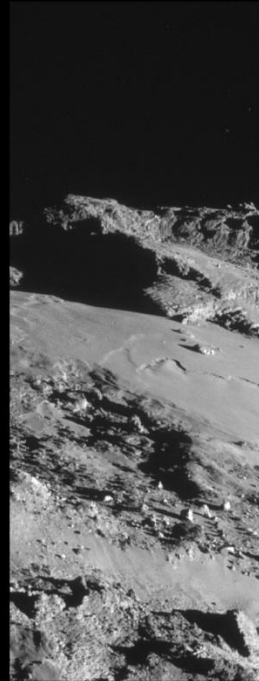
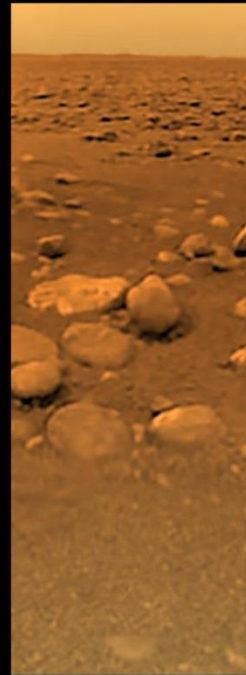
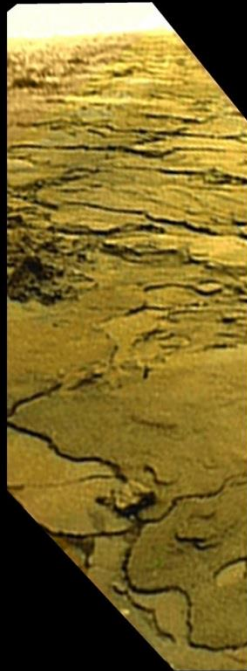


Vulkanismus ve sluneční soustavě

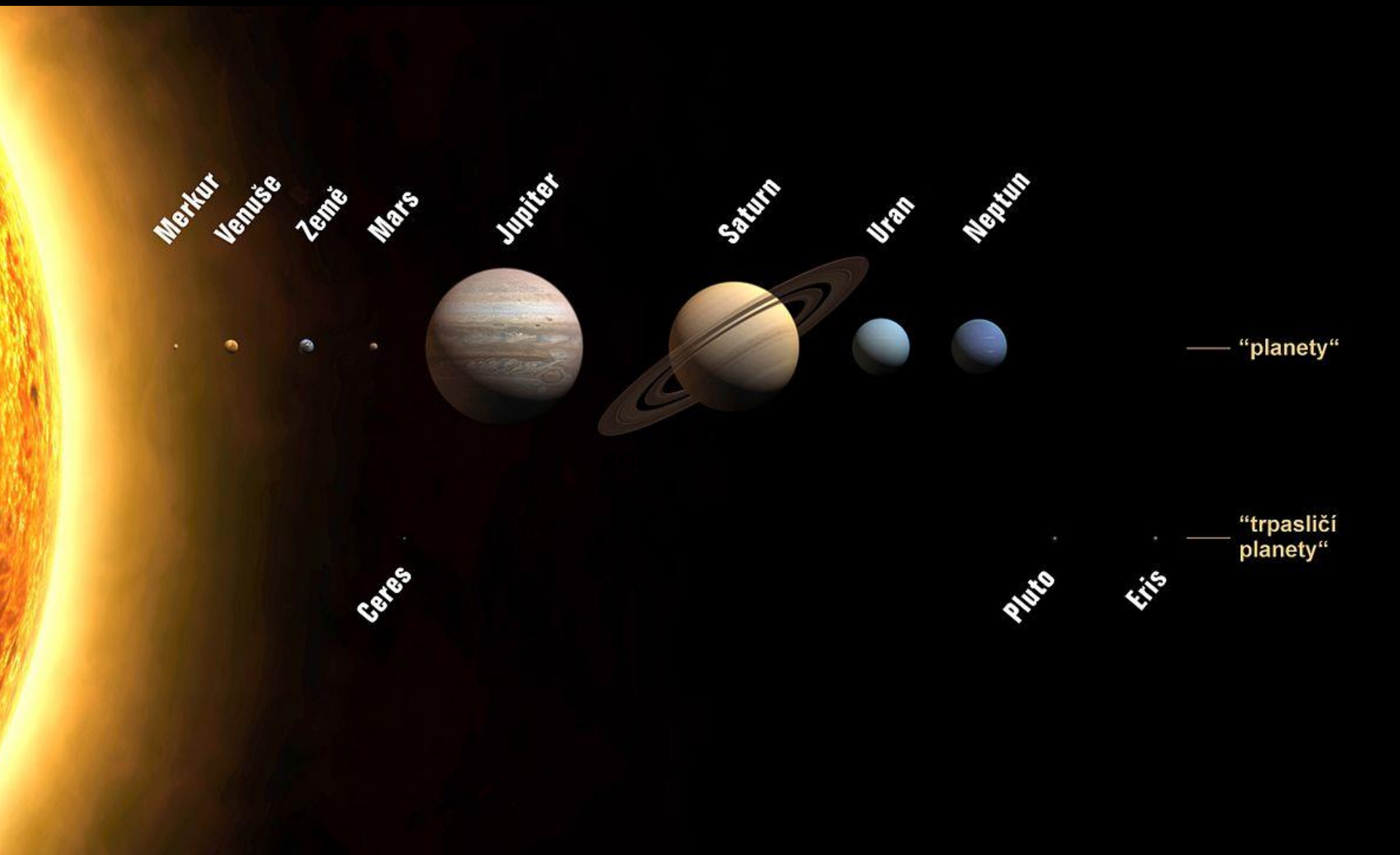


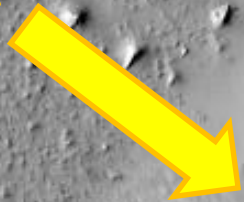
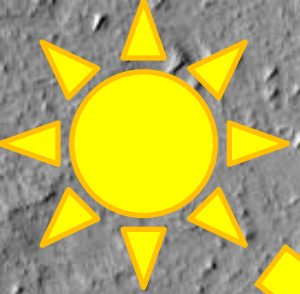
Petr Brož

Petr.broz@ig.cas.cz

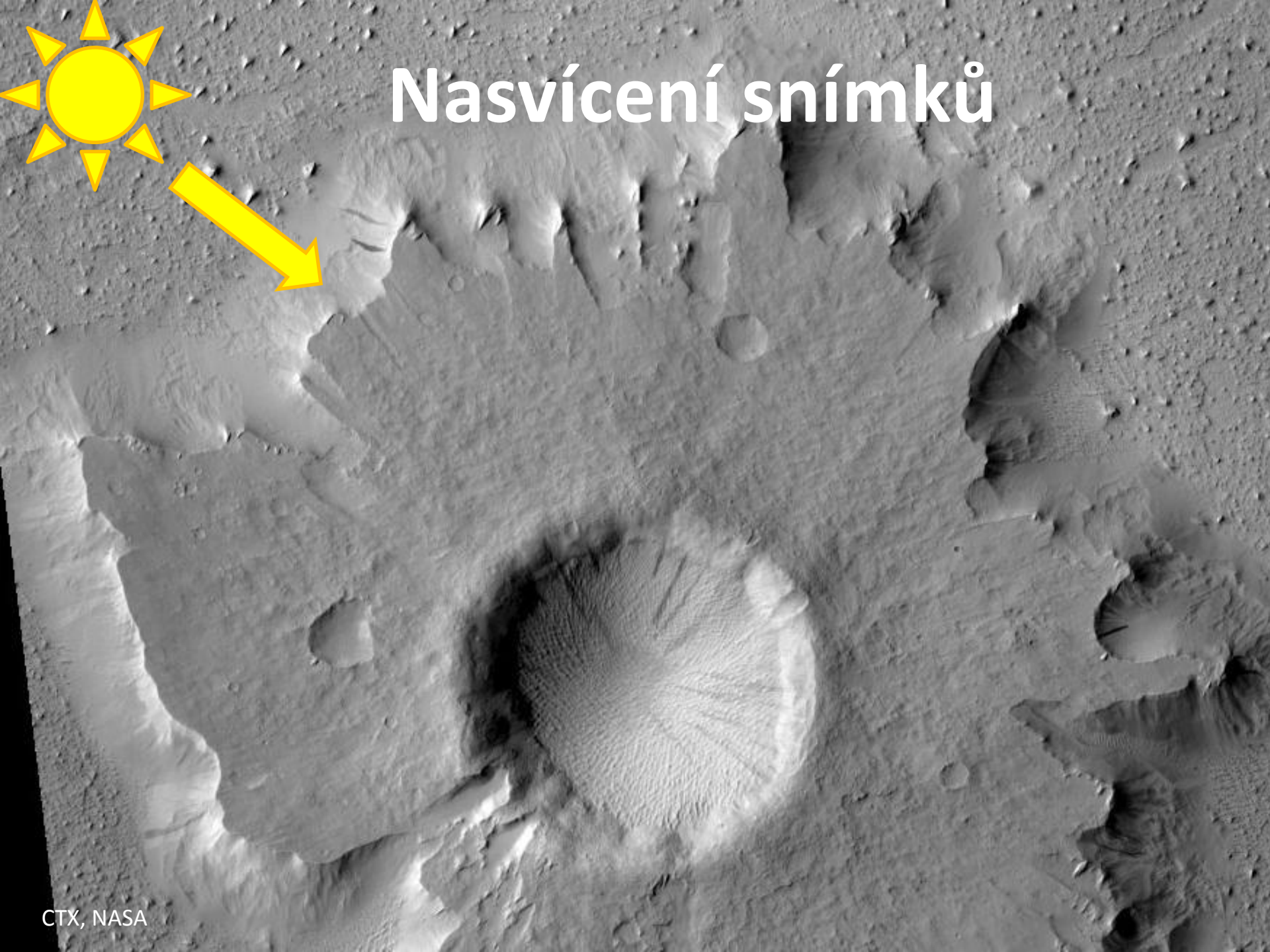


GEOFYZIKÁLNÍ ÚSTAV
AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY, v. v. i.

