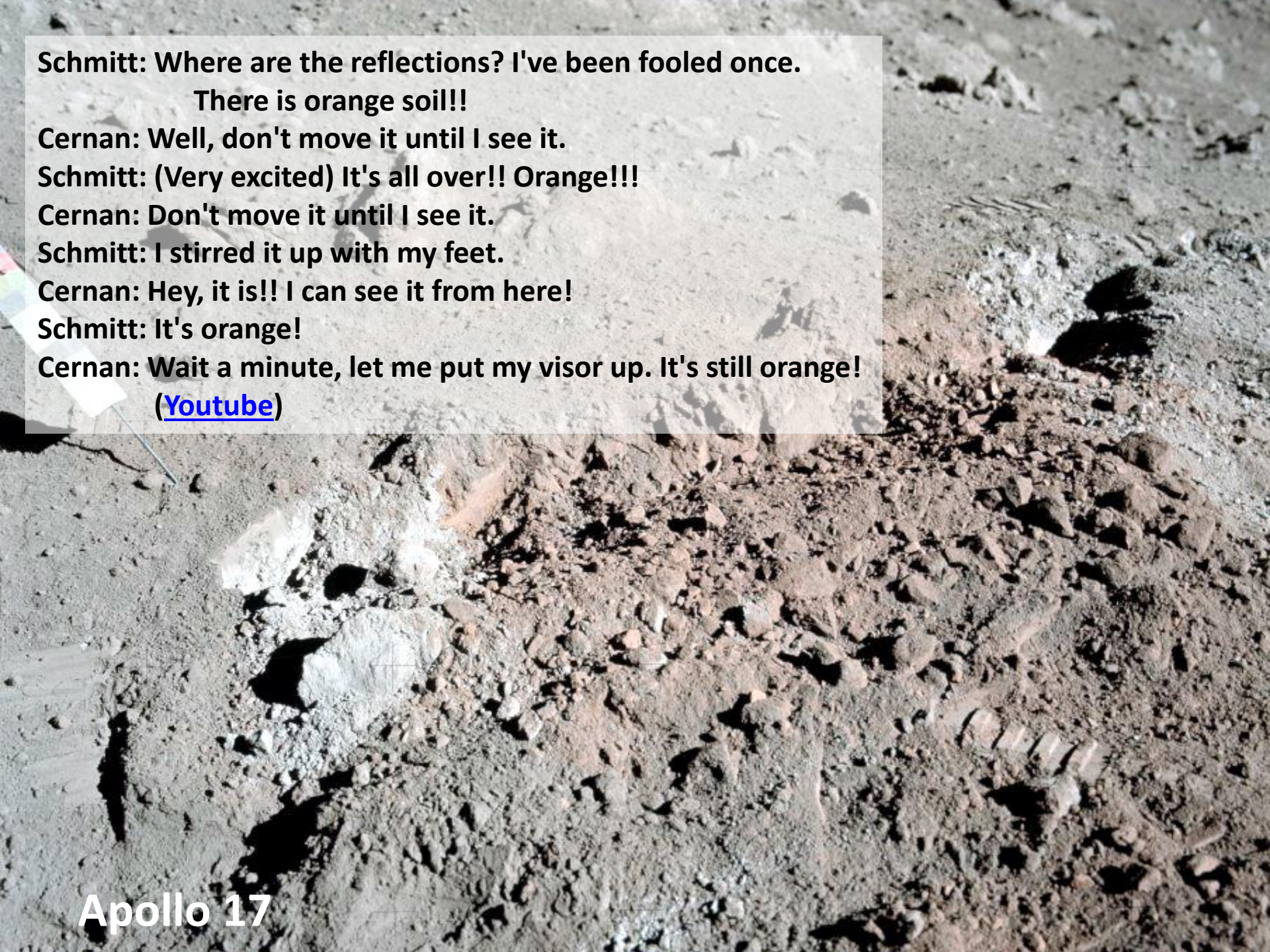
Malé sopečné dómy

- Tvořené výlevy lávy z lokalizovaného zdroje
- Pomalejší rychlost erupce
- Stovky m vysoké a pár km široké (nepozorována sopka větší než 20 km)



Štítové sopky
Sypané kužele
Lávové dómy

...

A photograph of the lunar surface. The foreground is covered in dark, grey, granular soil with some small rocks. In the background, the soil appears a distinct reddish-orange color. A white rectangular box with a drop shadow is overlaid on the left side of the image, containing a transcript of an Apollo 17 mission conversation. The text is in a bold, black, sans-serif font. The background image is a high-resolution photograph of the moon's surface, showing the texture of the regolith and the contrast between the grey and orange soils.

Schmitt: Where are the reflections? I've been fooled once.

There is orange soil!!

Cernan: Well, don't move it until I see it.

Schmitt: (Very excited) It's all over!! Orange!!!

Cernan: Don't move it until I see it.

Schmitt: I stirred it up with my feet.

Cernan: Hey, it is!! I can see it from here!

Schmitt: It's orange!

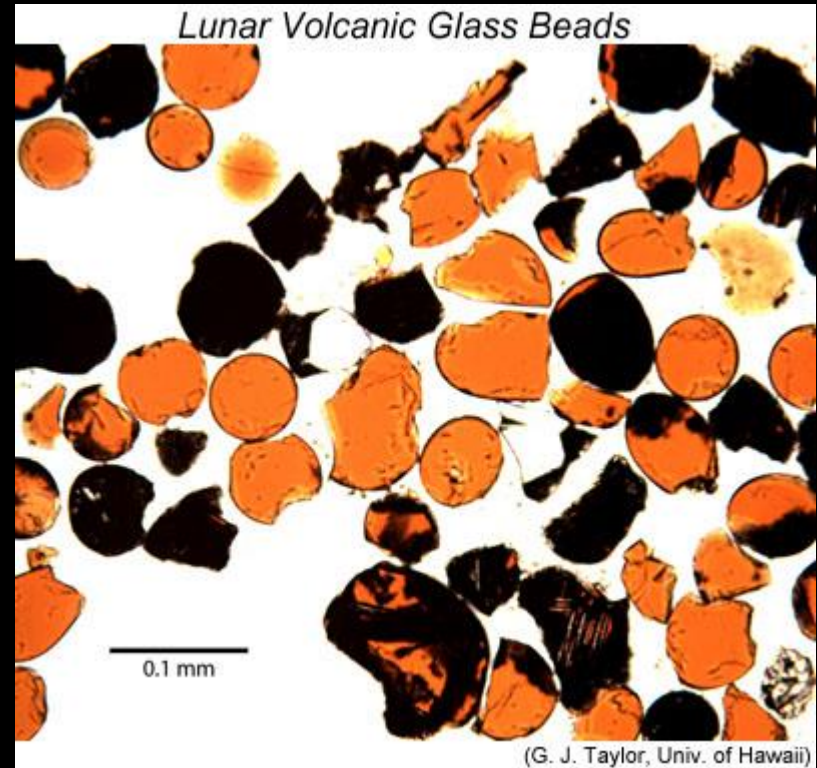
Cernan: Wait a minute, let me put my visor up. It's still orange!

([Youtube](#))

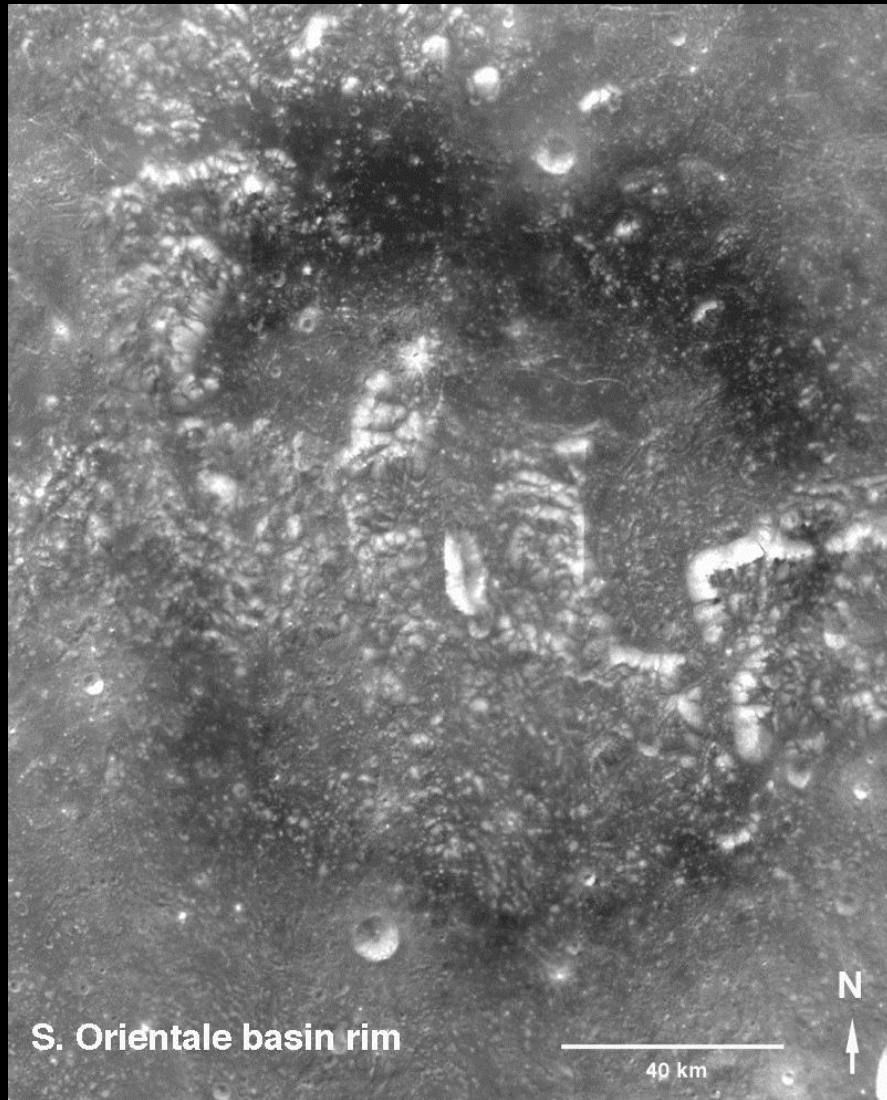
Apollo 17

Měsíční skla

- Rozeseta po celém povrchu
- Různé chemické složení (známo 20 druhů)
- Vznik sopečnou činností
Heiken et al. 1974
- Doklad přítomnosti lávových fontán na Měsíci – rychlý výstup, bez krystalizace
- Umožňují zkoumat **plášťové složení Měsíce**



Explozivní vulkanismus



- Na povrchu možnost rozpoznat tmavé „halo“ s centrální depresí, ale i malé kuželovité útvary obklopené tmavším materiálem
- Interpretovány jako uloženiny pyroklastik
 - Mohou se rozkládat na území až 2500 km²
Head et al., 2002; Hiesinger a Head 2006

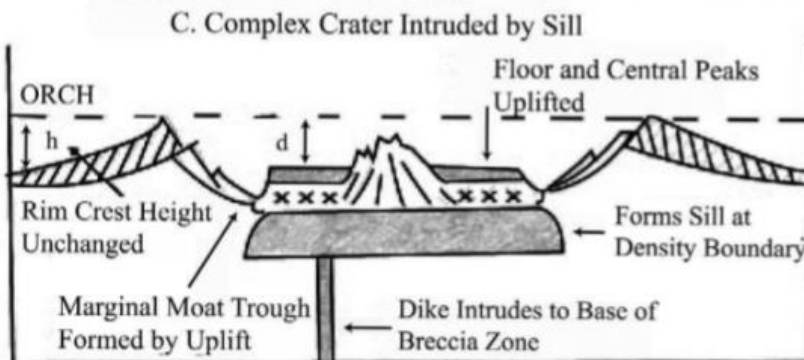
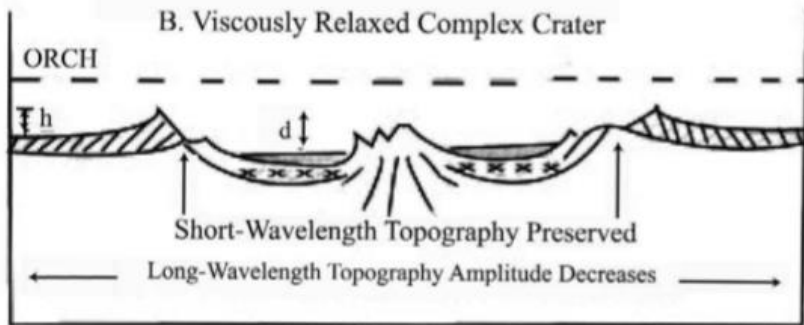
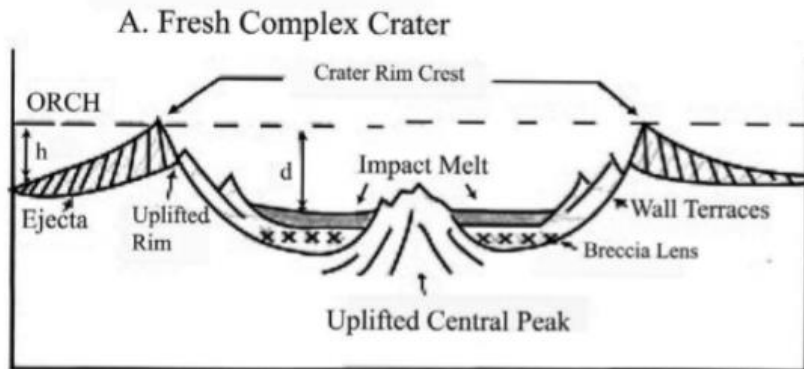


Na Zemi je hlavním sopečným
plynem voda, na Měsíci ale
nikoliv.

Nejspíše **oxid uhelnatý**.

Apollo 15

Floor-fractured craters

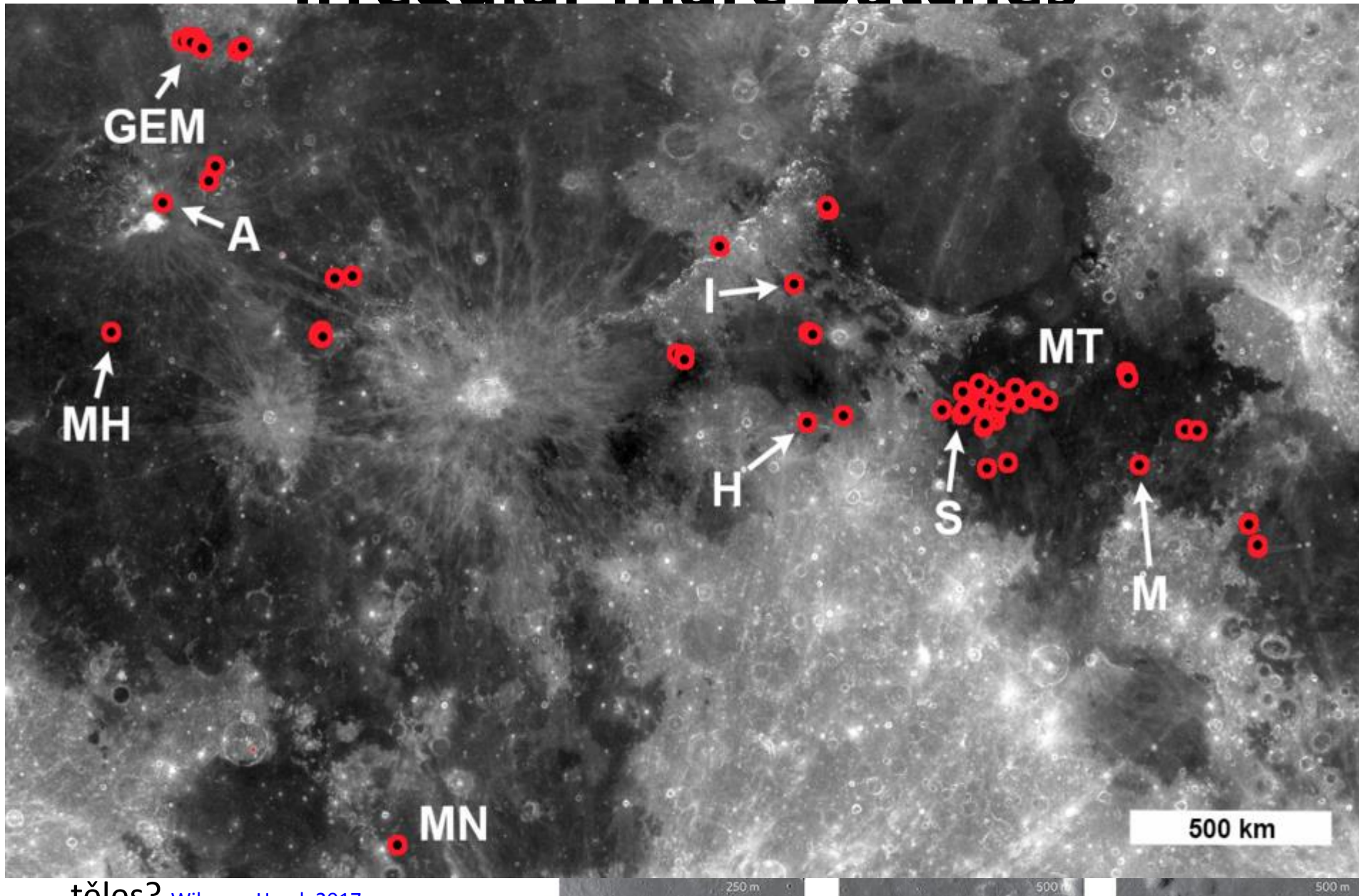


Jozwiak et al., 2012



- Navrženy dva modely vzniku
 - **Magmatický** [Schultz, 1976](#)
 - **Viskózní relaxace** [Hall et al., 1981](#); [Dombard and Gillis, 2001](#)
- **Topografie kráterů preferuje magmatický model** [Jozwiak et al., 2012](#)
 - Vznik kráteru usnadní výstup magmatu z pláště
 - Pod kráterem se nachází vrstva impaktní narušených hornin s nižší hustotou
 - Rozdíl hustot mezi magmatem a horninami poklesne, magma zastaví svůj výstup, vznikne **ložní žíla**
 - Později propaguje na povrch

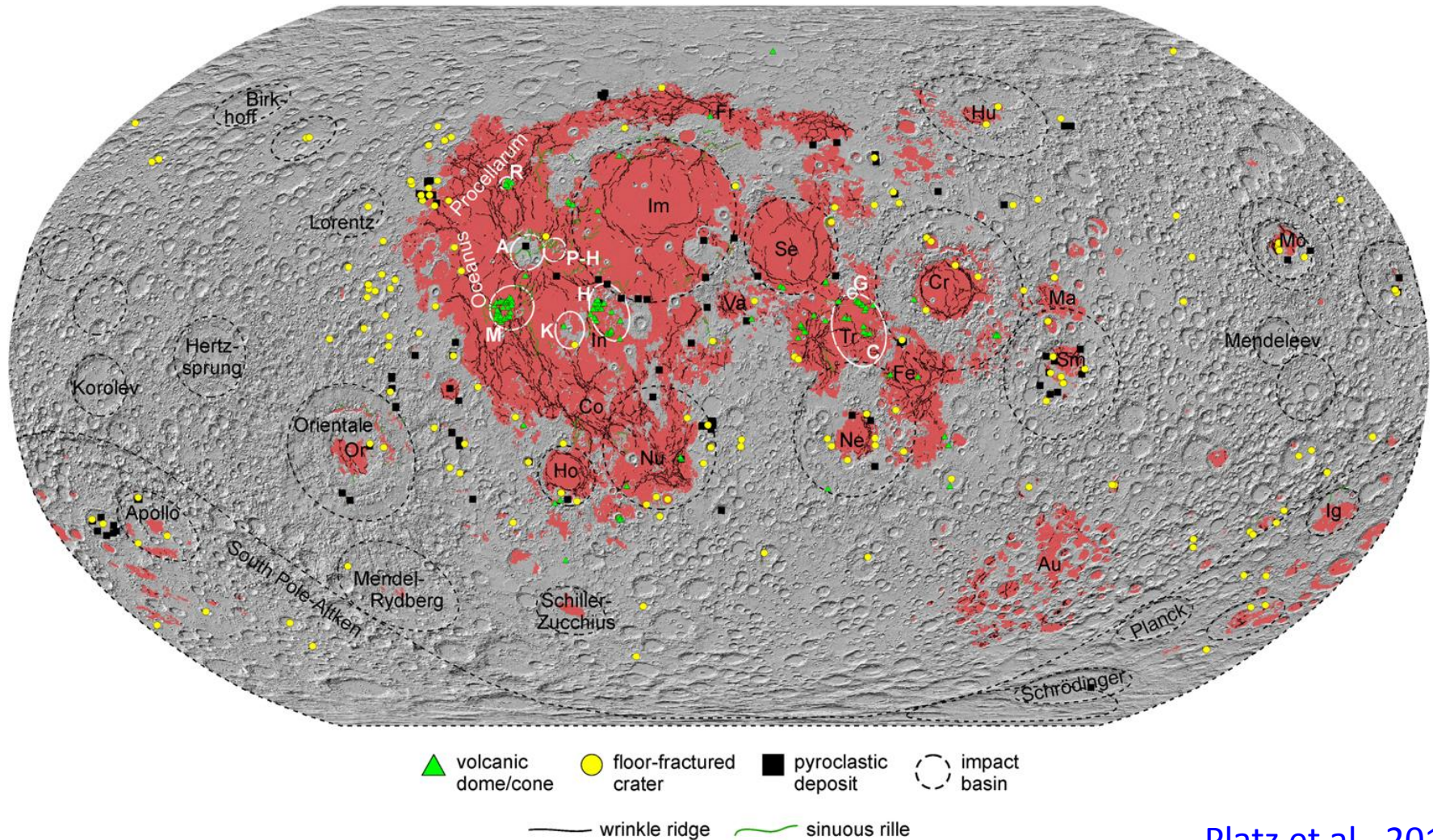
Irregular mare patches



těles? [Wilson a Head, 2017](#)

Braden et al., 2014

Rozšíření vulkanismu na Měsíci



Shrnutí – Měsíc

- Vulkanismus byl významným procesem, který spoluvytvořil měsíční kůru, i ji později přetvořil
(Lucey et al. 2006; Shearer et al. 2006)
- Nerovnoměrné rozmístění měsíčních moří napovídá, že pro existenci vulkanismu na Měsíci hraje důležitou roli mocnost kůry
- Masivní výlevný bazaltový vulkanismus vznikl vlivem abnormálního nabohacení magmatu o některé radioaktivní prvky
- Doklady o existenci explozivního vulkanismu



Mars

základní parametry



+ střední hustota $3,933 \text{ g/cm}^3$
(Země $5,15 \text{ g/cm}^3$)

Těleso	Velikost (km)	Povrch (km ²)	Úniková rychlost (m/s ²)	Délka roku (den)	Tlak (mbar)
Země	12 756	510 mil.	9,81	365	1013
Mars	6792	144 mil.	3,72	687	6,35

Historie výzkumu: očekávání...



Neznámý autor

Marsovské „kanály“ – důkaz mimozemské civilizace?

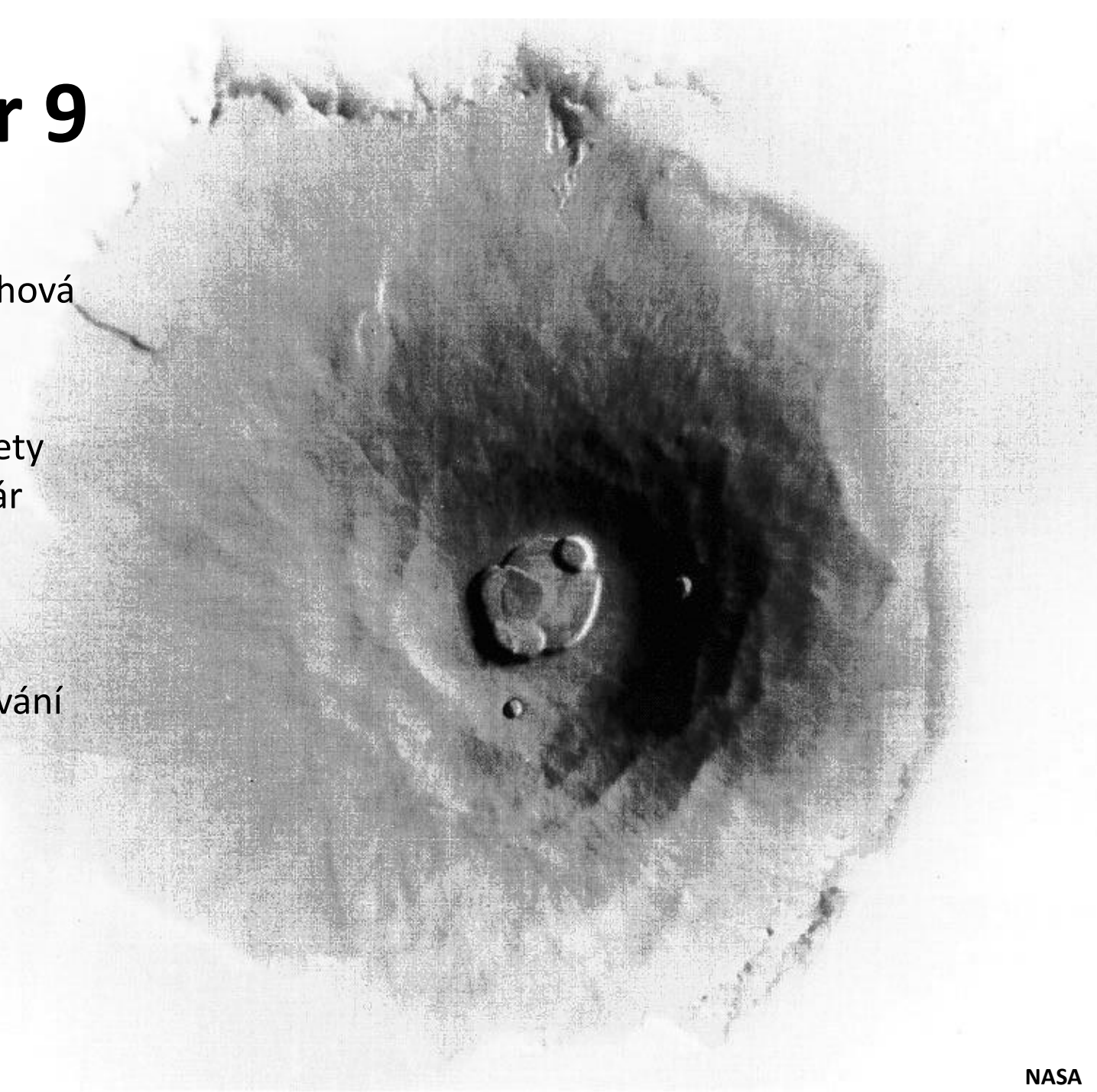


Apollo 16/NASA

Mariner 9

(1971-1972)

- Globální prachová bouře
- Snímkování povrchu planety odloženo o pár měsíců
- Důležitost operativního přeprogramování sondy

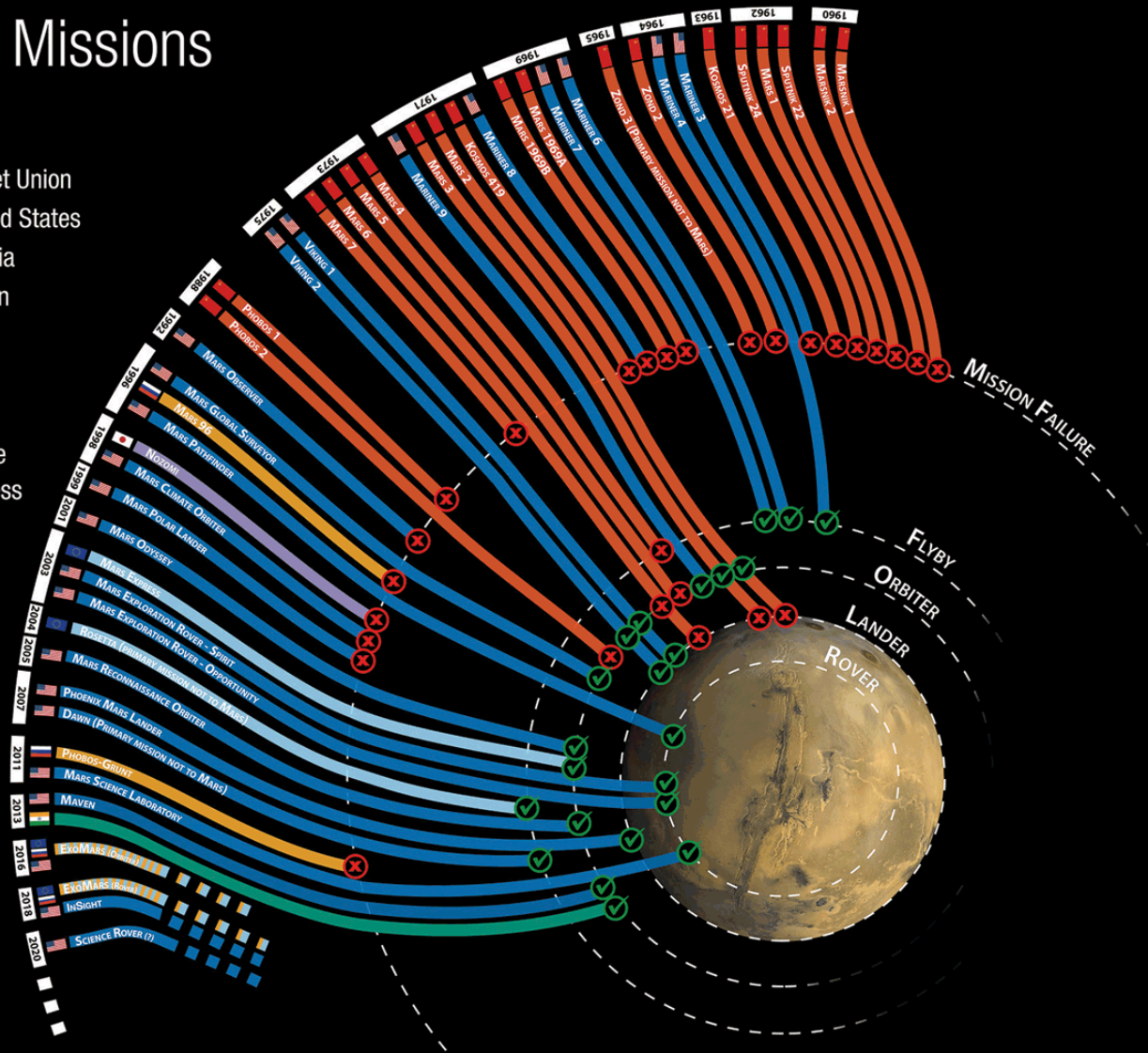


Mars – nejlépe prozkoumaná planeta

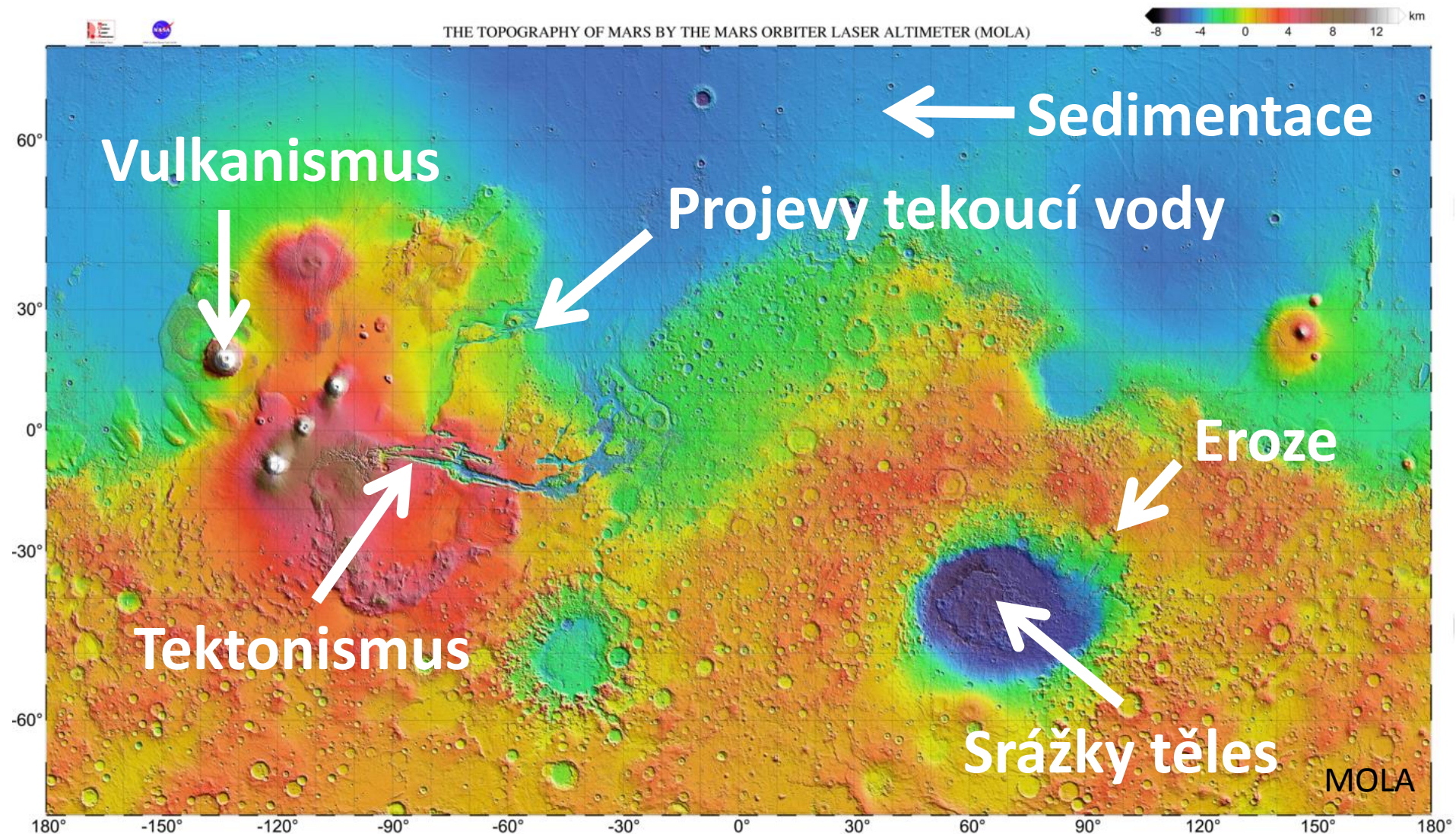
Robotic Missions to Mars



 Mission Failure
 Mission Success



Topografická mapa povrchu Marsu



Obrovské sopečné provincie (Tharsis, Elysium, Syrtis Major...)