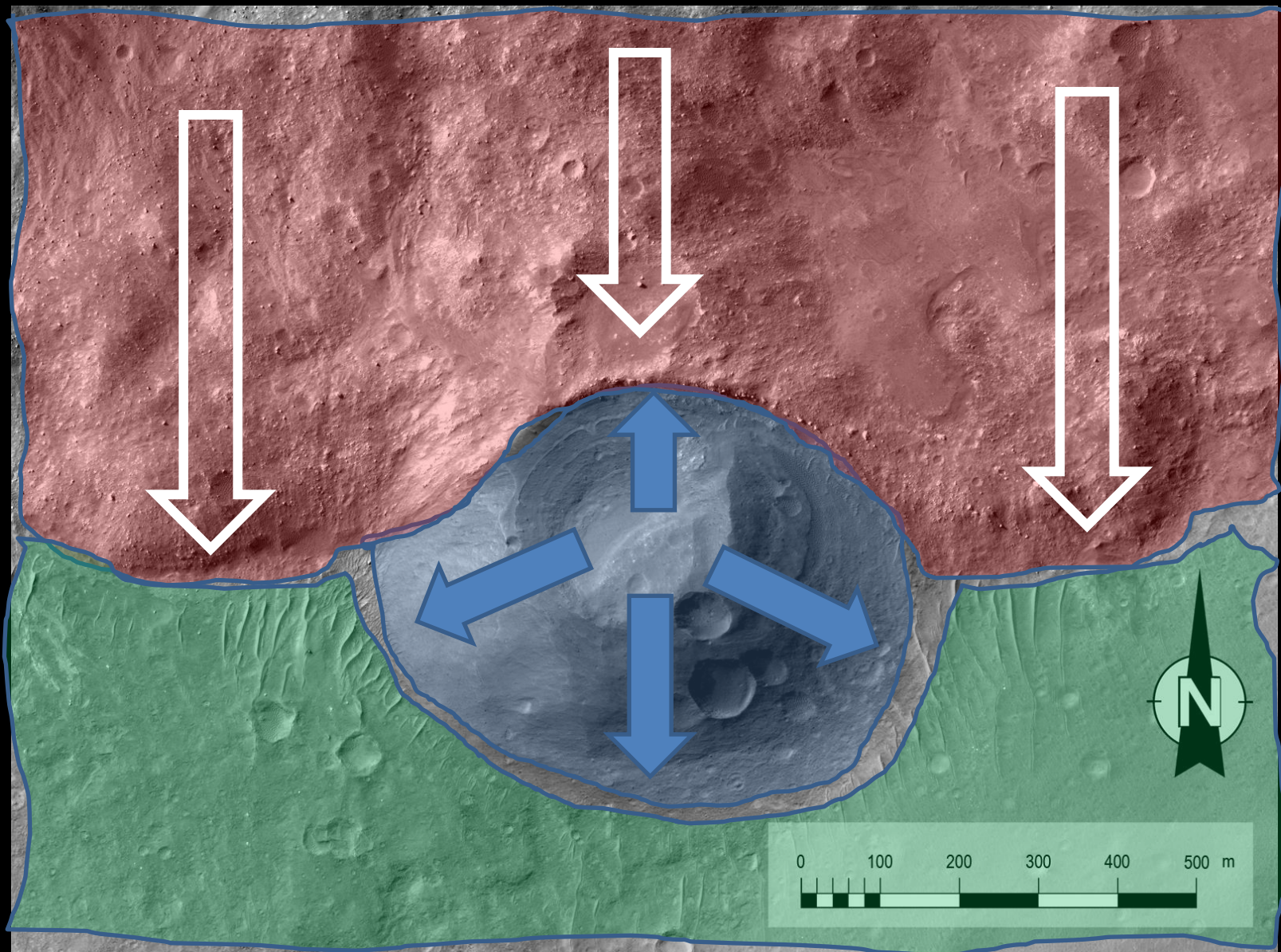




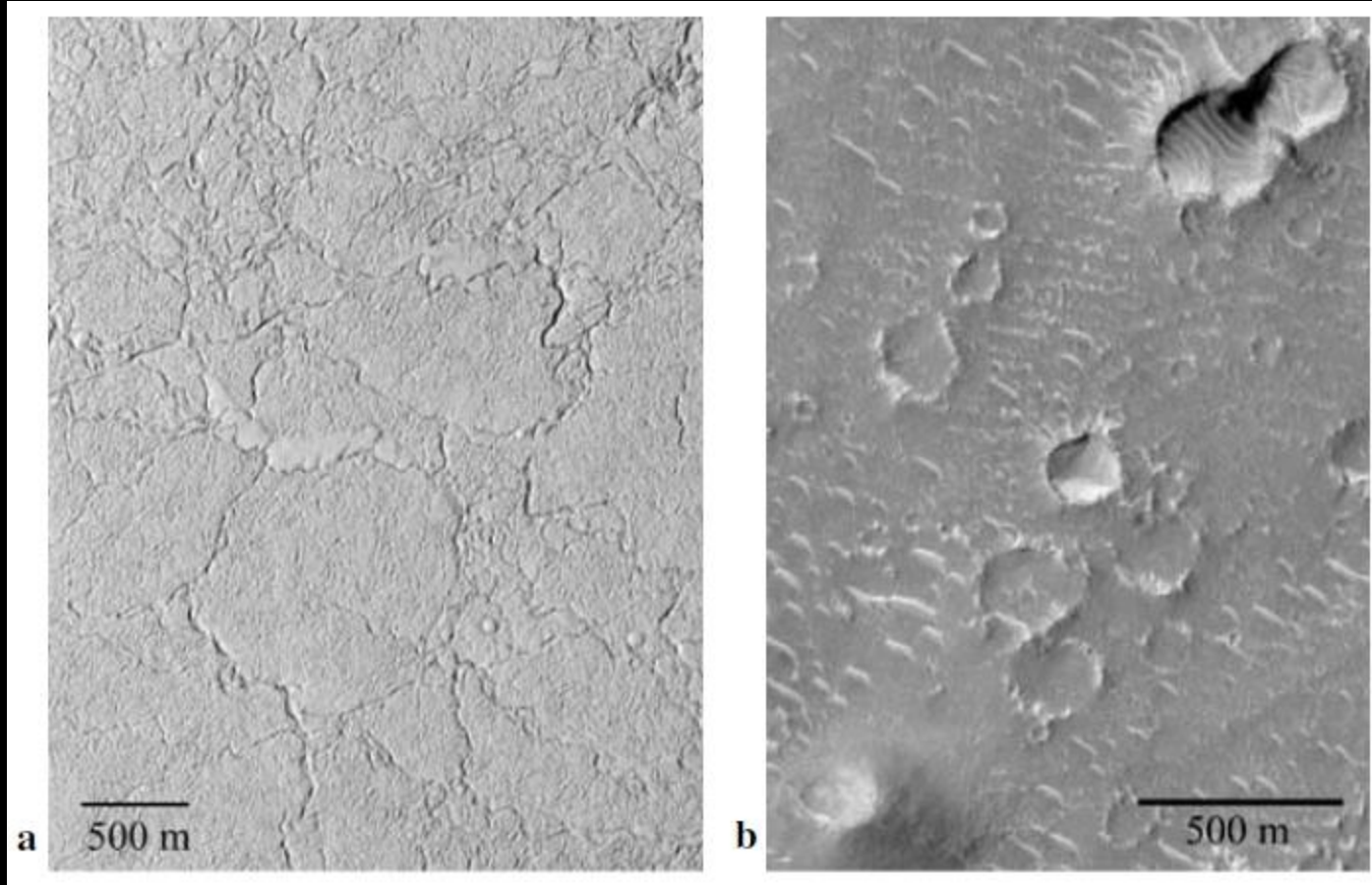
Nasvícení snímků



Určování stáří povrchu: relativní

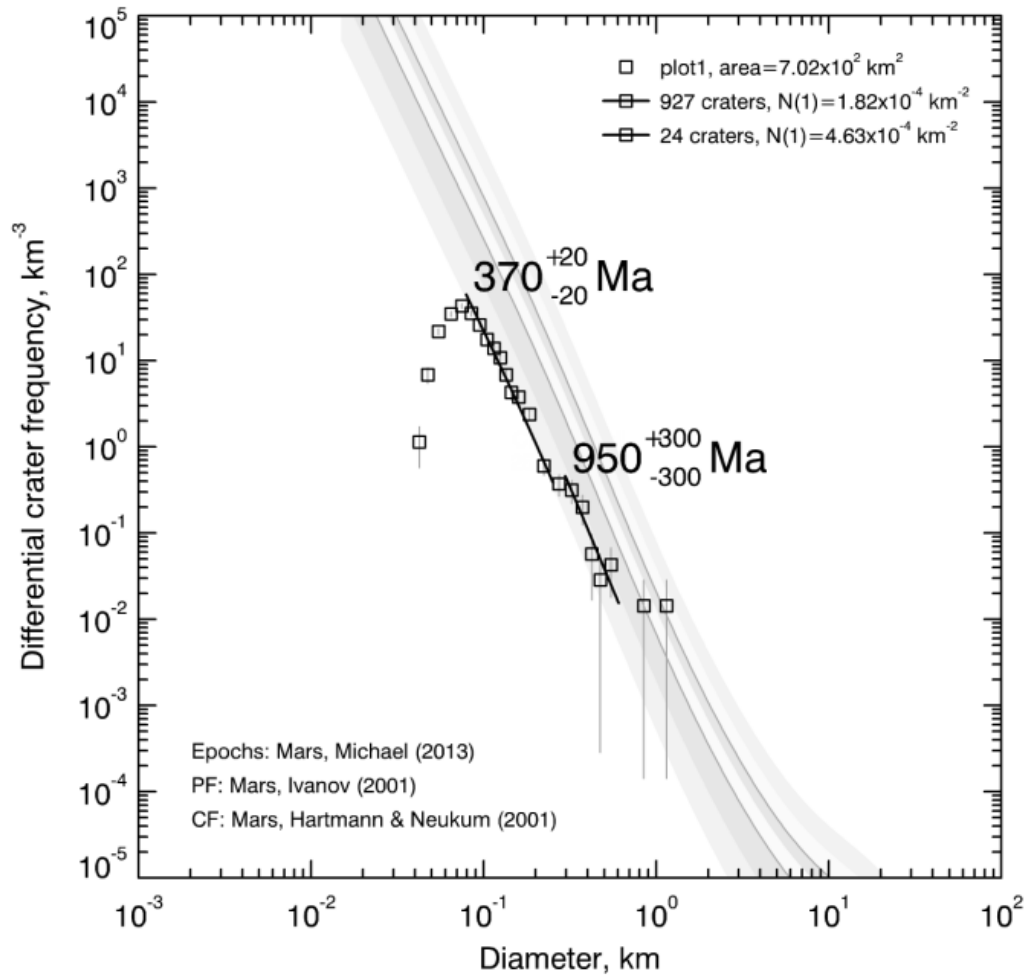


Určování stáří povrchu: „absolutní“



Hartmann & Neukum, 2001

$N(1), \text{km}^{-2}$



(1986)

Amazonian

0



Merkur

základní parametry

- Výrazně eliptická oběžná dráha (0,31 vs. 0,47 AU)
- Průměr 4879,3 km (0,383 Země)
- Střední hustota 5,4 g/cm³ (Země 5,15 g/cm³)
- Gravitace na rovníku 3,7 m/s² (0,377 g)
- Oběh okolo Slunce za 88 dní, extrémně pomalá vlastní rotace (3 otočení během jednoho oběhu)