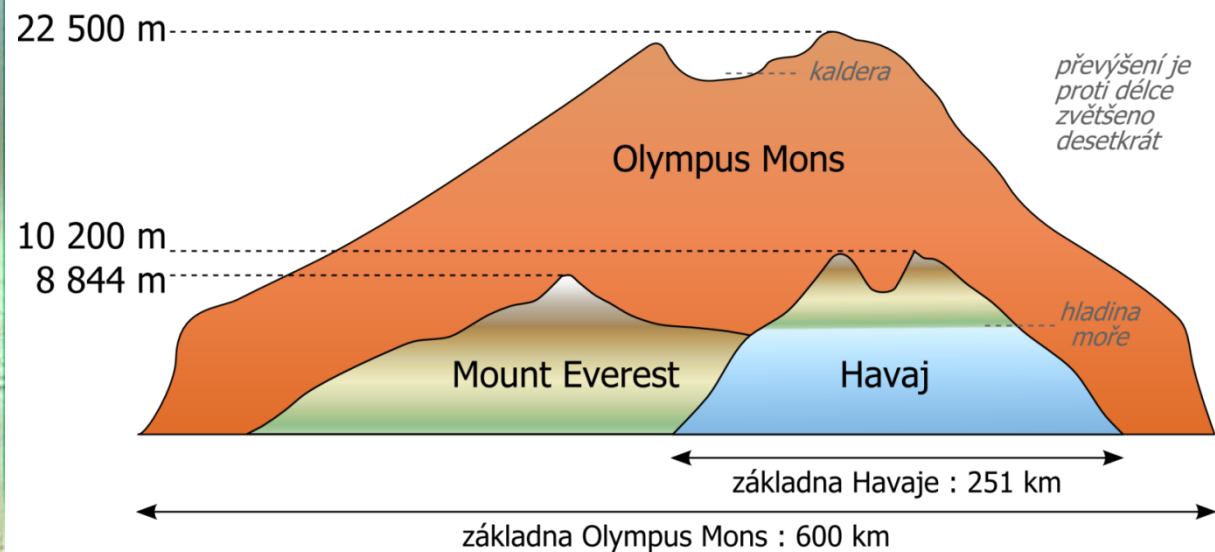
Výlevný vulkanismus

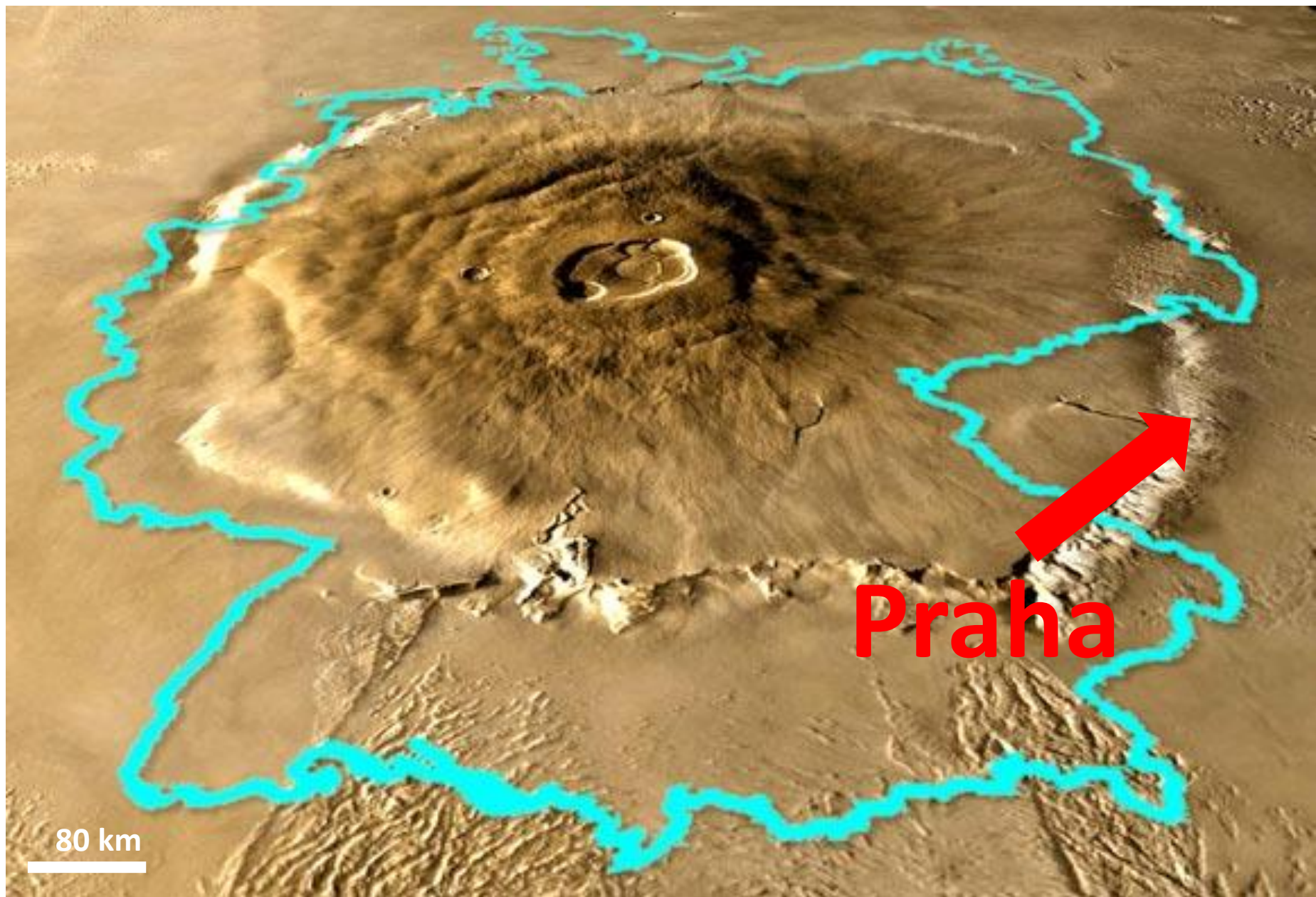


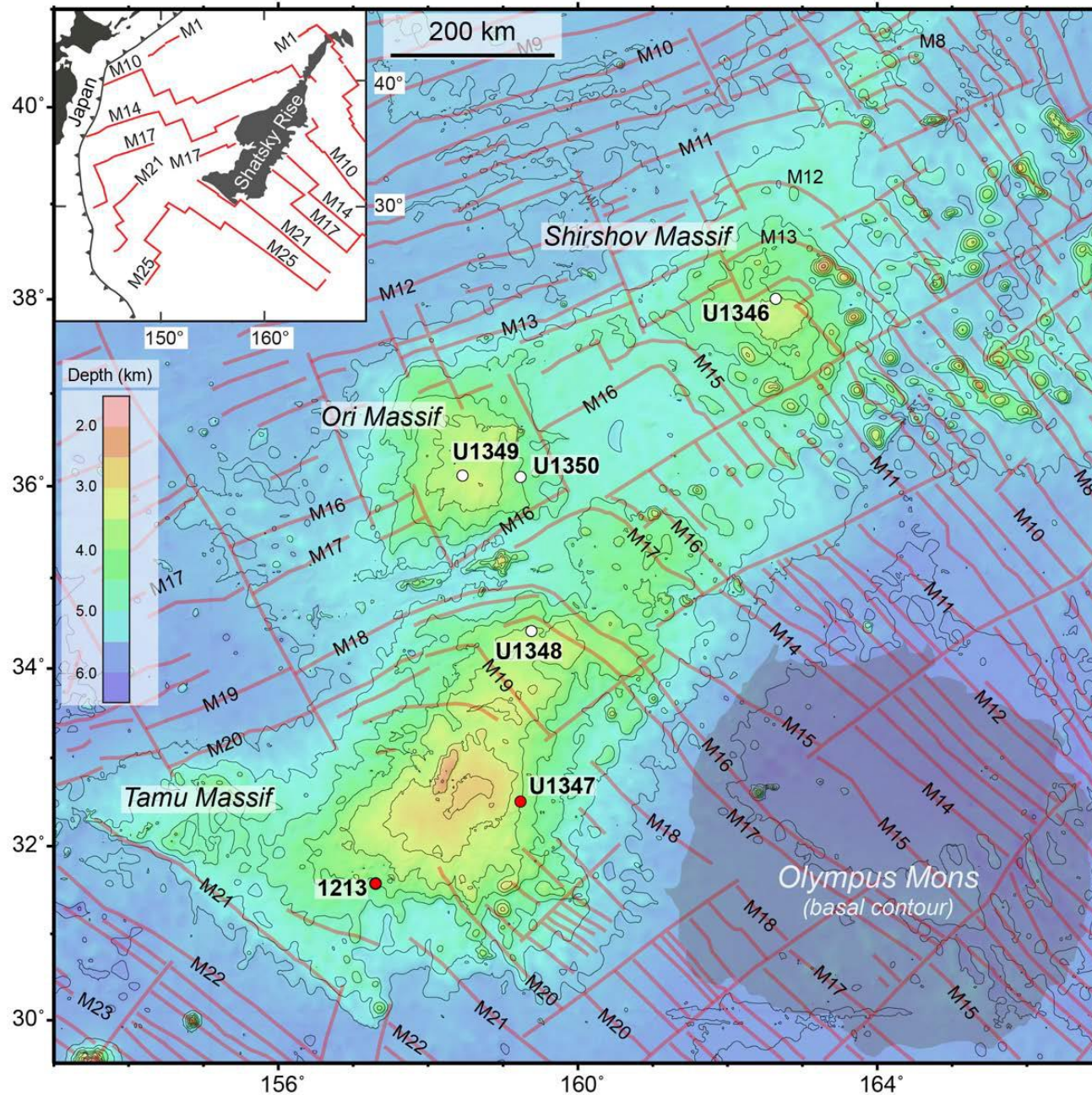


Olympus Mons nejvyšší hora Sluneční soustavy

Srovnání velikosti Olympus Mons s Mount Everestem a ostrovem Havaj

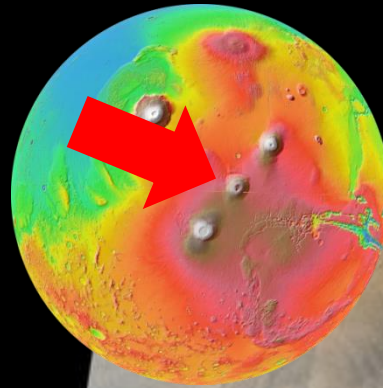




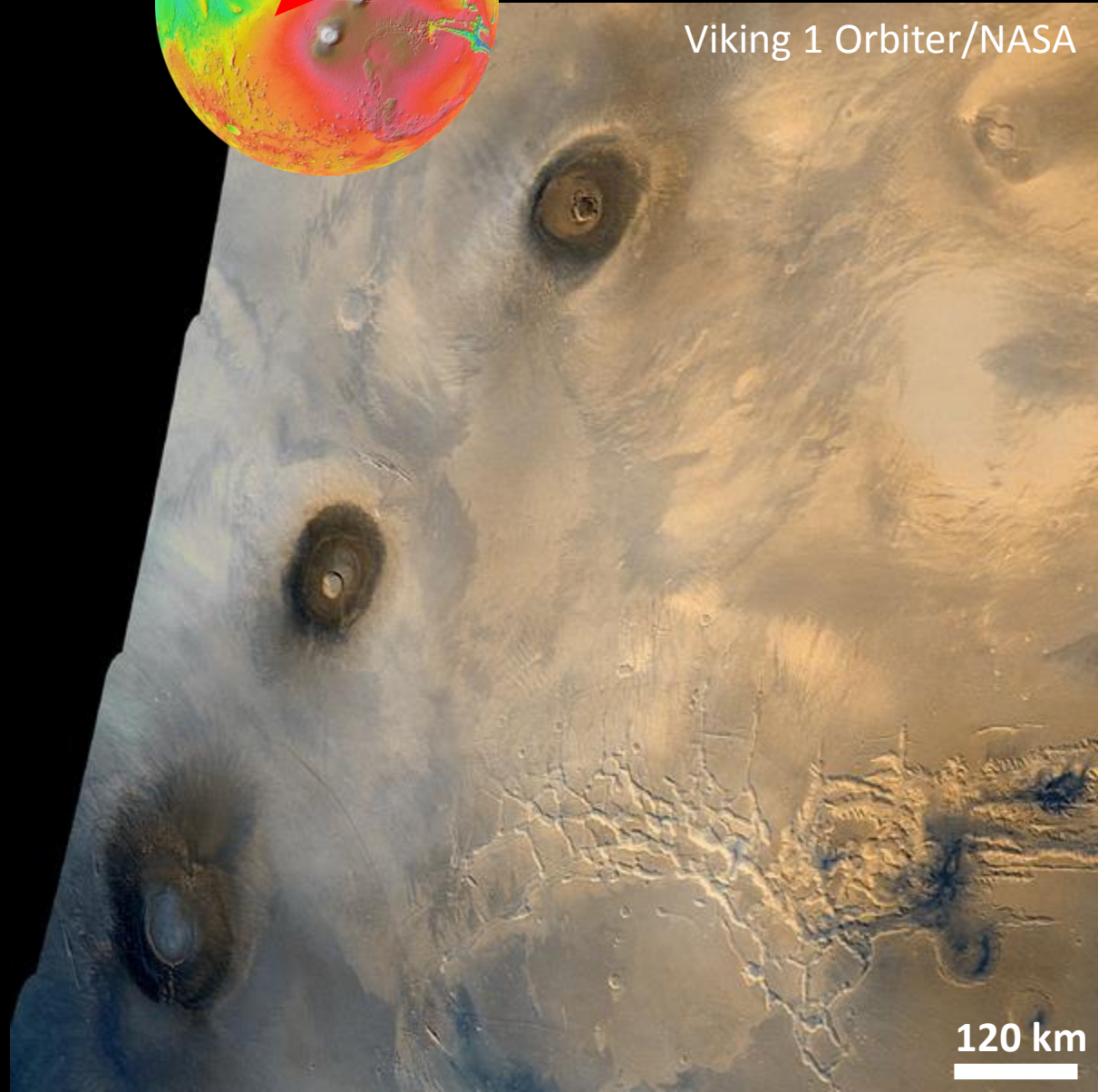


Tharsis Montes

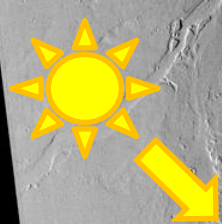
- Ascraeus Mons
 - Pavonis Mons
 - Arsia Mons
- A další řada
„menších sopek“,
které bychom
na Zemi považovali
za rozměrné...



Viking 1 Orbiter/NASA



120 km



Sopečný kráter

Impaktní kráter
vyplněný mladší
lávou

Sopka tvořená
lávovými proudy

4 km

a

Low shields

[Hauber a kol. \(2009\)](#)

1100 1200 1300

Elevation [m]

0 5 km

b

2 km

c

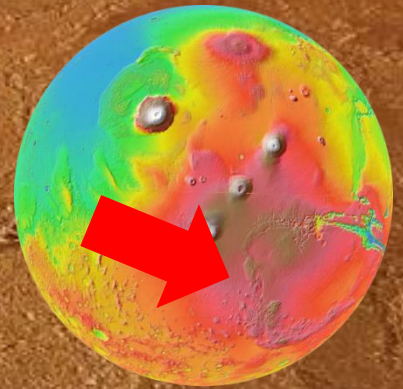
2 km

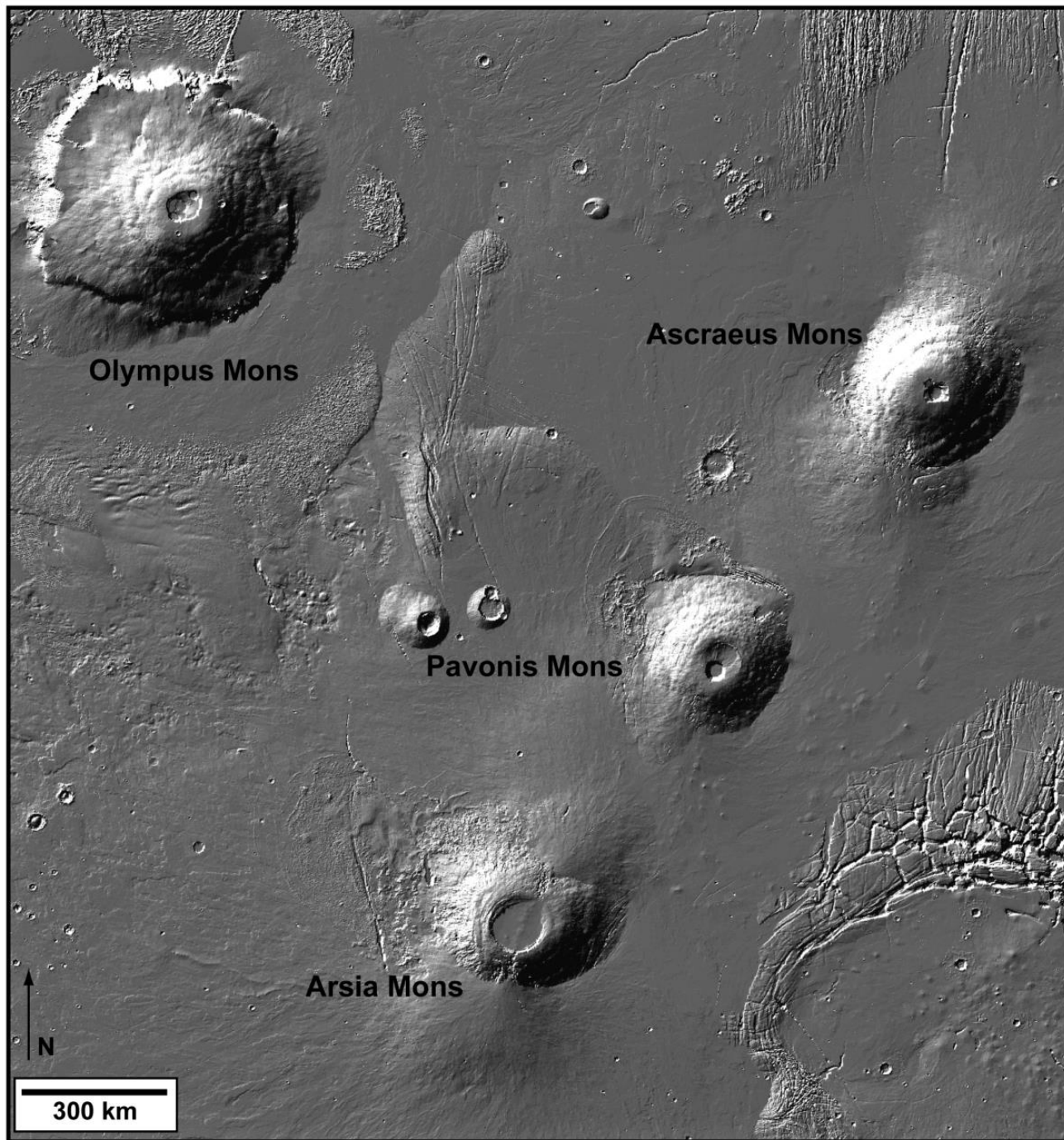


Top: Skjaldbreidur (Iceland)
Bottom: Trolladyngja (Iceland)

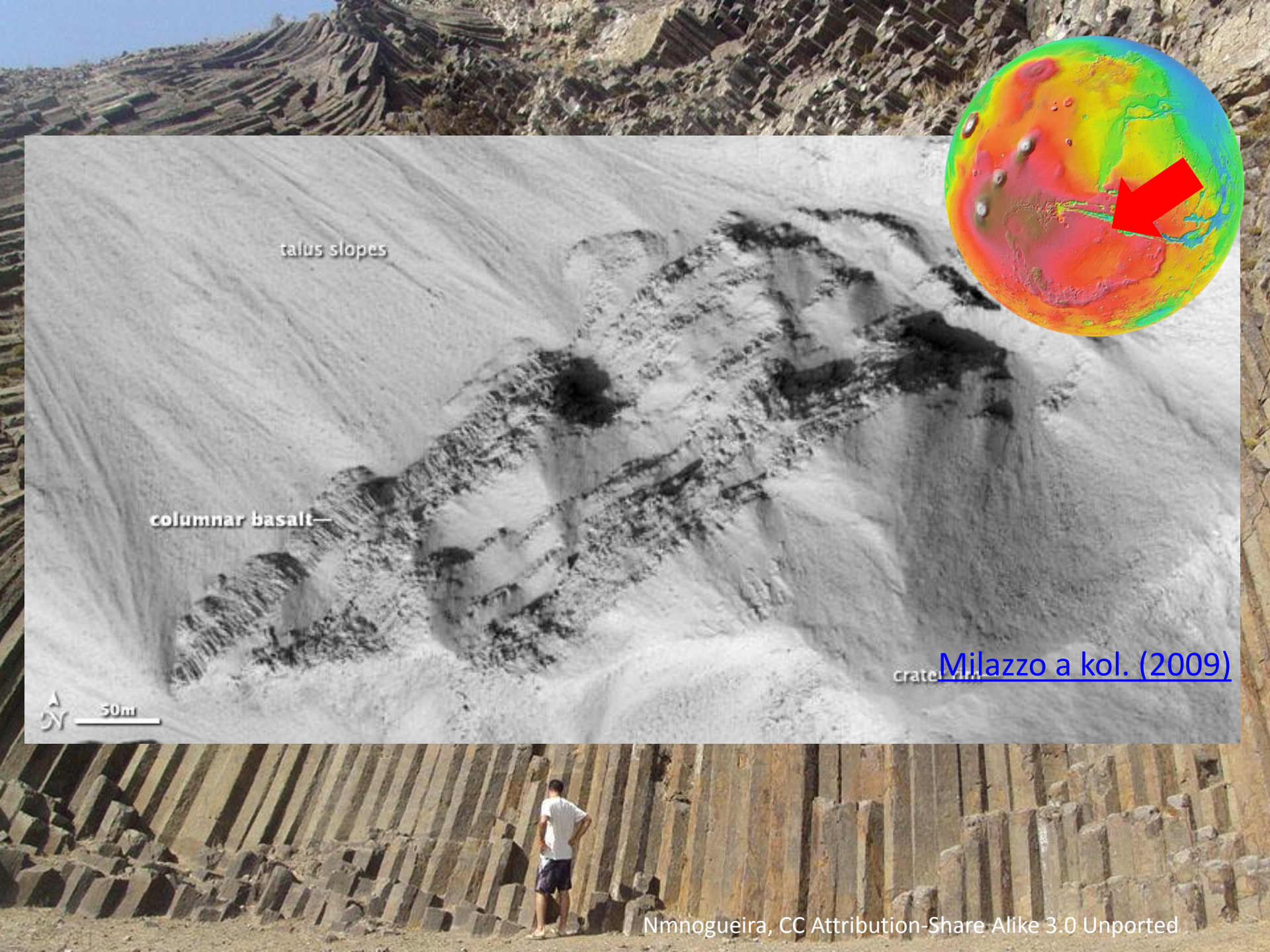


6 km





Low shields
společně s
lávovými
proudy
pokrývají
velkou část
povrchu
Tharsis;
tzv. *plain
style
volcanism*