- Těleso v podstatě bez atmosféry

Průzkum Merkuru

- Až do začátku kosmického věku minimum informací
- Merkur se totiž nevzdaluje od Slunce dále než na 28° , což znemožňuje jeho přímé pozorování ze Země s větším rozlišením a přesností
- Současně leží hluboko v gravitační studni Slunce, enormní nároky na konstruktéry sond

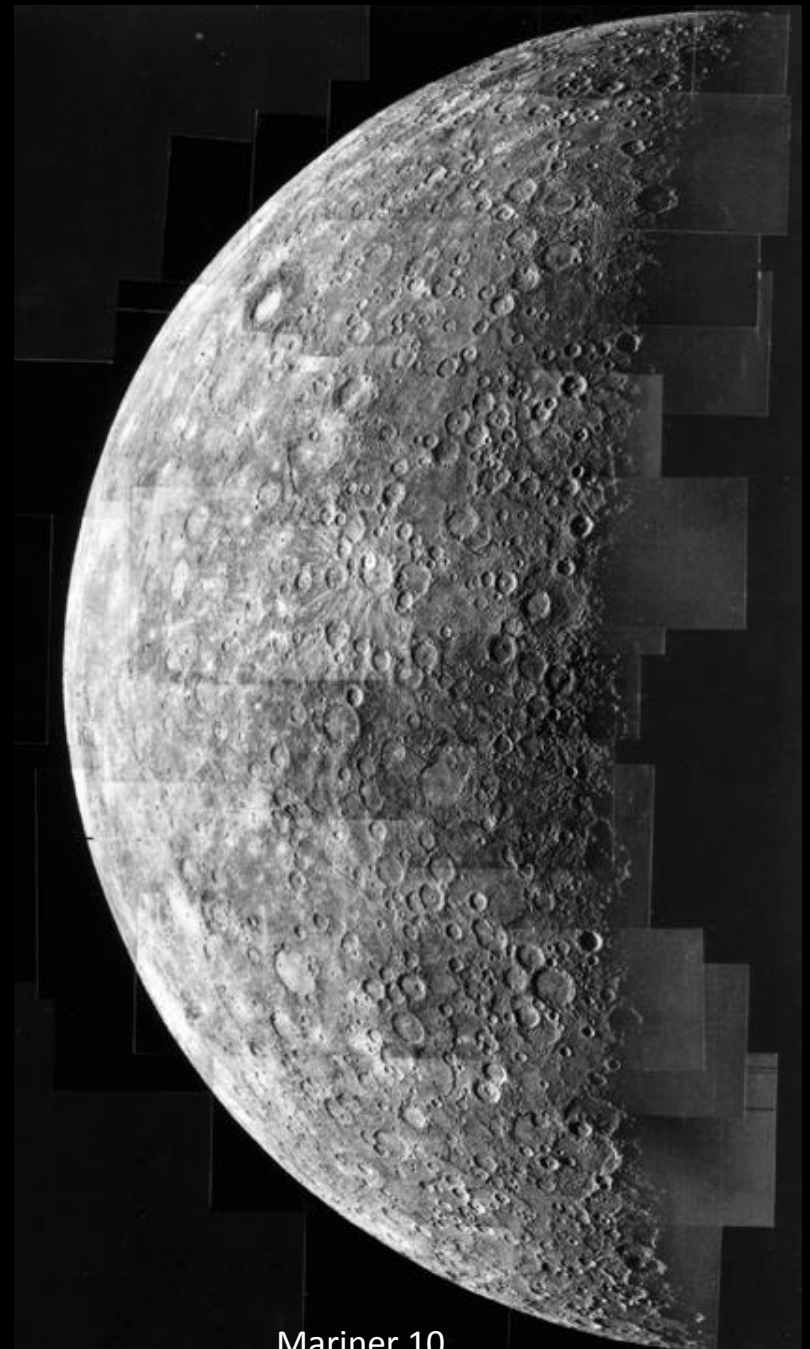
Kosmický věk – Mariner 10

- Tři průlety (1973- 1974), pořízeno 2800 snímků
- Spatřeno pouze 40 až 45 % povrchu tělesa
- Objevení tenké „atmosféry“ tvořené héliem a slabého magnetického pole