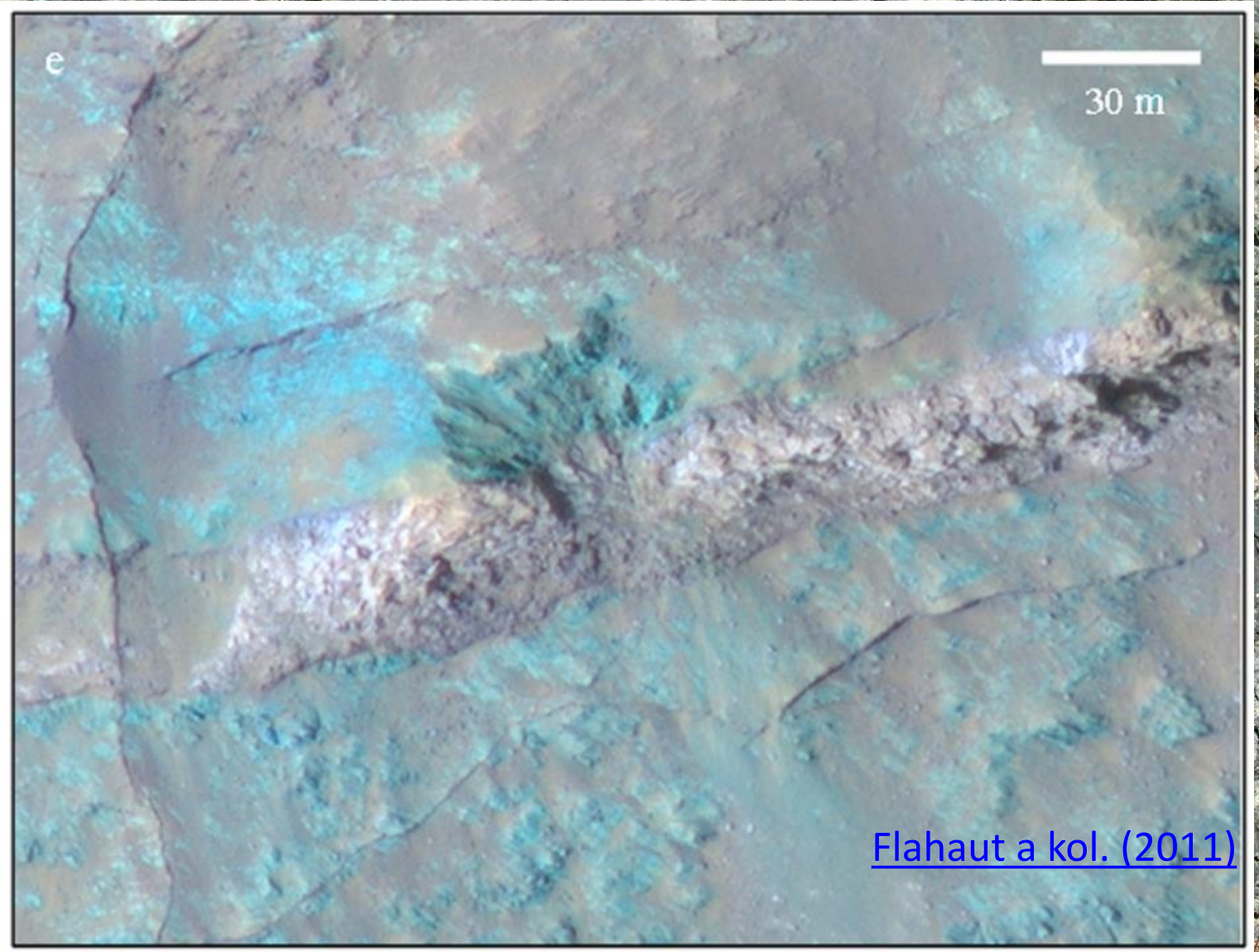


talus slopes

columnar basalt—

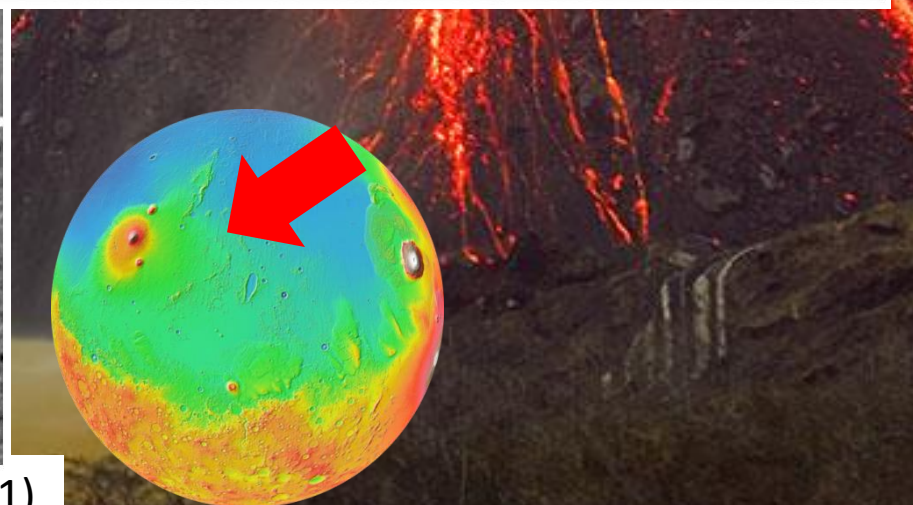
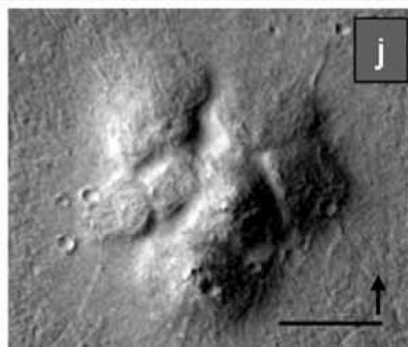
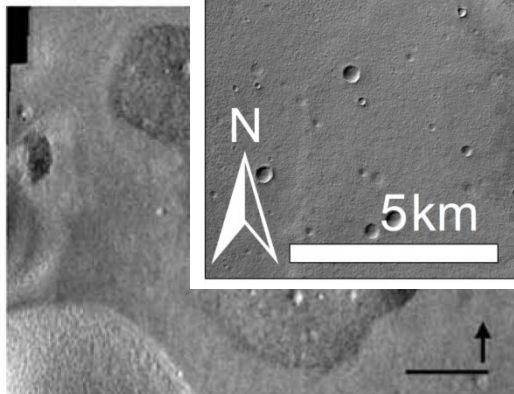
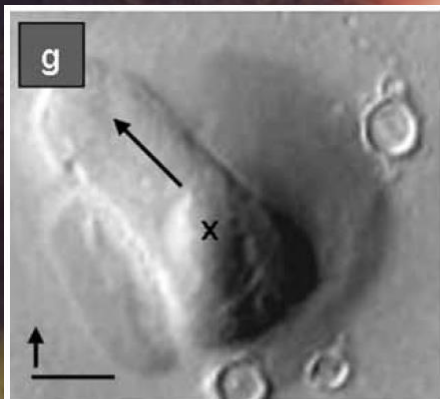
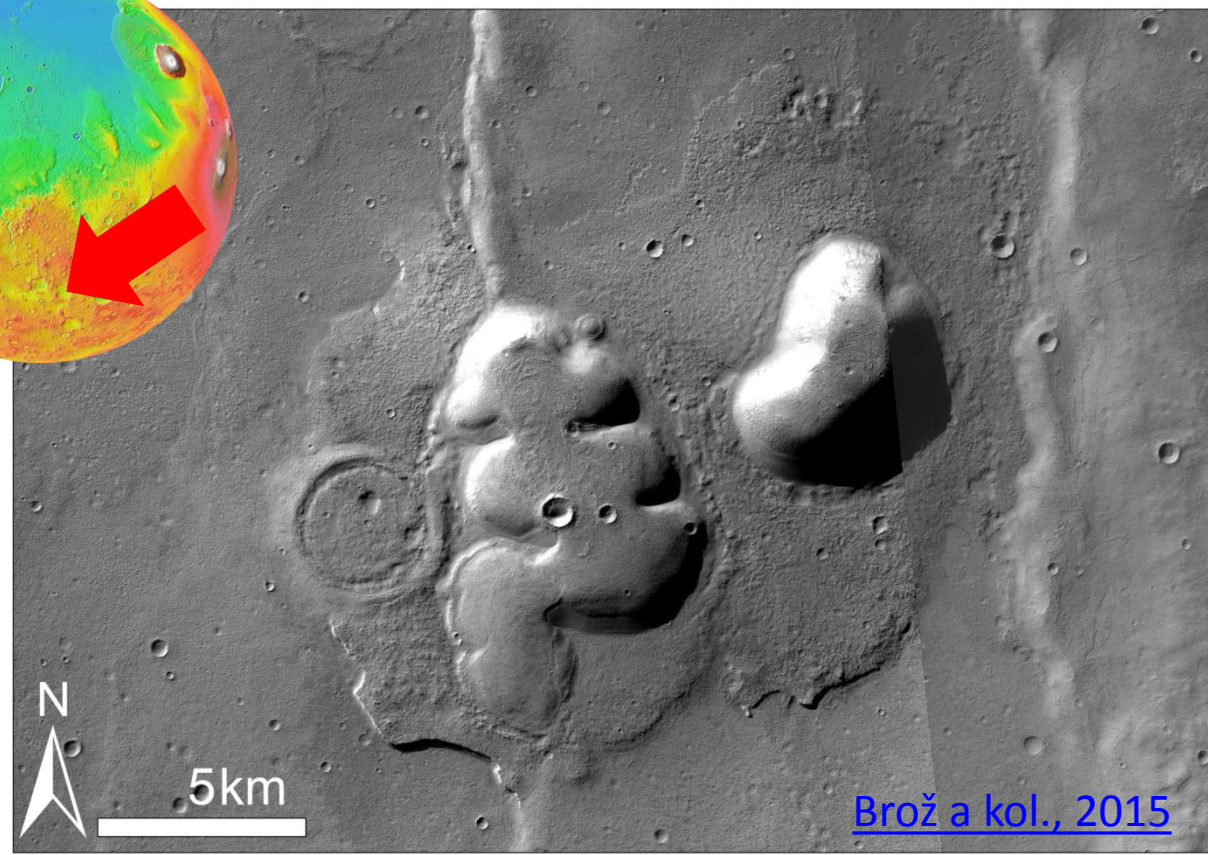
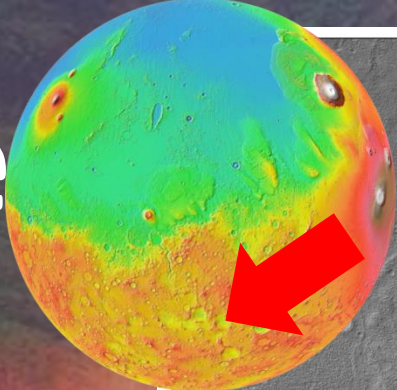
crater [Milazzo a kol. \(2009\)](#)

50m



[Flahaut a kol. \(2011\)](#)

Lávové

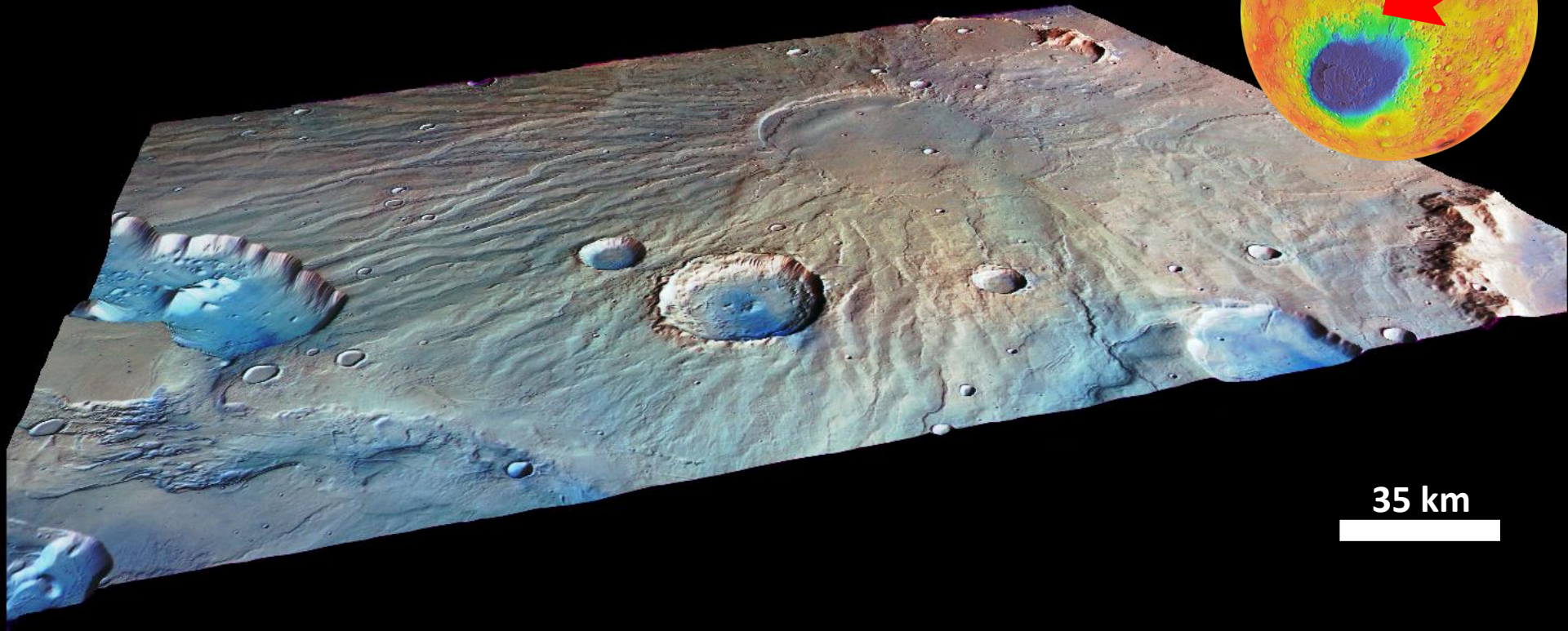


[Rampey a kol. \(2006\)](#); [Farrand a kol. \(2011\)](#)



Explozivní vulkanismus

Prastaré sopky (paterae) na jižní polokouli



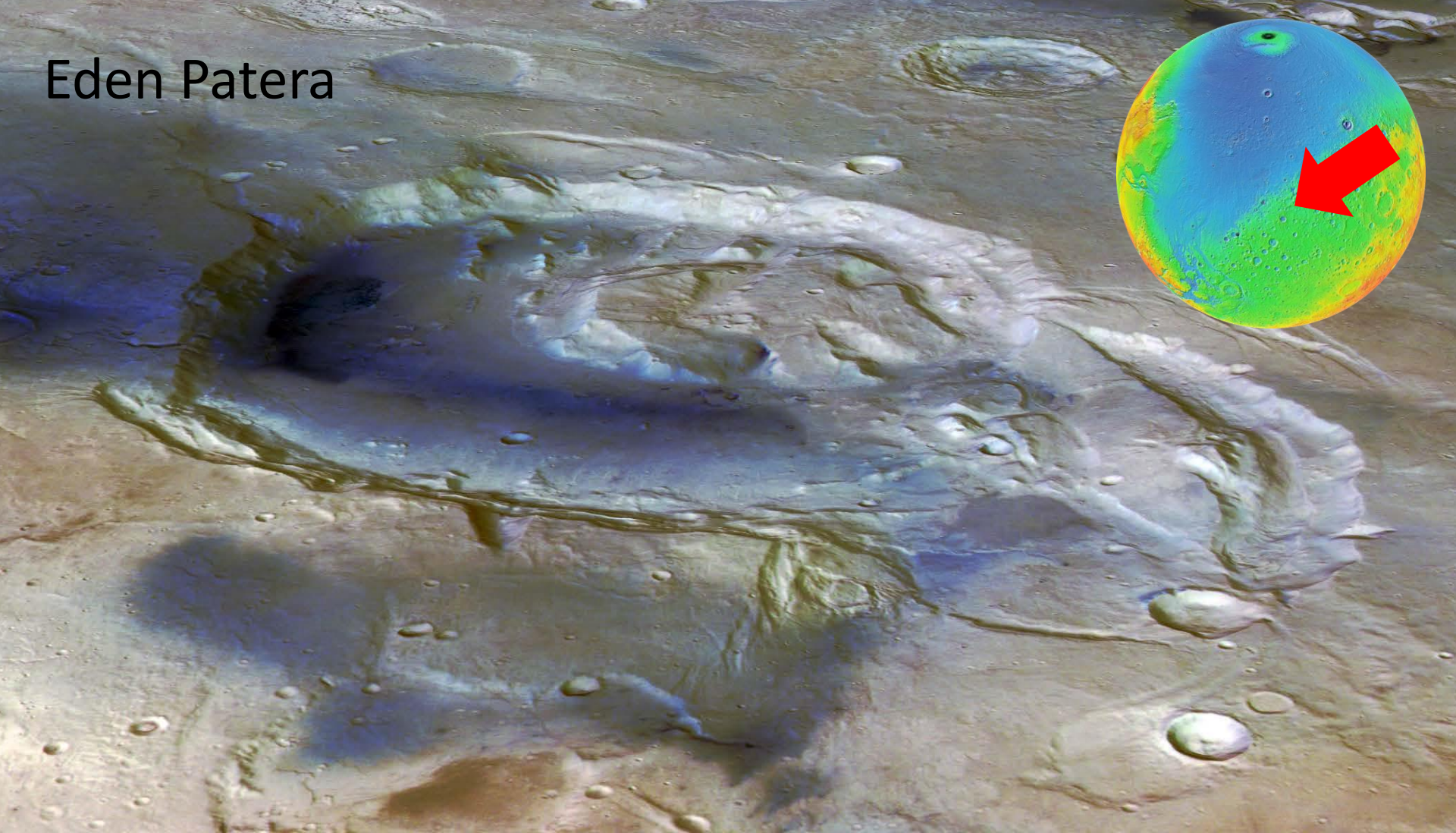
- Prastaré (3,8 – 3,5 mld. let)
- Silně rozrušené svahy → snadno erodovatelný materiál
- Sopečný prach či pyroklastický materiál (explosivní erupce)



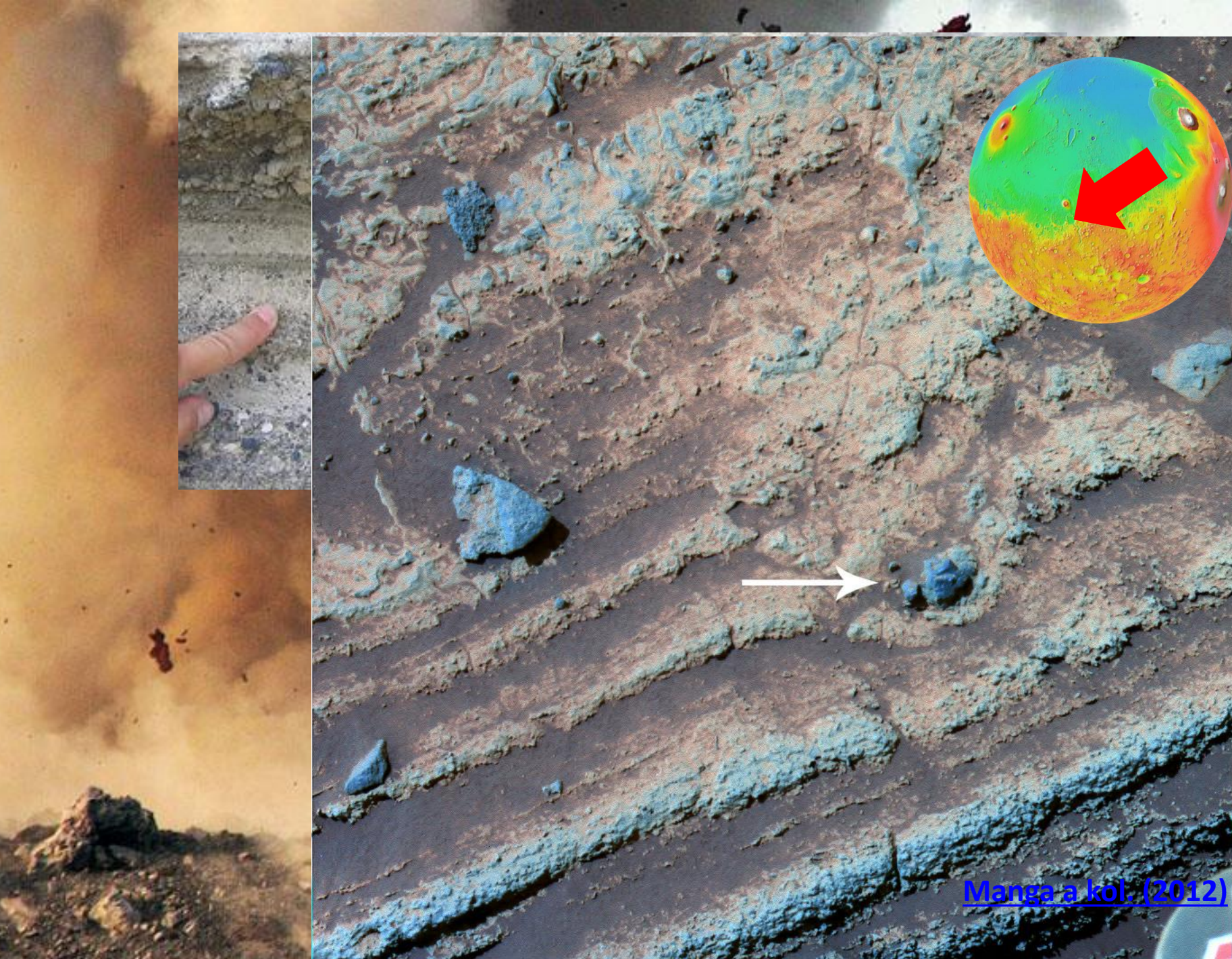
Supervulkán(y) na Marsu (?)

- Atypické deprese v oblasti Arabia Terra
- Buď se jedná o degradované impaktní krátery, či o sopečné kaldery
- Zdroj materiálu vrstevnatých uloženin rozšířených na Marsu?

Eden Patera

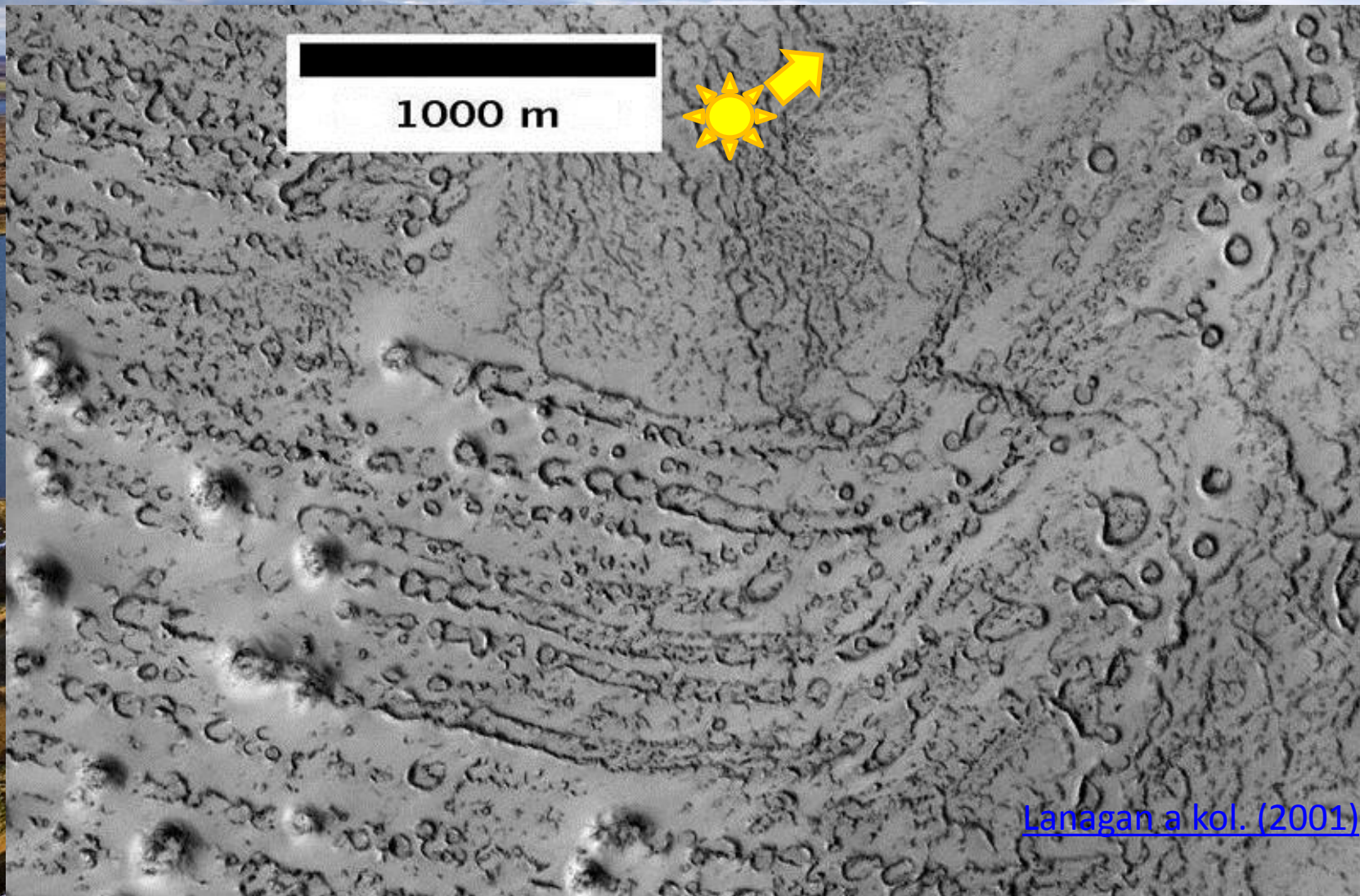


Perspektivní 3D HRSC pohled



[Manga a kol. \(2012\)](#)

„Bezkořenné“ kužele



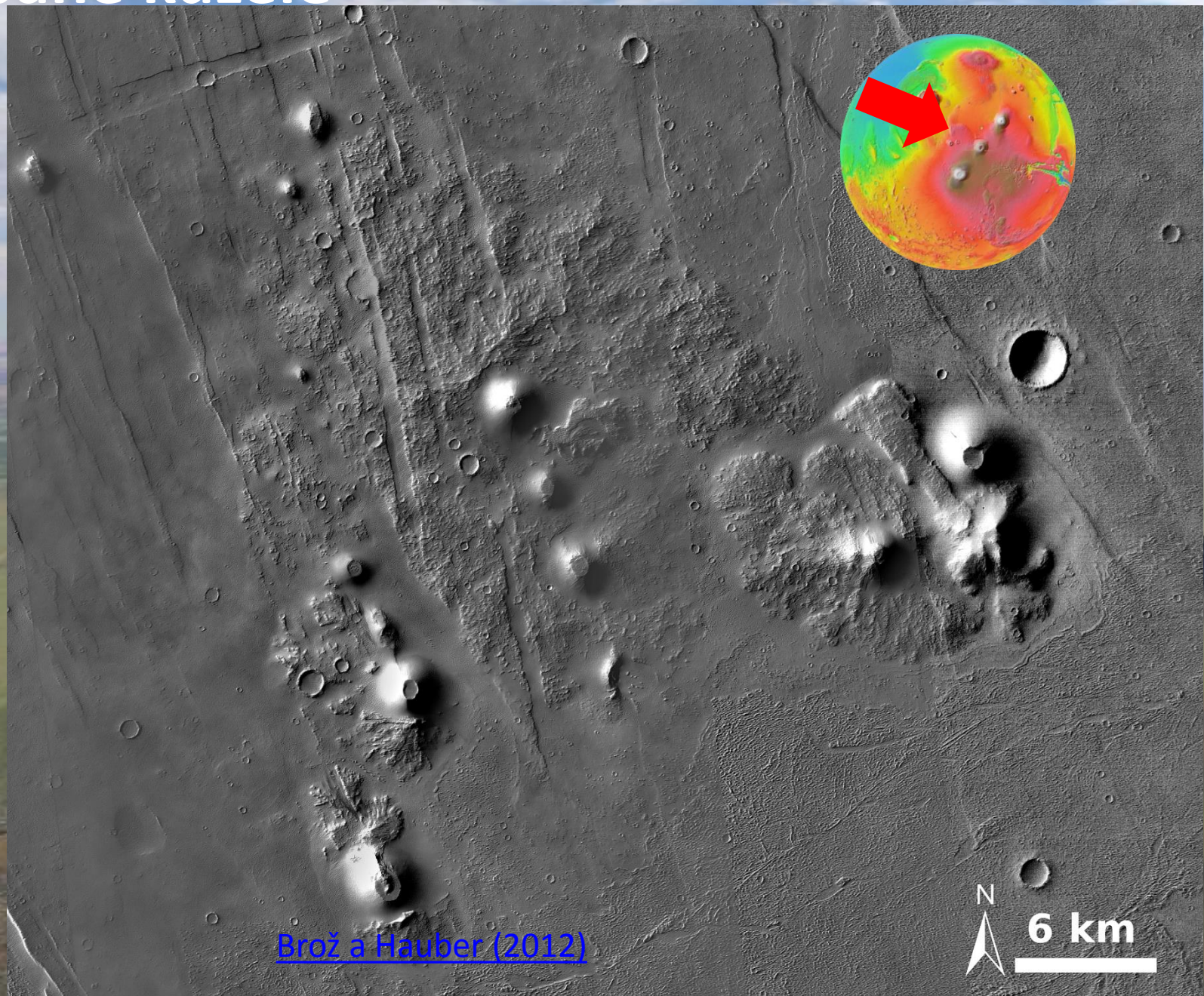
[Lanagan a kol. \(2001\)](#)

Tuffové prstence

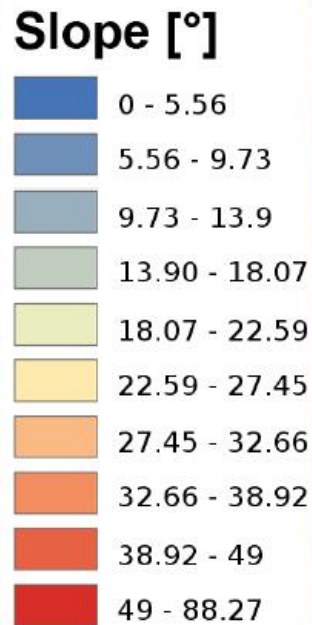
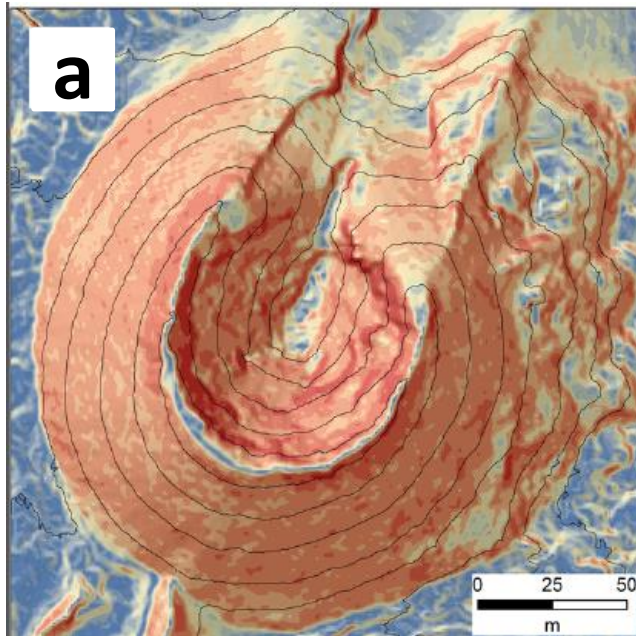


[Brož a Hauber \(2013\)](#)
(střední, explozivní)

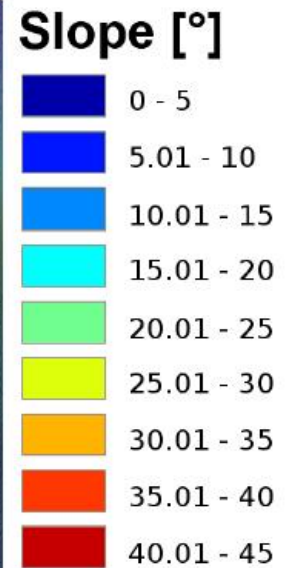
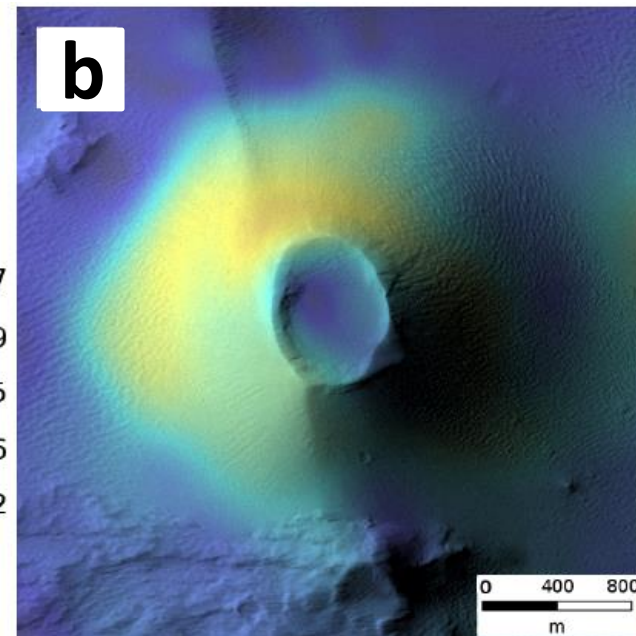
Sypané kužele



Země



Mars



LIDAR (a) a HRSC (b) snímky ukazující sklony svahů

- Na Zemi jsou svahy sypaných kuželů většinou řízeny kritickým úhlem (*sypný úhel*), který je okolo $\sim 30^\circ$
- Oproti tomu marsovské sypané kužele tohoto úhlu nedosahují, obecně mají mnohem nižší hodnoty

Efekt prostředí

$$a_d = - \frac{3}{4} \frac{C_d}{d} \frac{\rho_{air}}{\rho_{rock}} v v$$



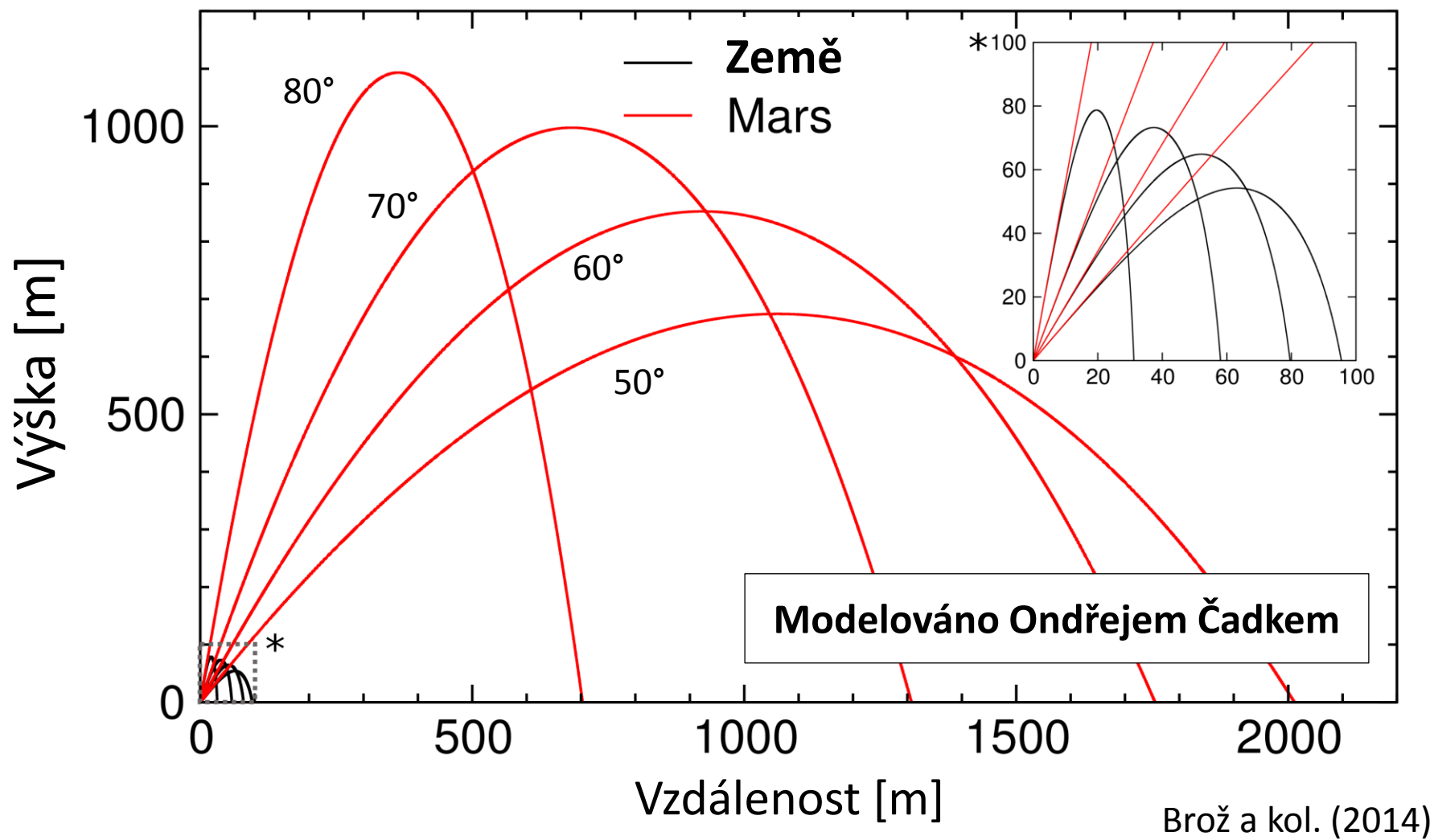
Jak se částice chovají během erupce?