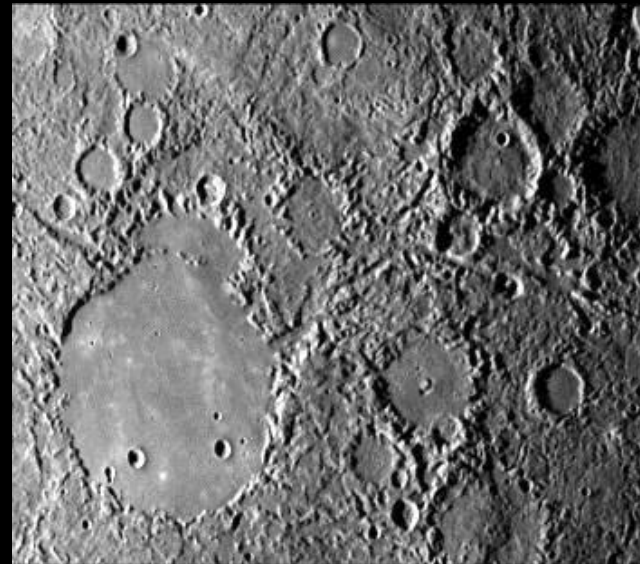
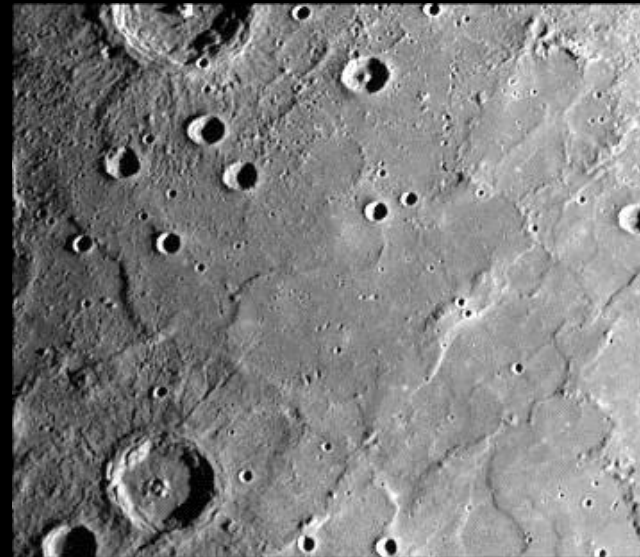
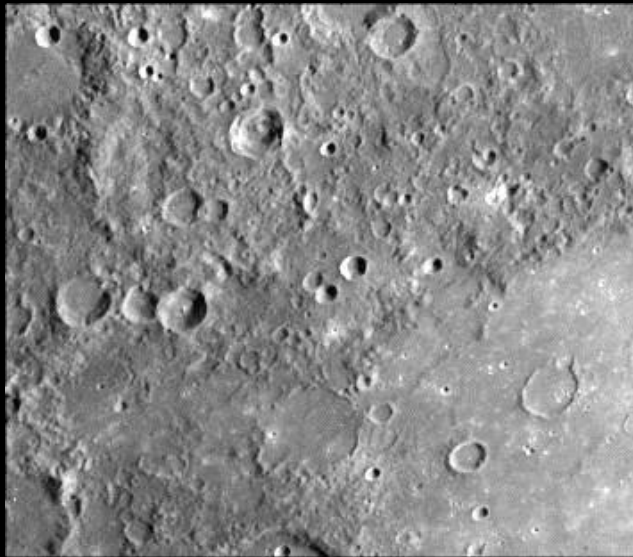
První objevy


- Značná podobnost s Měsícem
- Povrch silně rozrušen impaktními krátery
 - Srážky za větších rychlostí, dáno pozicí Merkuru v gravitační studně Slunce
 - Ejecta má menší prostorové rozšíření než na Měsíci, dáno vyšší gravitací
- Absence velkých sopek, ale přítomnost tektonických poruch



Mariner 10

Hladké pláně





**Rozlišení snímků získaných sondou Mariner 10
neumožňovalo rozlišit, jestli se jedná o sopečné
pláně či nikoliv**

Snímek Hephaestus Fossae , Mars
Mars Express, CC BY-SA IGO 3.0.

MESSENGER

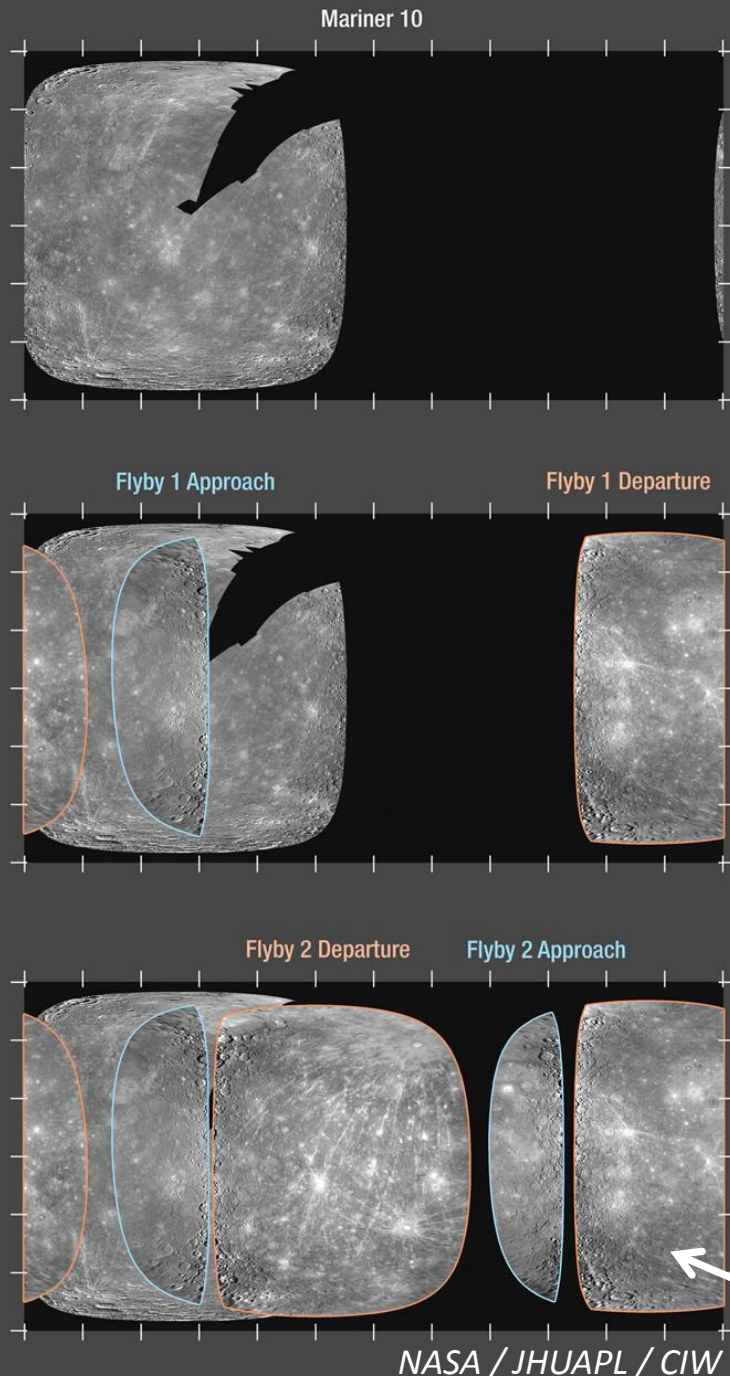
- Nejprve tři průlety, později naveden na oběžnou dráhu
 - První průlet (1/2008)
 - Druhý průlet (10/2008)
 - Třetí průlet (9/2009) („safe mode“ vedoucí ke ztrátě dat)
 - Navedení na oběžnou dráhu (3/2011)
 - Zřícení na povrch planety (4/2015)

MESSENGER

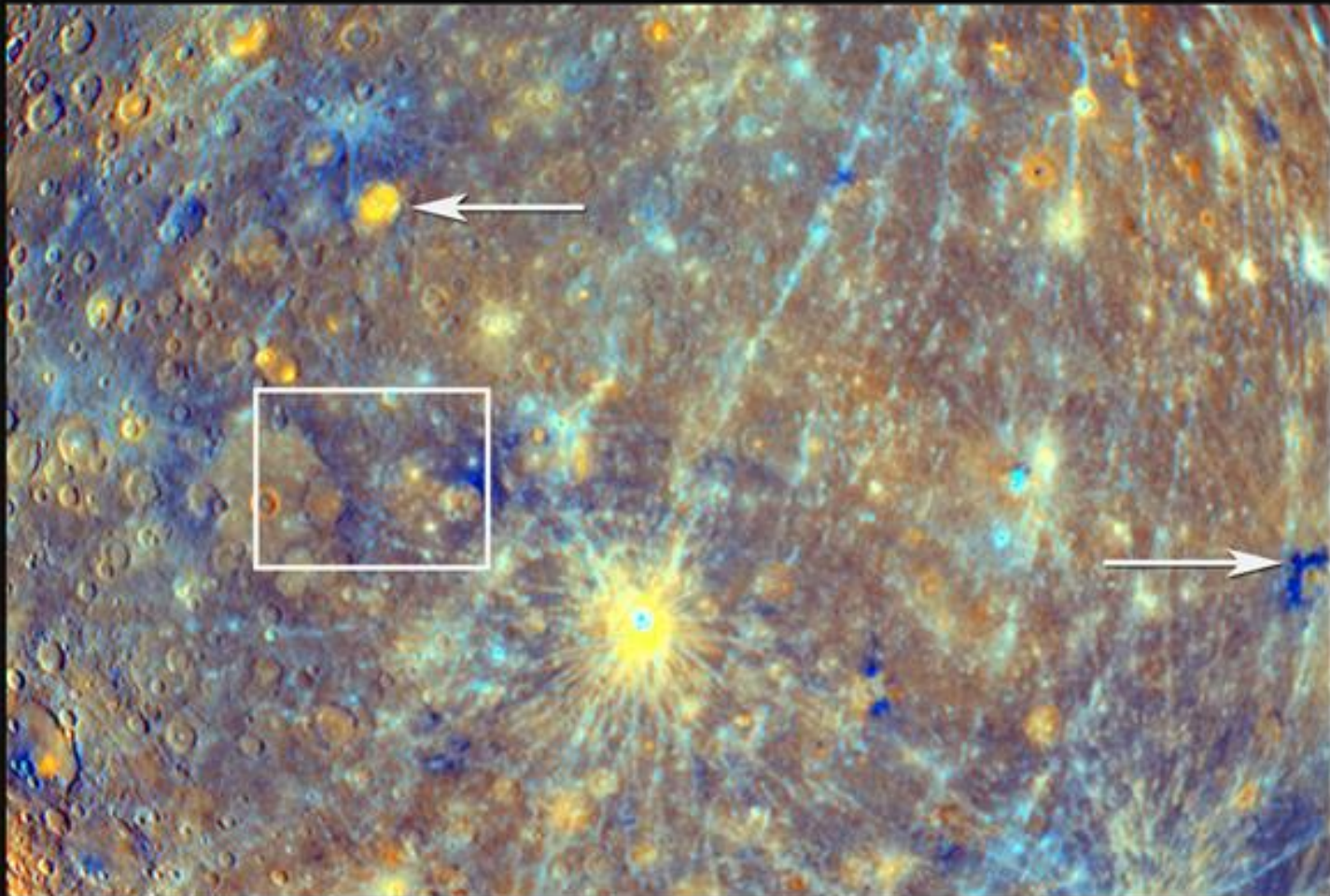
- Nejprve tři průlety, později naveden na oběžnou dráhu
 - První průlet (1/2008)
 - Druhý průlet (10/2008)
 - Třetí průlet (9/2009) („safe mode“ vedoucí ke ztrátě dat)
 - Navedení na oběžnou dráhu (3/2011)
 - Zřícení na povrch planety (4/2015)