Balistické křivky

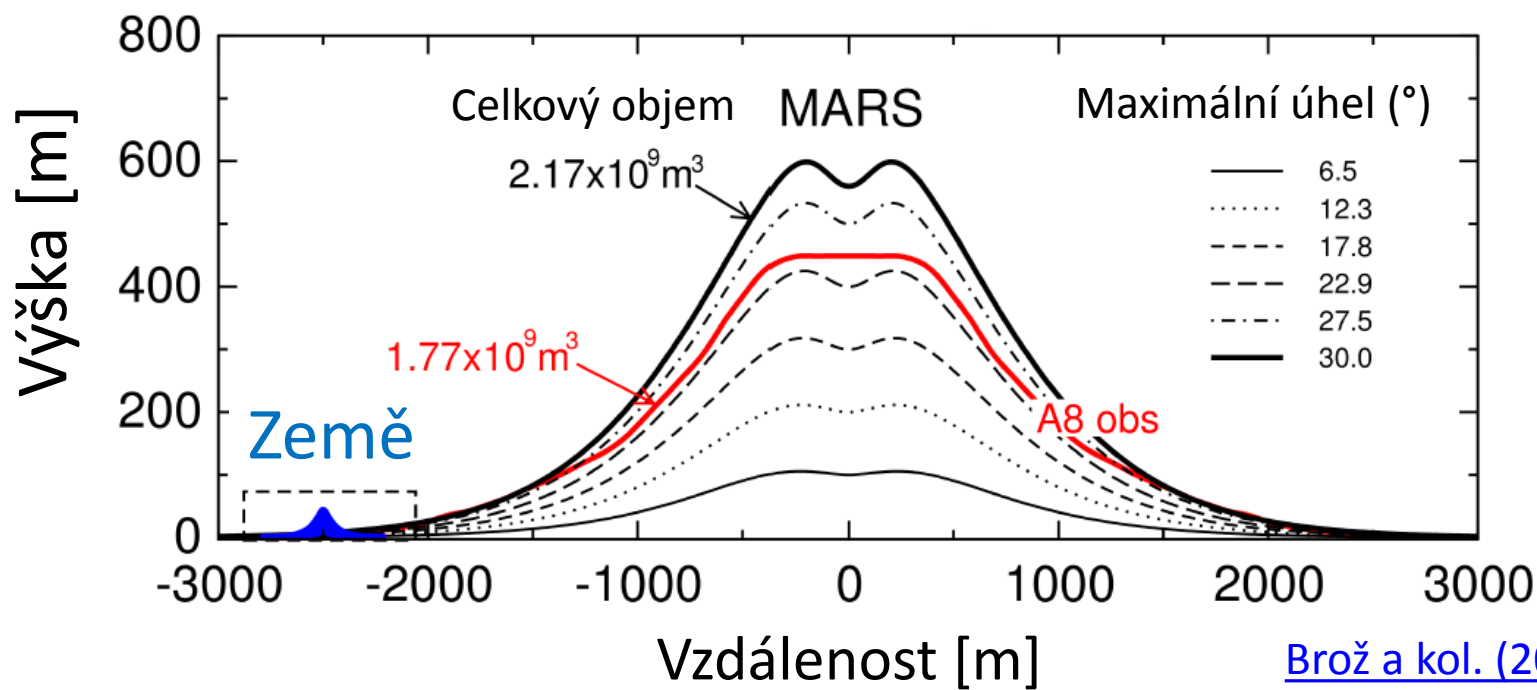
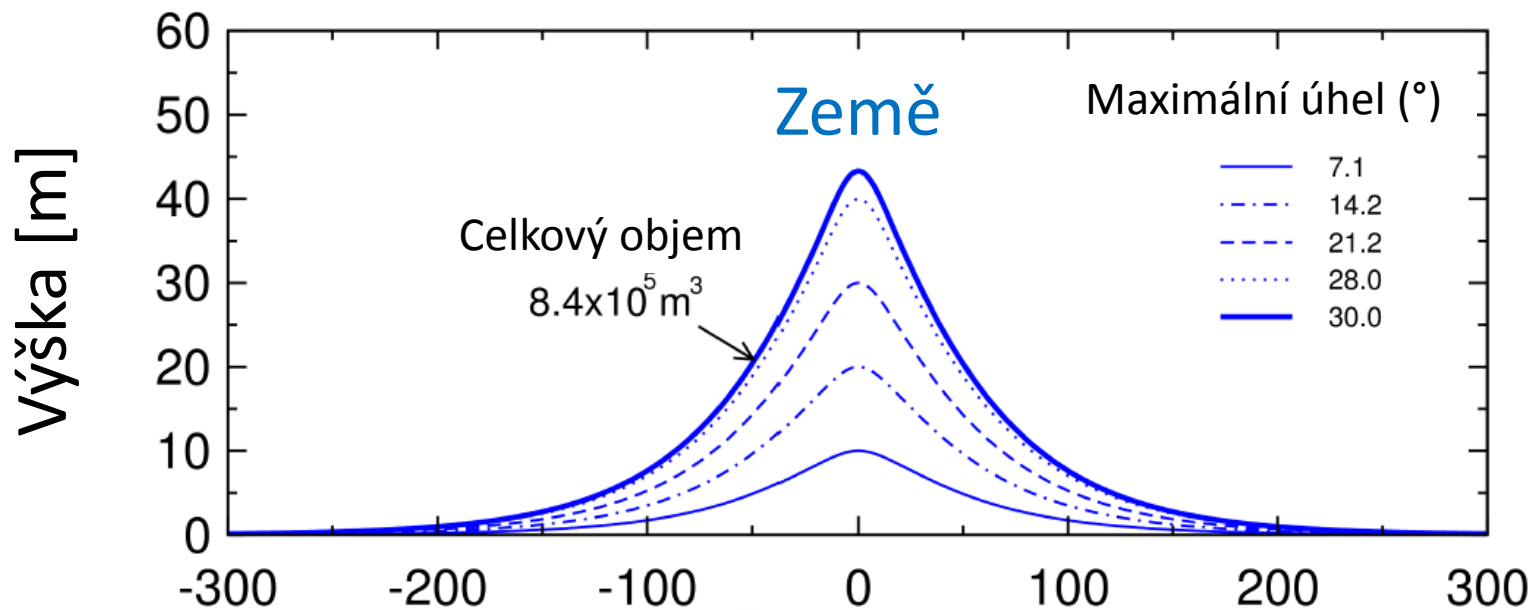
Pyroklastické
mračno

Svahové pohyby
(když je dosaženo
Kritického úhlu)

Vliv atmosféry a gravitace



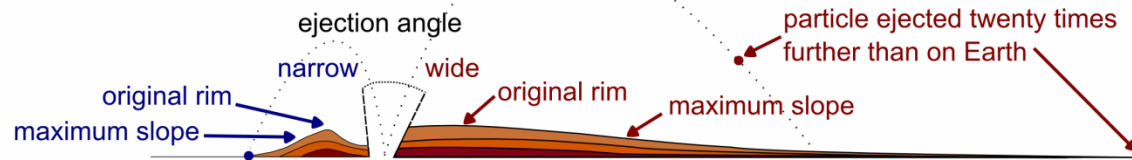
Počítáno pro částici o průměru **4 cm** a hustotě **850 kg.m⁻³**, počáteční rychlost **100 m/s**.



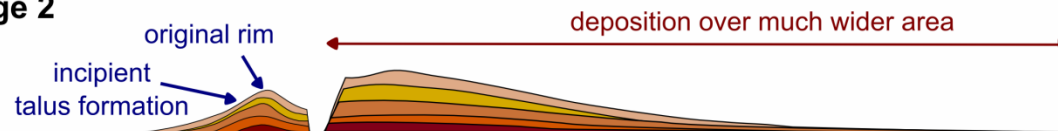
Earth

Mars

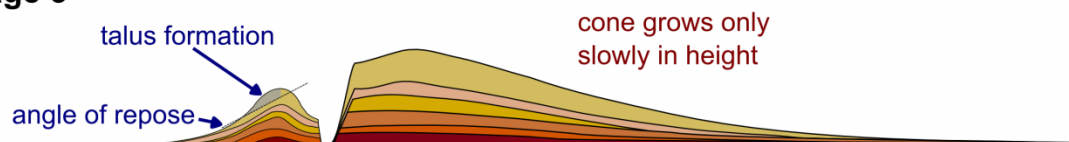
Stage 1



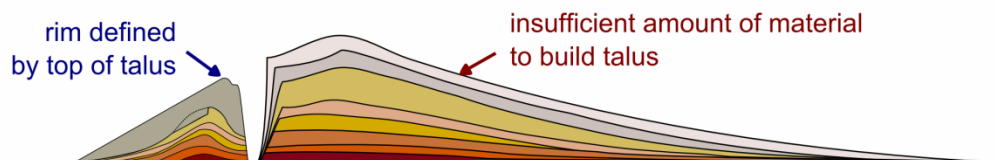
Stage 2



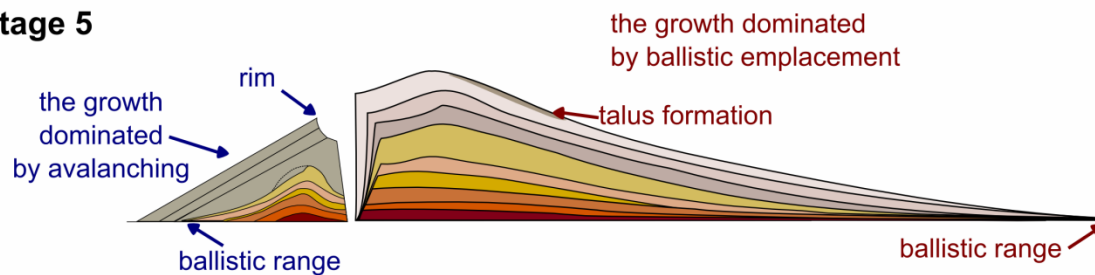
Stage 3

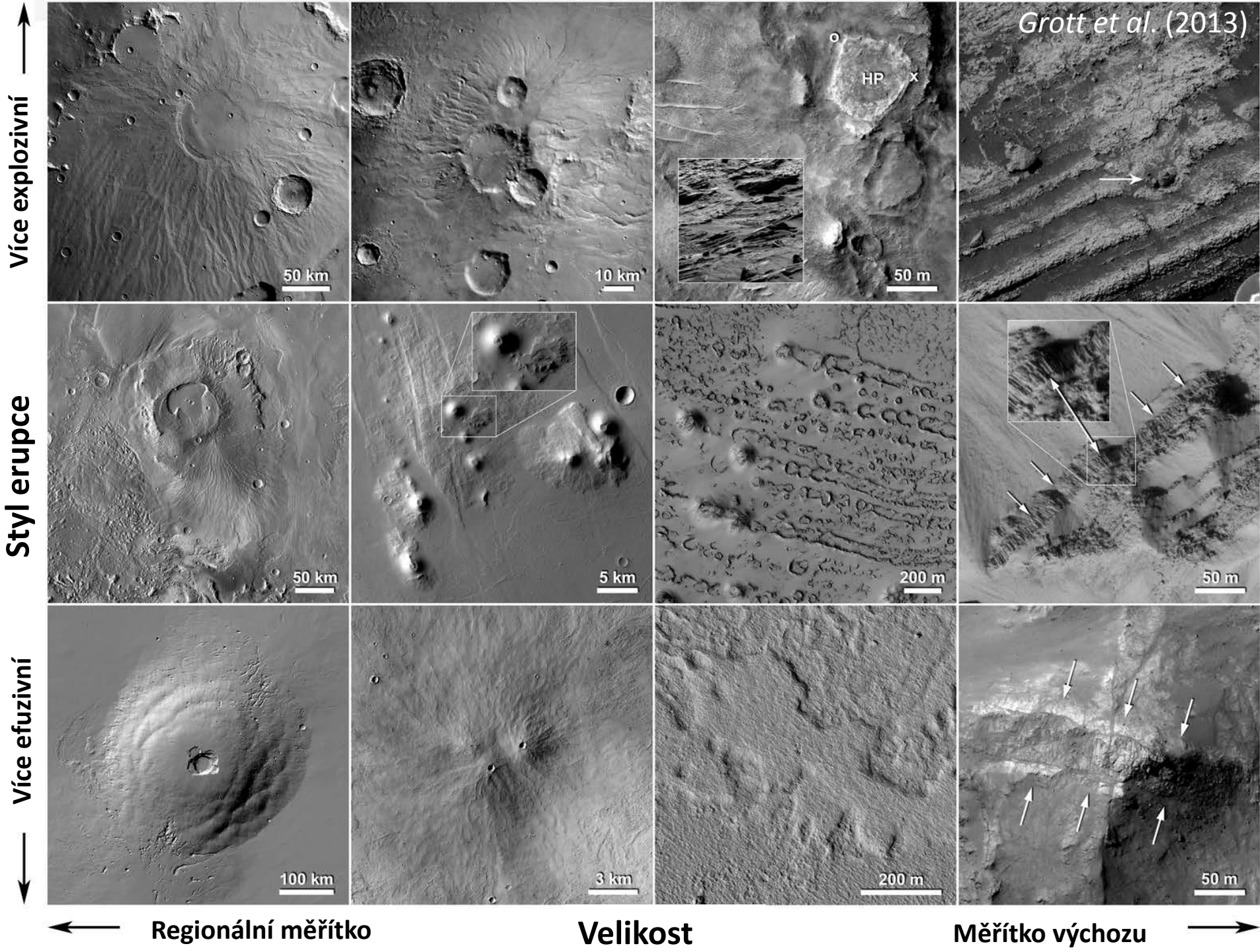


Stage 4

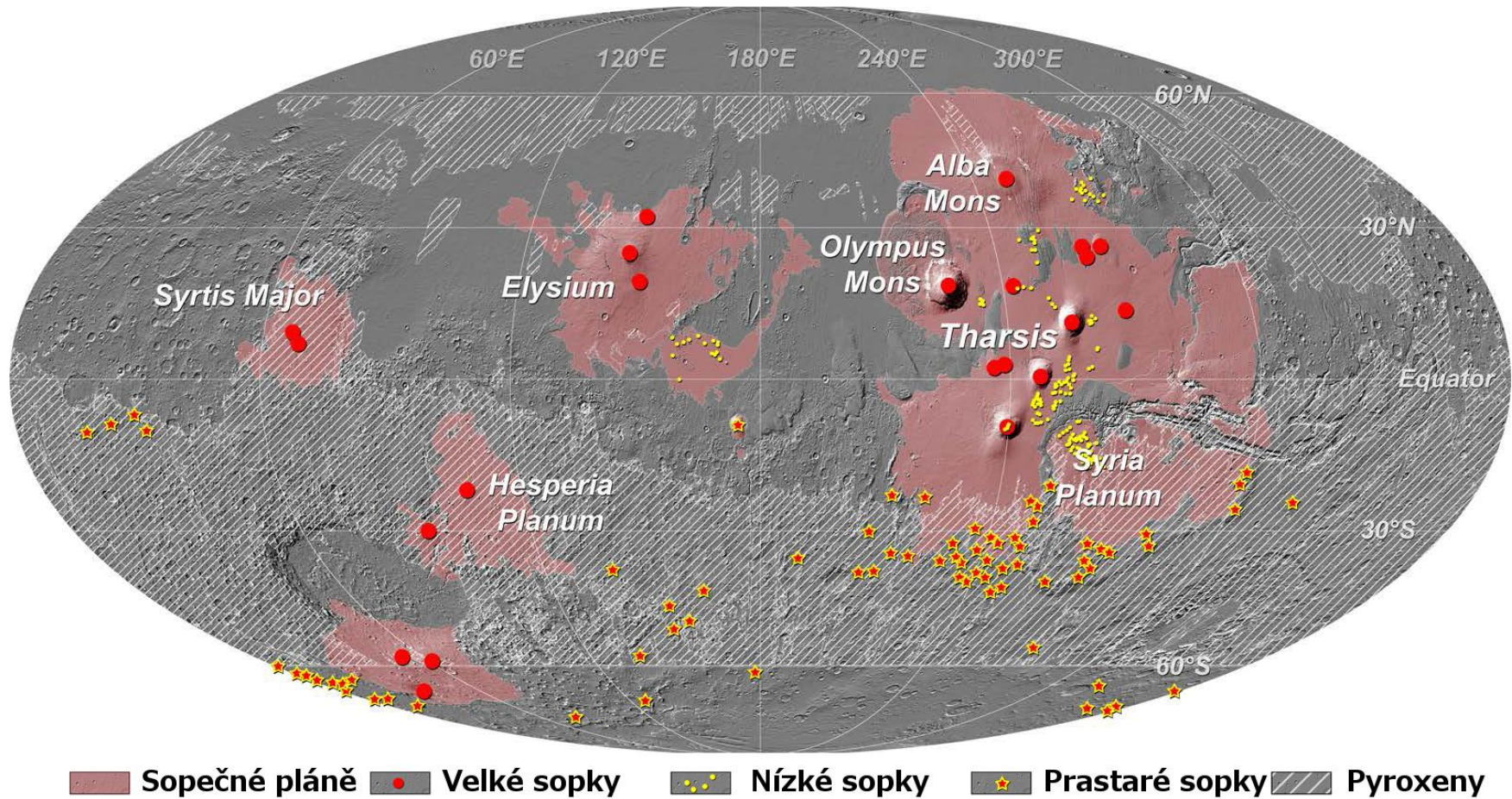


Stage 5



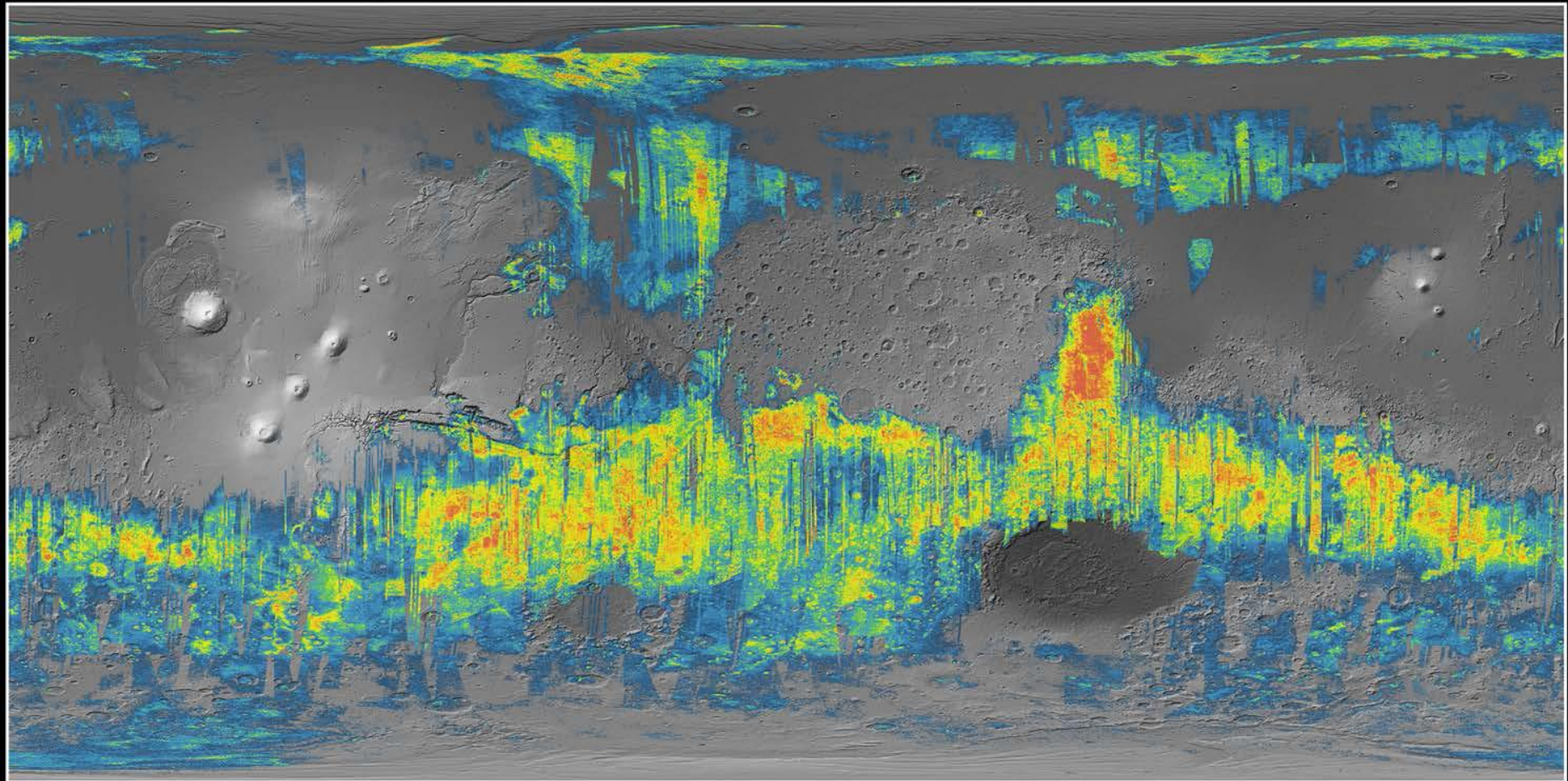


Rozšíření vulkanismu na povrchu



[Grott a kol. \(2013\)](#)

Přítomnost pyroxenu

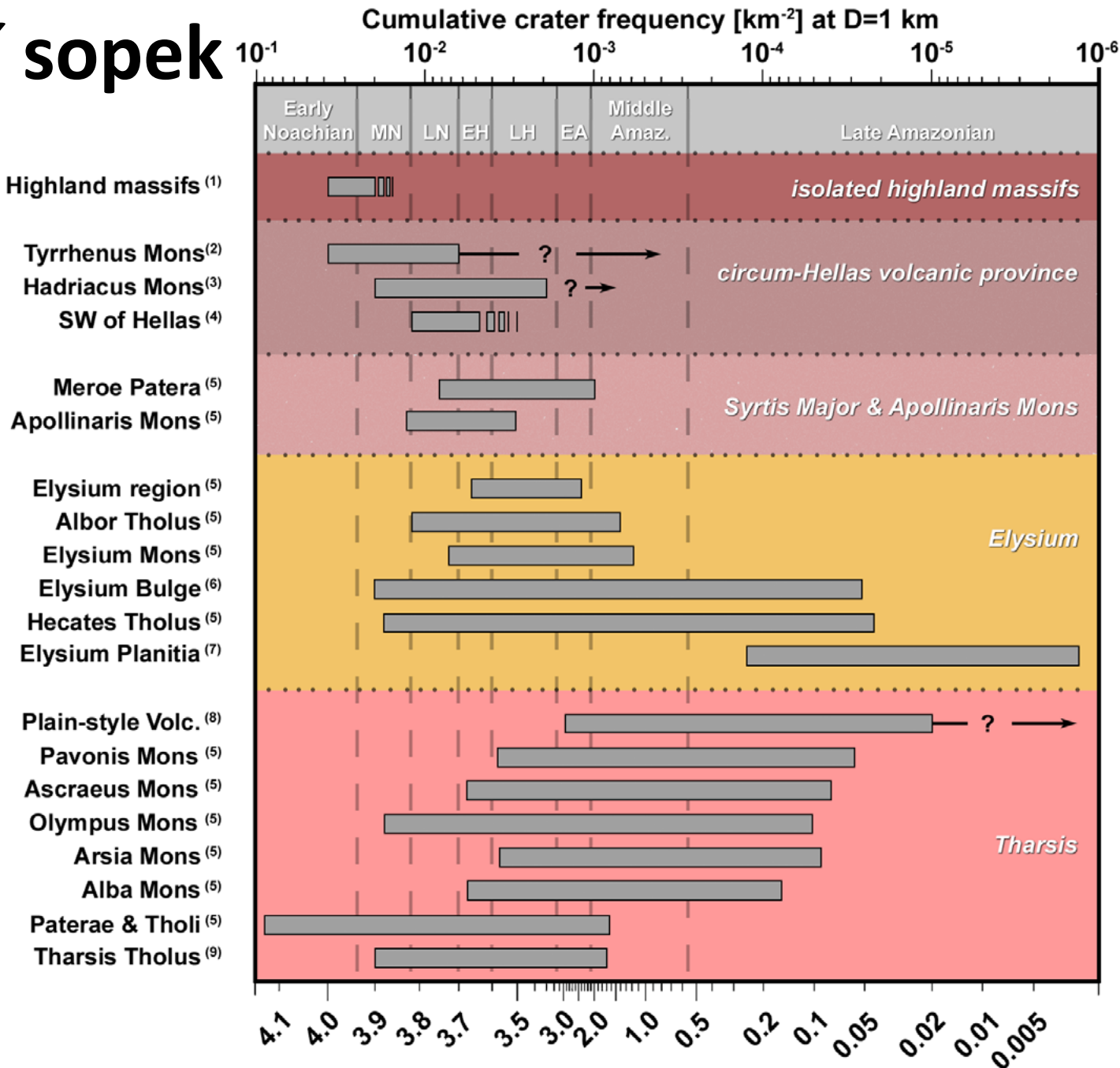


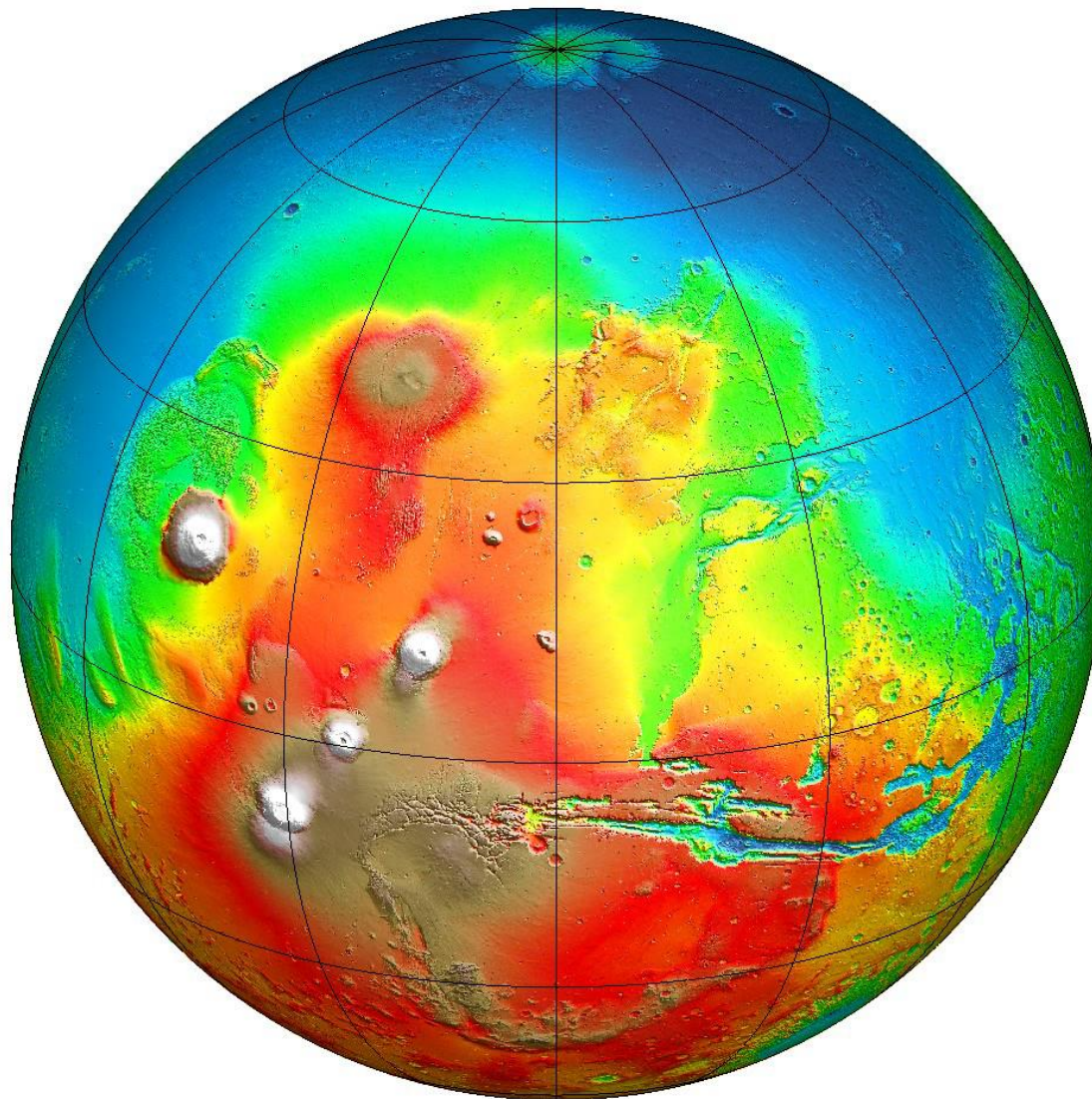
low abundance



high abundance

Stáří sopek

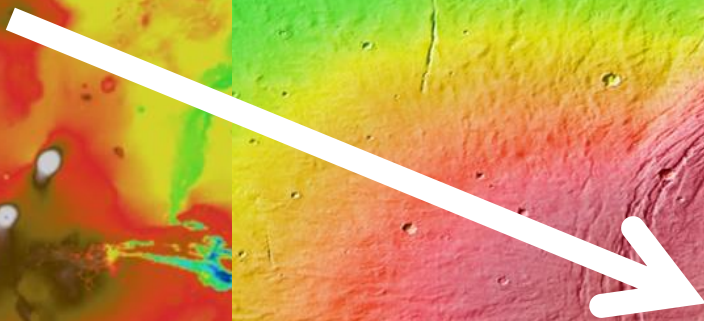




Proč oblast Tharsis vznikla?

Tonografická mapa Marsu

Alba Patera



Srážka Marsu s jiným tělesem

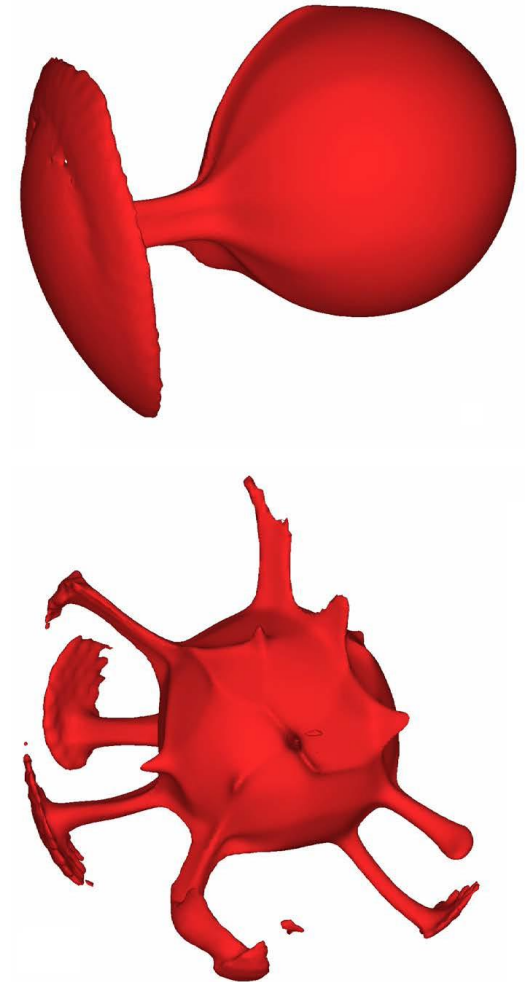
(např. Reese a kol., 2004)

Problémy impaktní hypotézy

- Hellas vůči Tharsis neleží přesně v opozici, vzájemné posunutí o 50° marsovské šířky
 - Hellas leží v opozici prastaré sopce Alba Patera
[Williams and Greeley, 1994](#)
- Vulkanismus v Tharsis probíhal po více jak 3,9 miliardy let
 - není jasné, jak by mohl impakt způsobit vulkanismus na odvrácené straně planety po tak dlouhou dobu

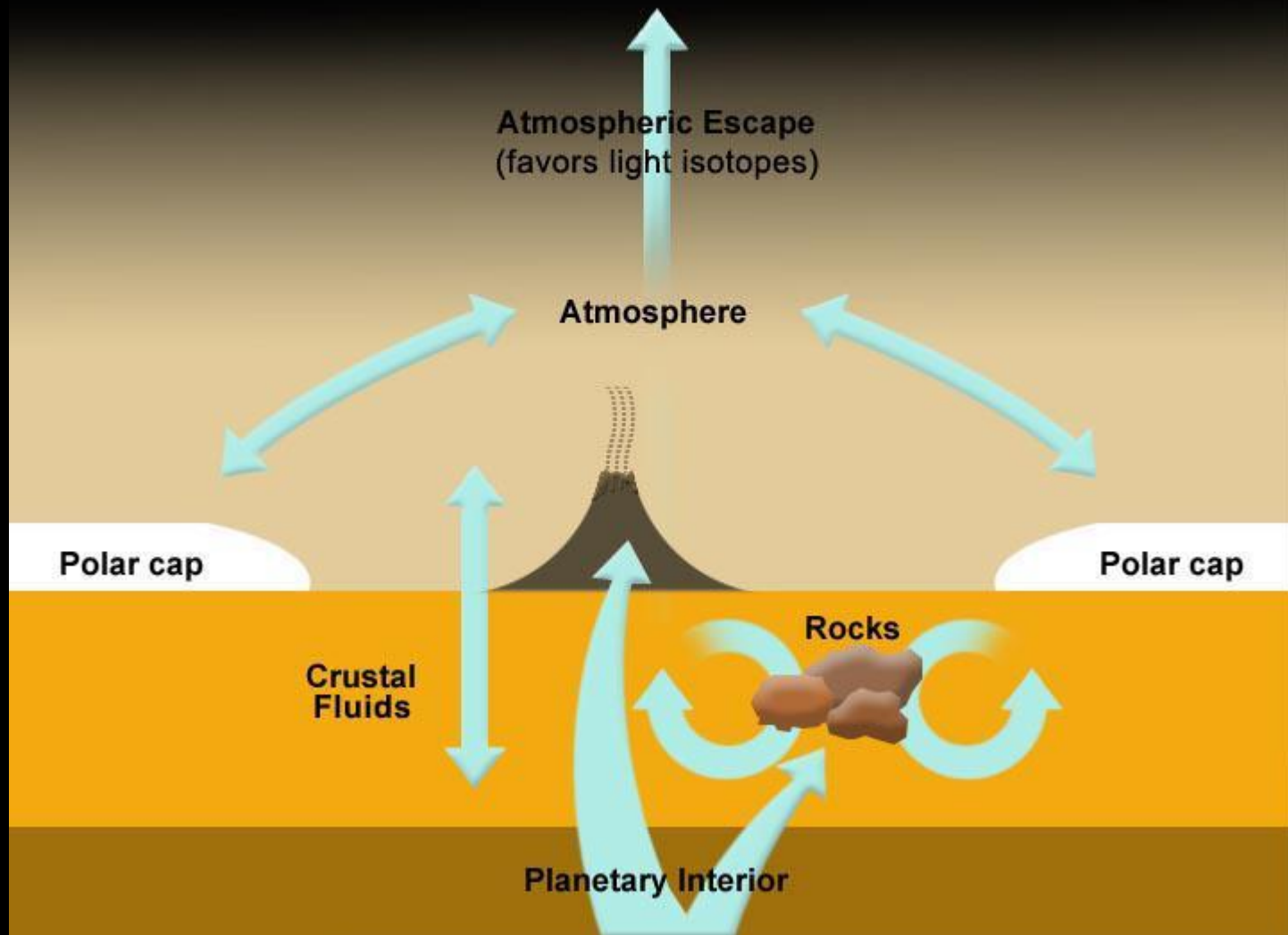
Tharsis vzniklo díky aktivitě plášťové plummy

- Obecně přijímané vysvětlení
 - Byla pluma jedna? [Zuber, 2001](#); [Schubert et al., 2001](#)
 - Nebo více? [Kiefer, 2003](#)
- Představuje Tharsis
 - Vyklenutí litosféry?
 - Postupné ukládání lávových proudů?
 - Ztluštění kůry vlivem intruzí?



Harder a Christensen, 1996

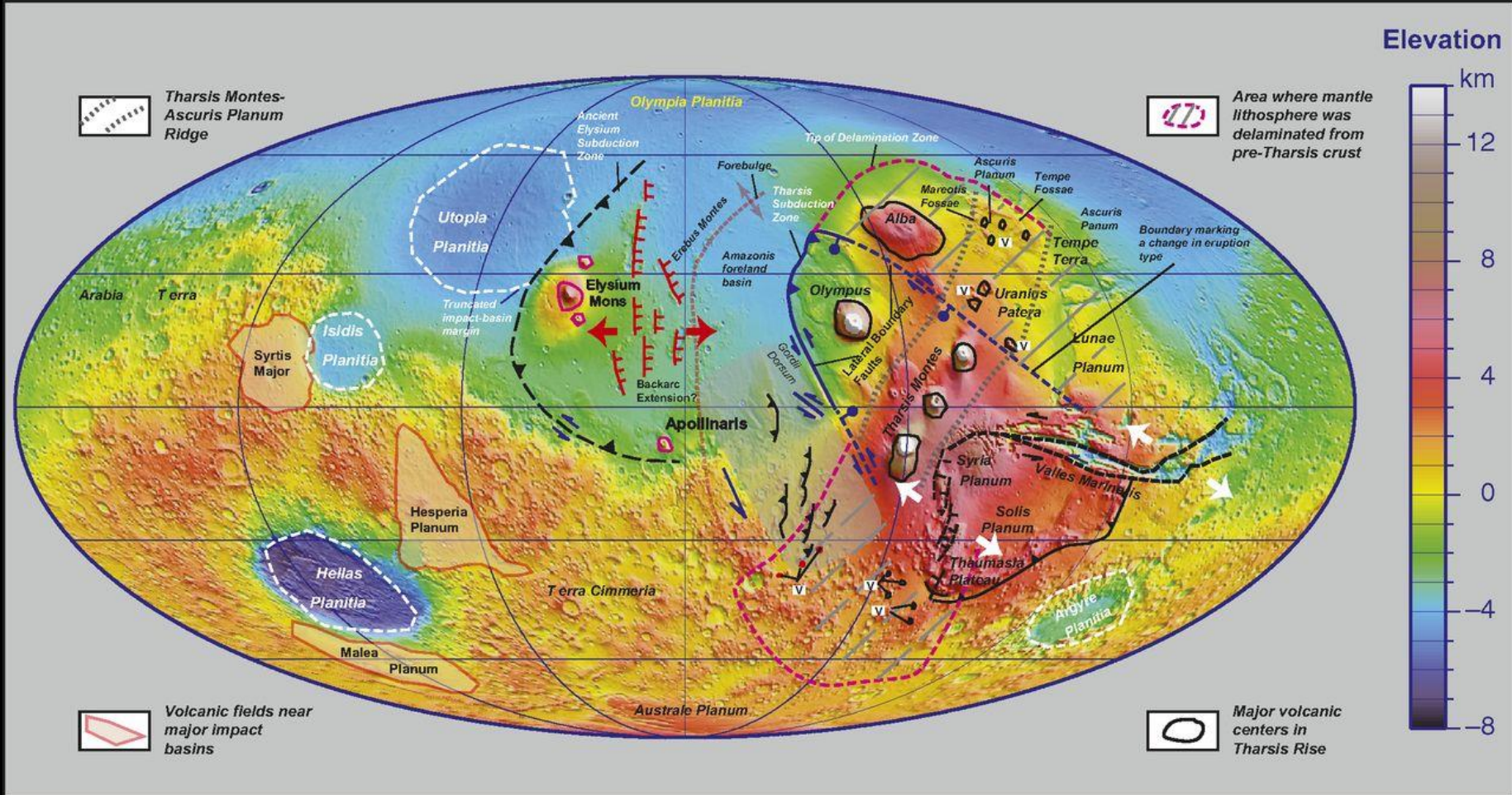
Volatiles on Mars: Simplified Reservoirs and Interactions