- Globální mozaika s rozlišením 250 m/pixel

Nově ca 80 % povrchu planety, 90 % celkem



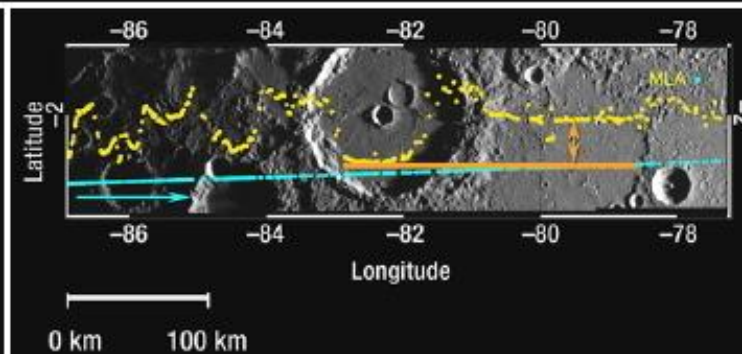
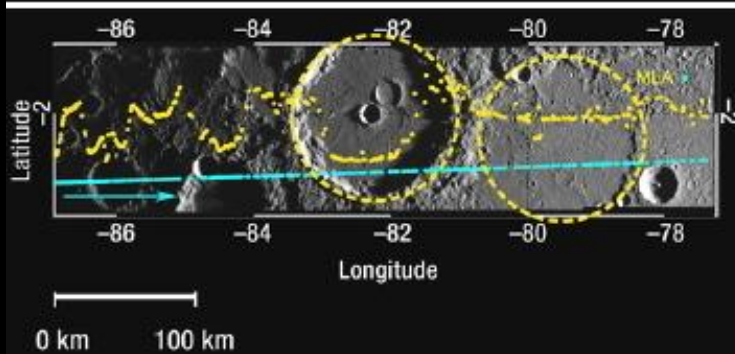
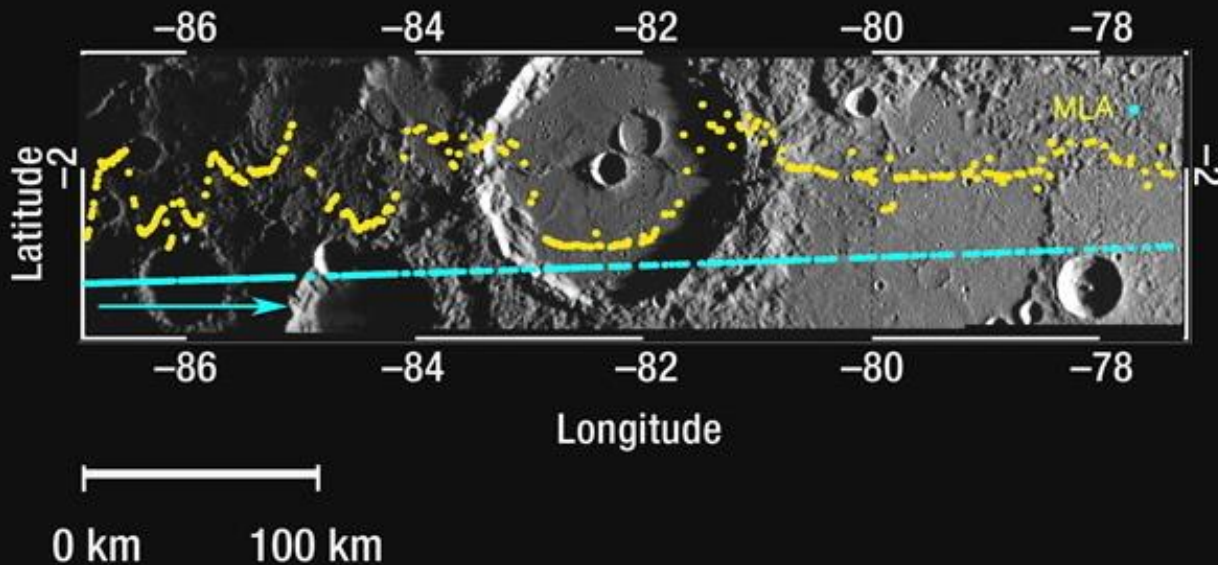
Širokoúhlá kamera s 11 filtry



Caloris Planitia – různé vlastnosti hornin



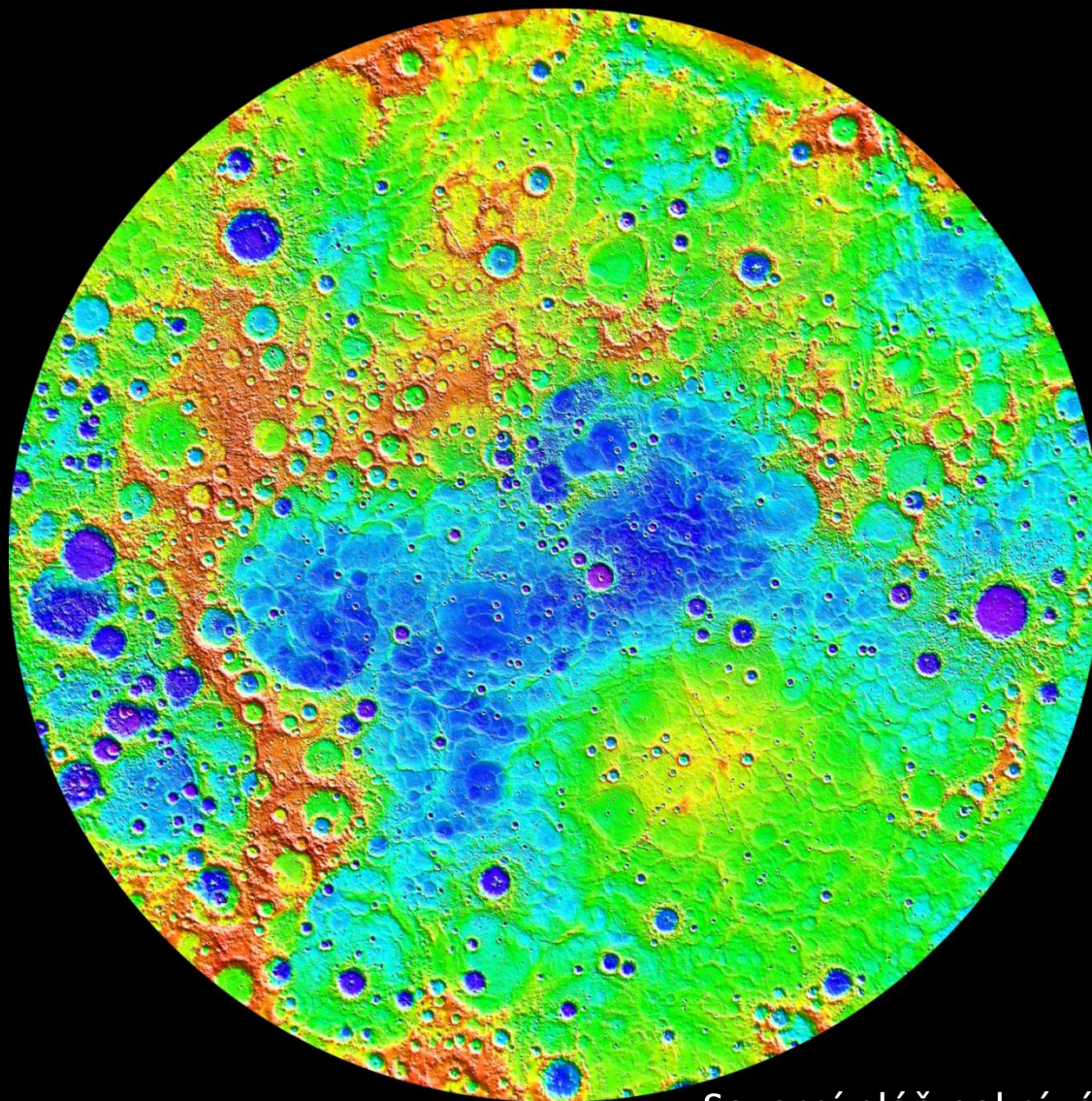
Laserový výškoměr



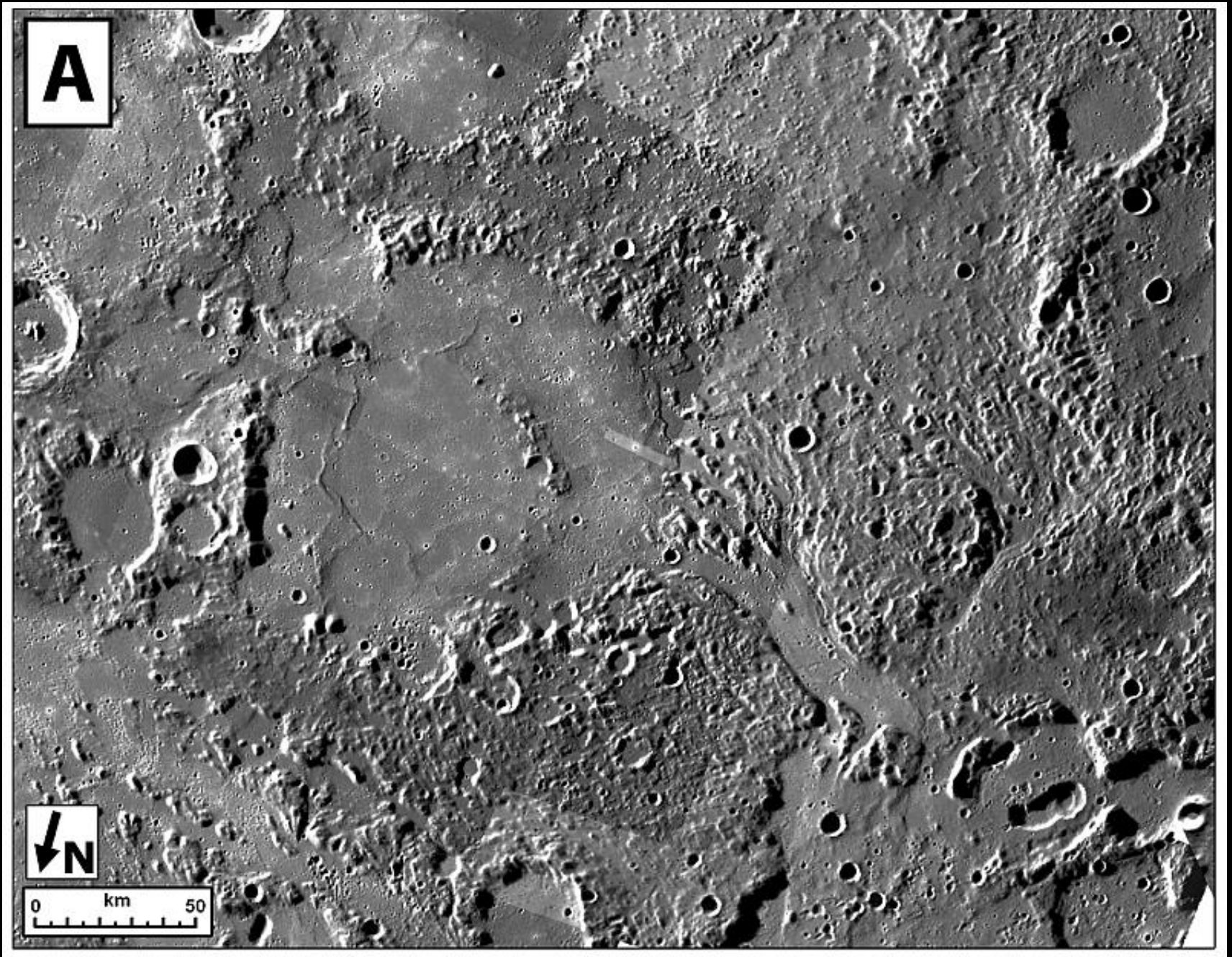
NASA / JHUAPL / CIW / MIT

Pořízeno okolo 26 miliónů měření

Některé hladké pláně bez očividné spojitosti s velkými impaktními krátery



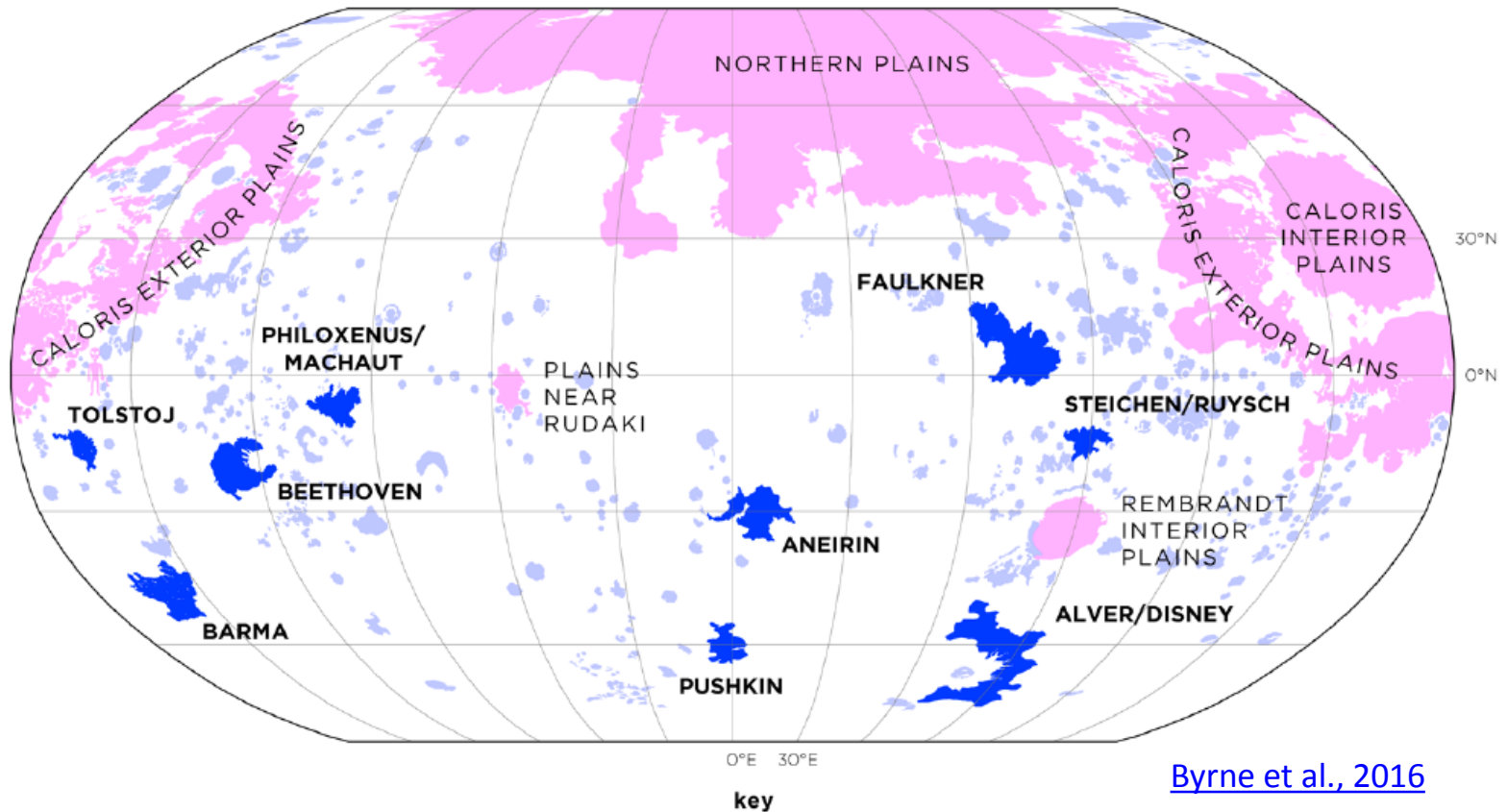
Severní pláň pokrývá 5.6×10^6 km², 7 %



„Ghost craters“

Impaktní krátery překryty proudy lávy

Rozšíření hladkých plání



Pláně jsou a) globálně rozšířené (Denevi et al., 2009; 2013), b) pokrývají ~27 % povrchu, c) největší v okolí severního pólu d) **rozšíření plání vázáno na rozsáhlé impaktní pánve!**

Štítové sopky (?)

First Candidate: 123°02'14" E, 34°07'40" S.