Shrnutí Mars

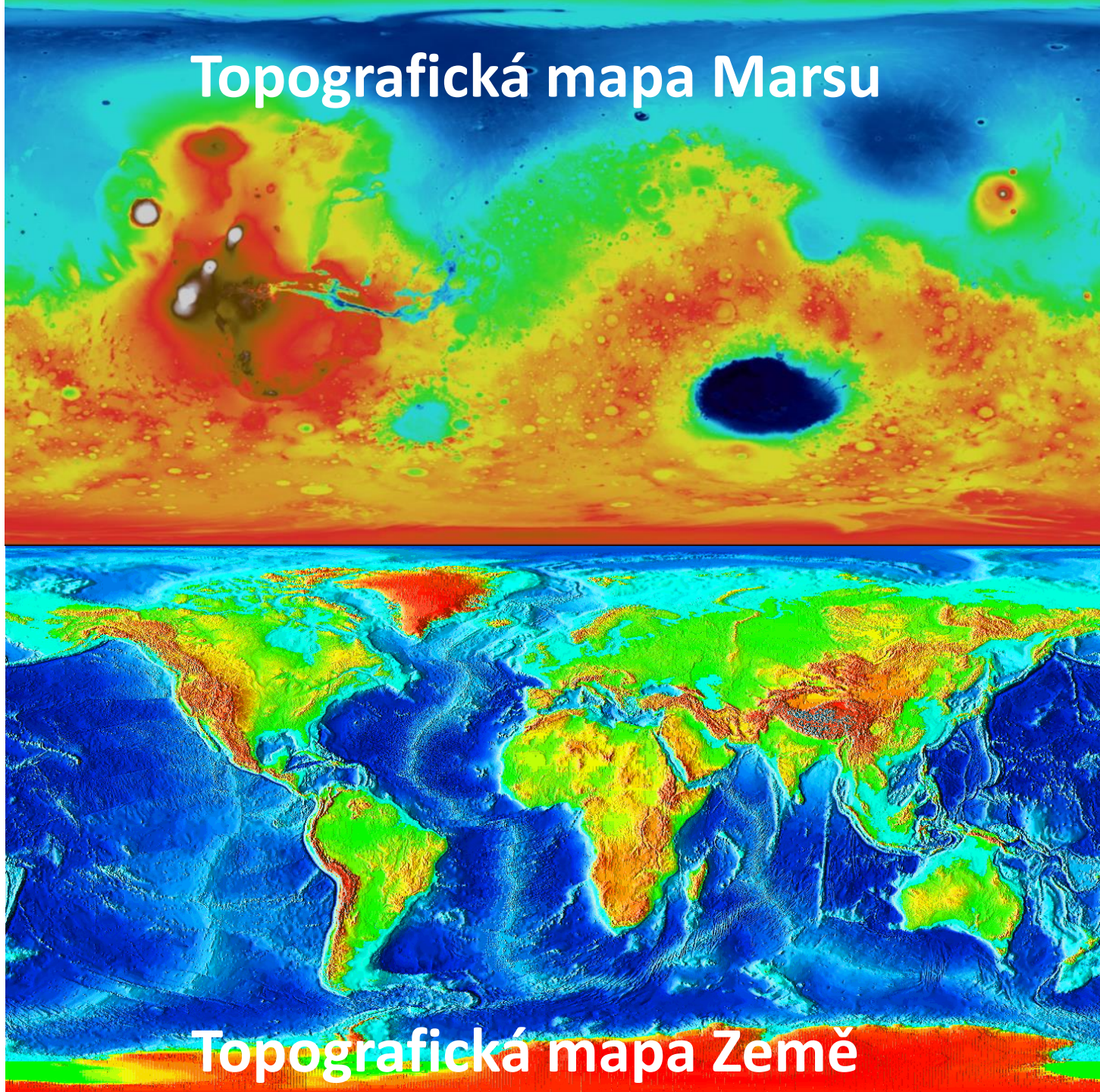
- Povrch Marsu významně utvářen, ale i přetvářen sopečnou činností
- Veliká variabilita tvarů/druhů sopečných těles
- Sopečná činnost přítomna po celou dobu historie planety
- Její působení mělo globální vliv na celou planetu (atmosféra, hydrosféra, pozice povrchu...)

Desková tektonika a Mars?



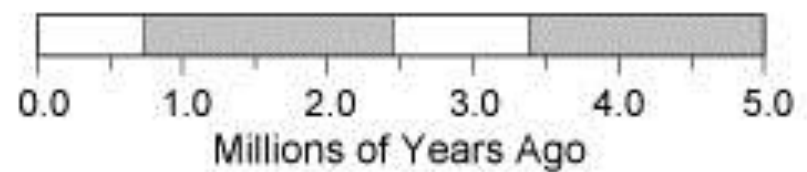
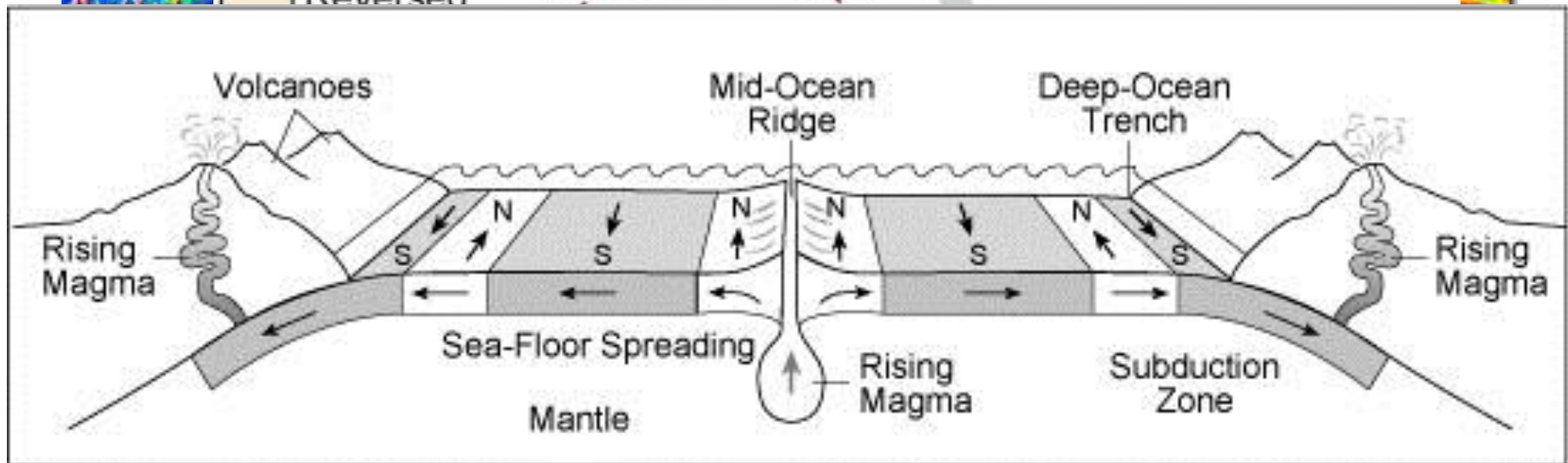
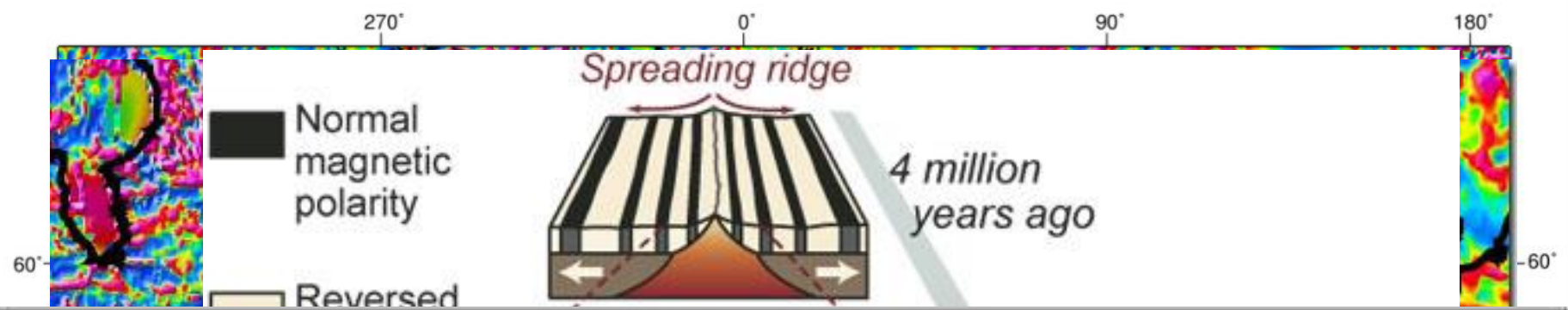
[Yin \(2012\)](#)

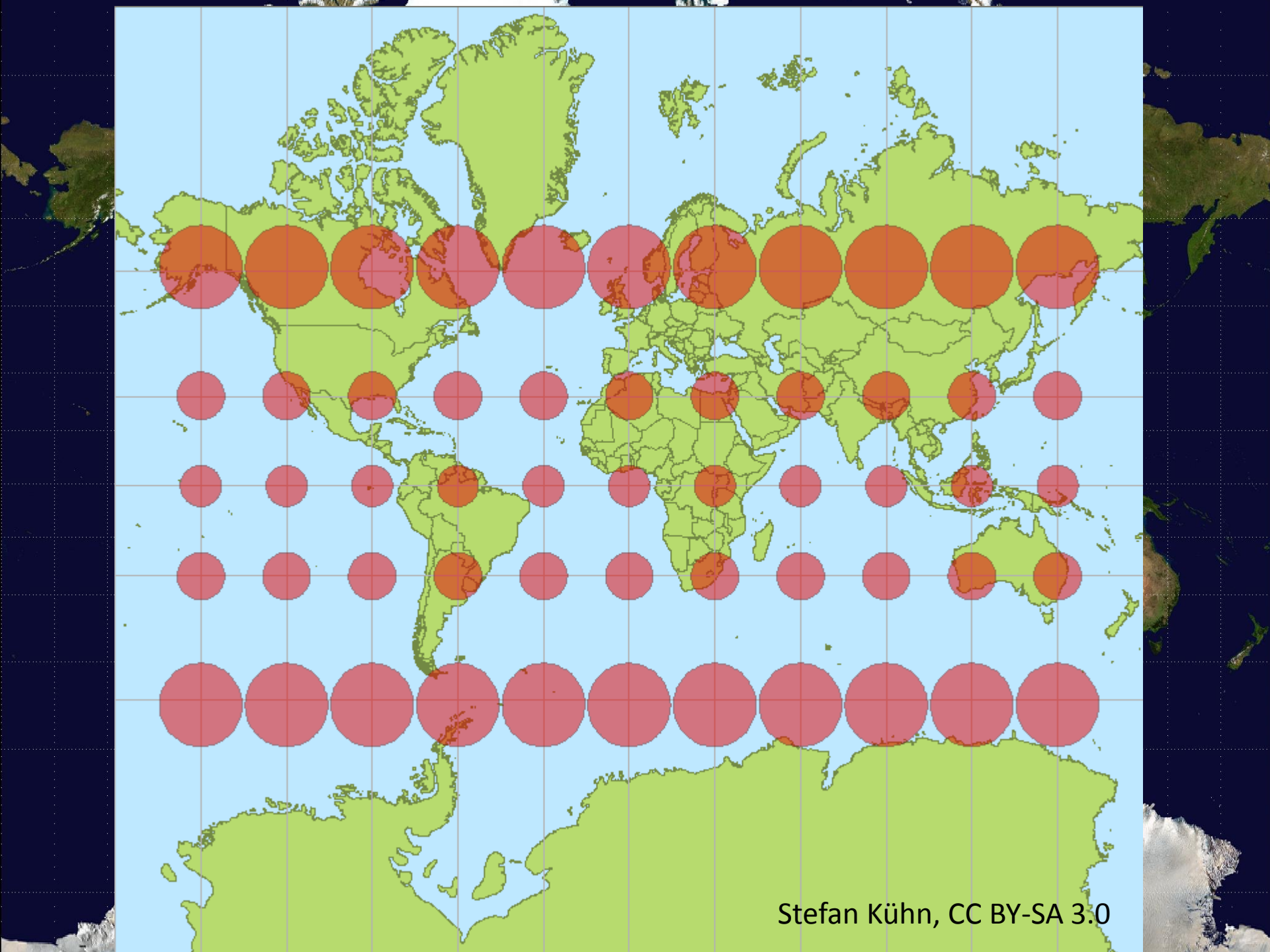
Topografická mapa Marsu



Topografická mapa Země

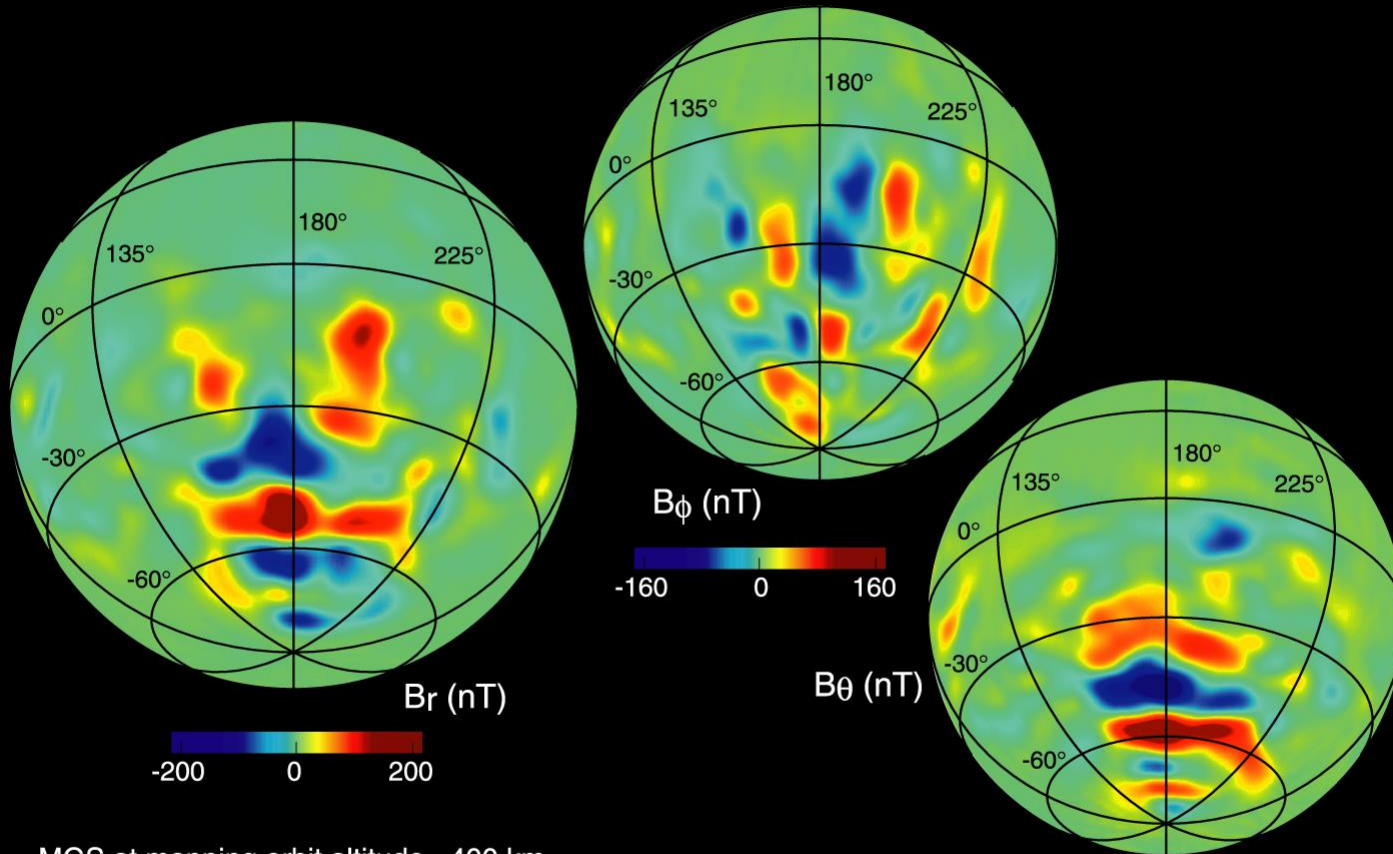






MARS CRUSTAL MAGNETISM

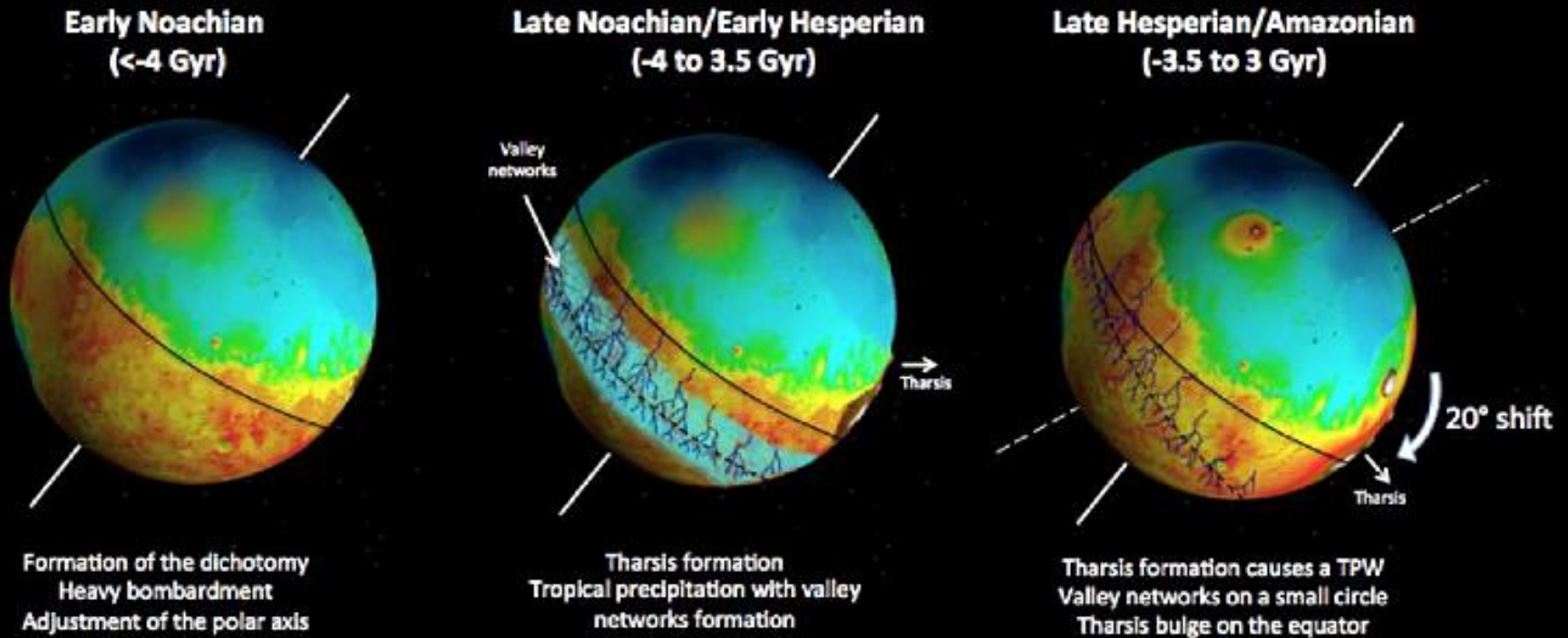
MGS MAG/ER



MGS at mapping orbit altitude ~ 400 km
 1° by 1° resolution

Connerney et al., *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4015-4018, 2001.

Zformování Tharsis a true polar wander



Je Mars basaltová planeta?



NASA

Změna chemismu v čase



NASA/JPL-Caltech/LANL/CNES/IRAP/LPGNantes/CNRS/IAS/MSSS

- MSL v kráteru Gale objevila přítomnost „tonalit-trondhjemit-granodioritu“ 😊
 - Horniny bohaté na světlé minerály, bohaté na křemík
- Původ na úbočí kráteru
- Jak hornina vznikla?
 - Absence deskové tektoniky
 - Postupné zanořování bazaltové kůry do roztaveného pláště planety
 - Parciální tavení bazaltu dalo vznik horninám bohatším na křemík
- Vyvrácení paradigmatu, že Mars je bazaltová planeta
 - Původně křemíkem bohatá kůra