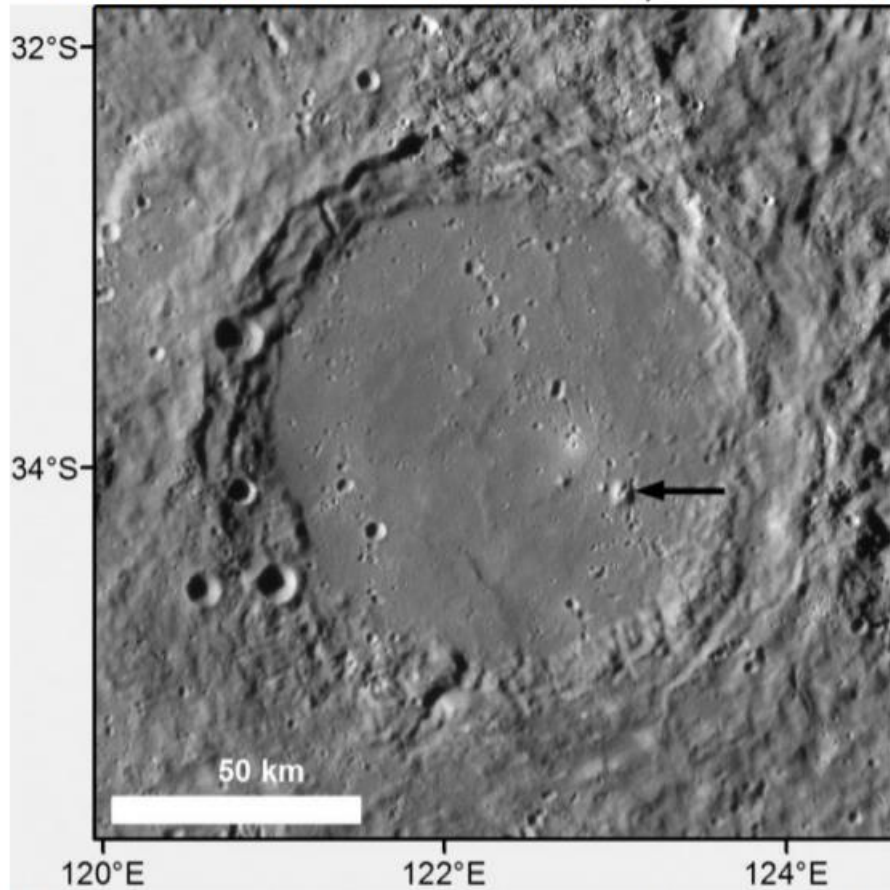


Fig. 1. *The unnamed impact basin hosting the first candidate volcanic edifice (black arrow).*

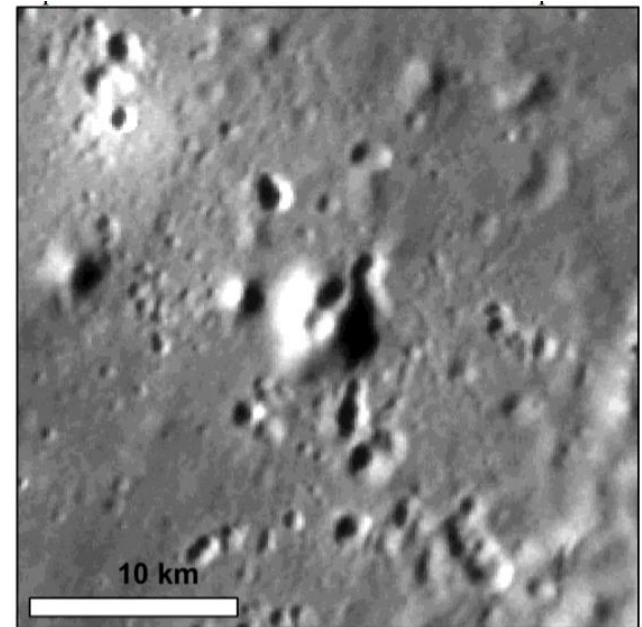


Fig. 2. *The first candidate volcanic edifice seen in NAC image EN1015774526M (~136 mpp).*

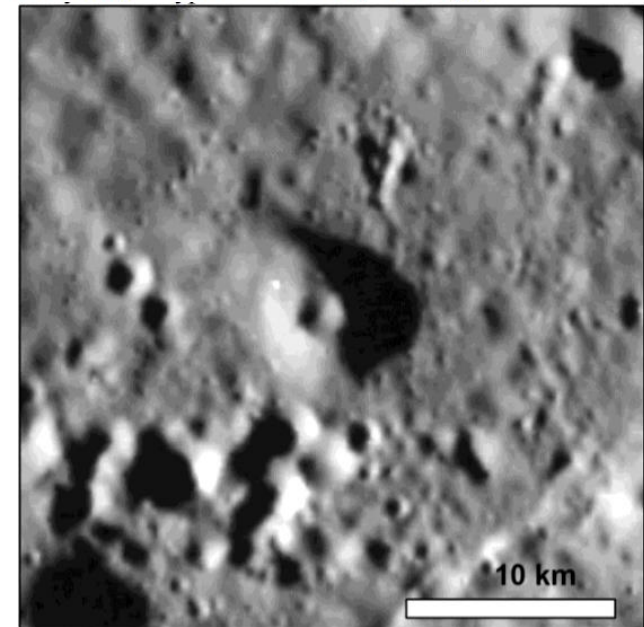


Fig. 4. *A close-up of the second candidate volcanic edifice seen in the 166 mpp monochrome basemap.*

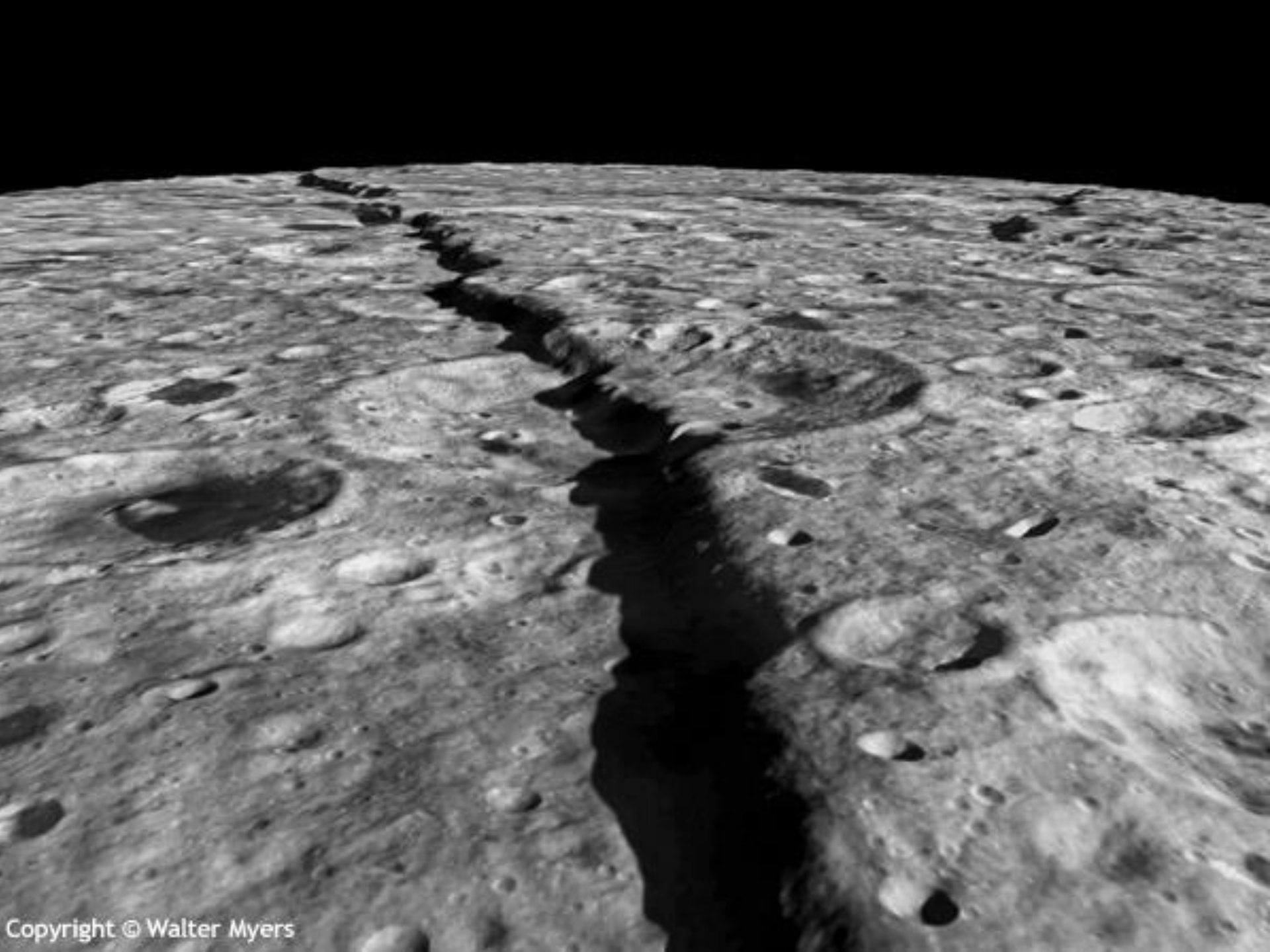
Historie efuzivní sopečné činnosti

Table 1. Location, Count Area, Crater Spatial Density, and Model Age for Each of the Sites in This Study

Site	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Area (km ²)	N(4) ^a	N(10) ^a	N(20) ^a	Model Age (Gyr) ^b	
							N(4)	N(10)
Alver/Disney	-64.09	84.17	2.63×10^5	517 ± 44	145 ± 23	65 ± 16	3.7	3.8
Aneirin	-30.22	6.48	1.80×10^5	311 ± 42	72 ± 20	22 ± 11	3.7	3.7
Barma	-47.99	-159.03	1.59×10^5	446 ± 53	138 ± 29	44 ± 17	3.7	3.8
Beethoven	-20.37	-125.43	1.95×10^5	595 ± 55	92 ± 22	31 ± 13	3.8	3.7
Faulkner	3.27	71.04	3.48×10^5	391 ± 34	34 ± 10	14 ± 6	3.7	3.2
Philoxenus/Machaut	-6.73	-98.55	1.15×10^5	365 ± 56	130 ± 34	35 ± 17	3.7	3.8
Pushkin	-60.26	-1.70	6.43×10^4	327 ± 71	47 ± 27	n/a ^c	3.7	3.0
Steichen/Ruysch	-14.38	89.25	7.95×10^4	314 ± 63	75 ± 31	25 ± 18	3.7	3.6
Tolstoj	-15.81	-164.07	6.84×10^4	234 ± 58	29 ± 21	15 ± 15	3.5	2.6

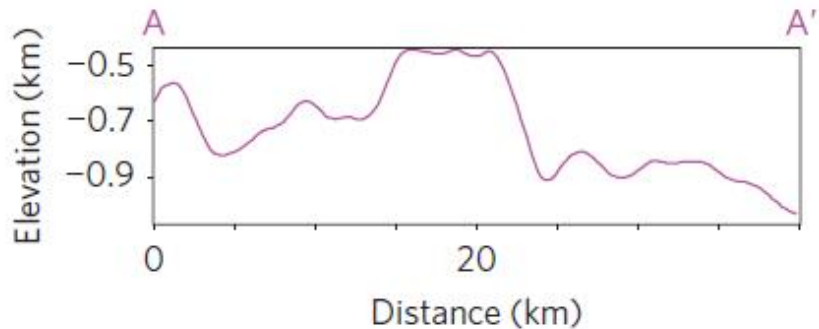
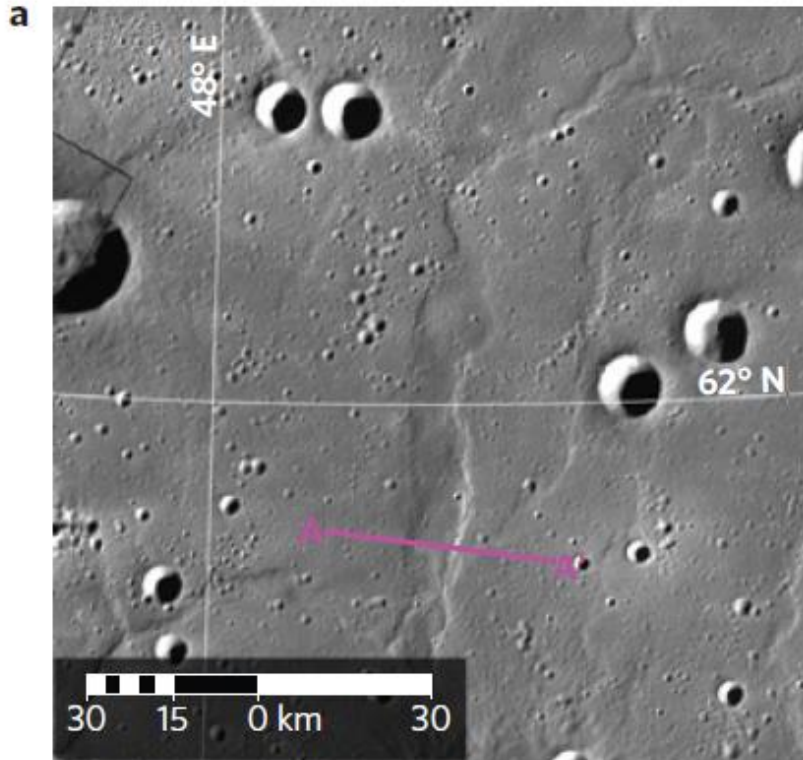
[Byrne et al., 2016](#)

- Největší sopečné pláně vykazují shodné množství velkých impaktních kráterů na jednotku plochy (10^6 km²)
- Absolutní datace naznačuje vznik hladkých plání okolo ~3,7 Ga
- Většina významné sopečné činnosti se odehrála mezi 4,1 až 3,5 Ga; rozdíl proti Marsu, Zemi či Venuši.
- Sopečná činnost následně pokračovala jen v malém měřítku

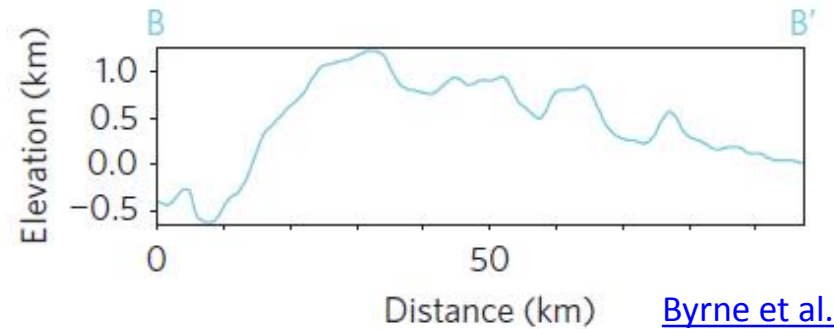
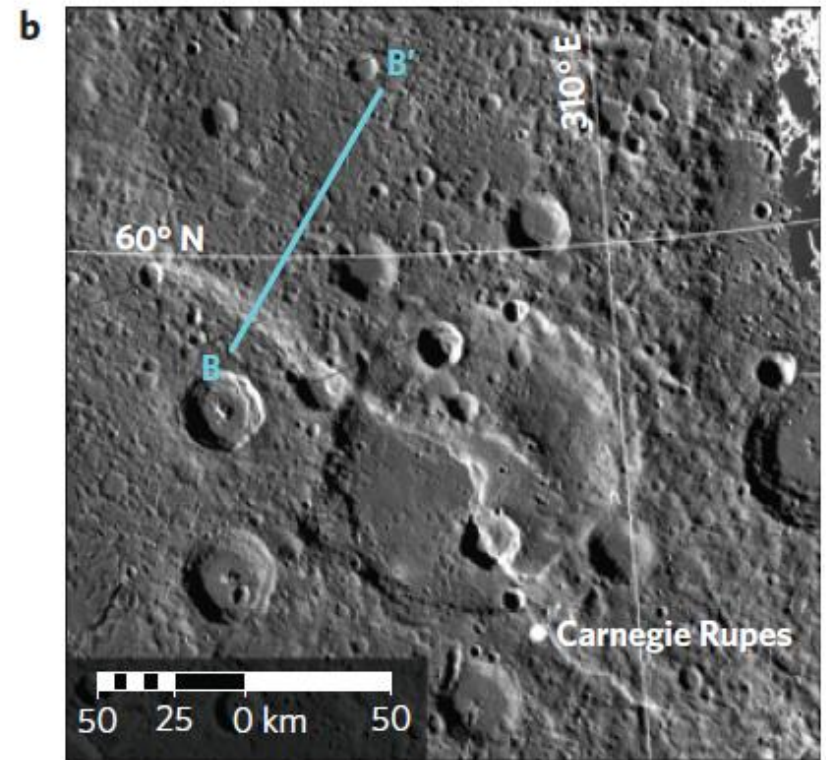


Doklady komprese povrchu

Wrinkle ridge



Lobate scarp



Smršťující se Merkur

- Na povrchu Merkuru se vyskytuje celá řada geologických útvarů vzniklých kompresí
- Předpoklad, že se Merkur smršťuje – původní odhady hovořily o 0,8 až 3 km
- Nesoulad s modely tepelného vývoje – predikovaly 5 až 10 km smrštění

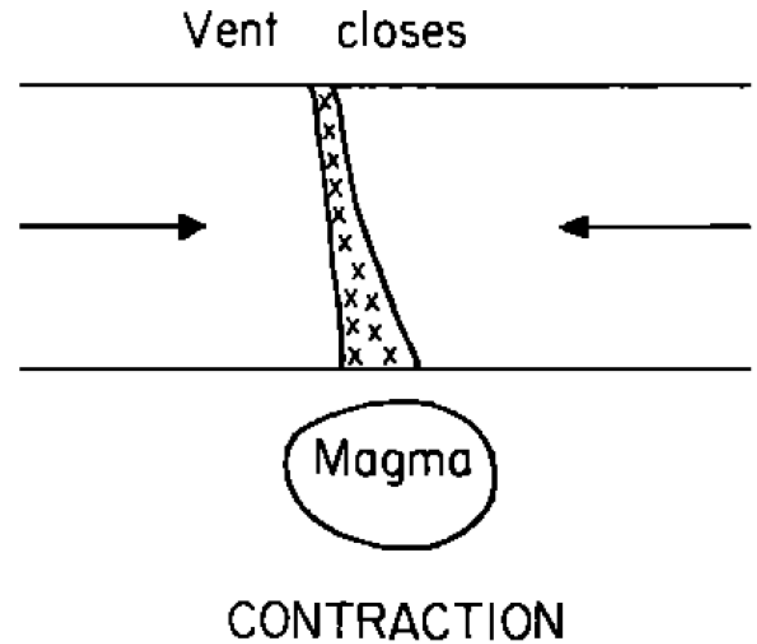
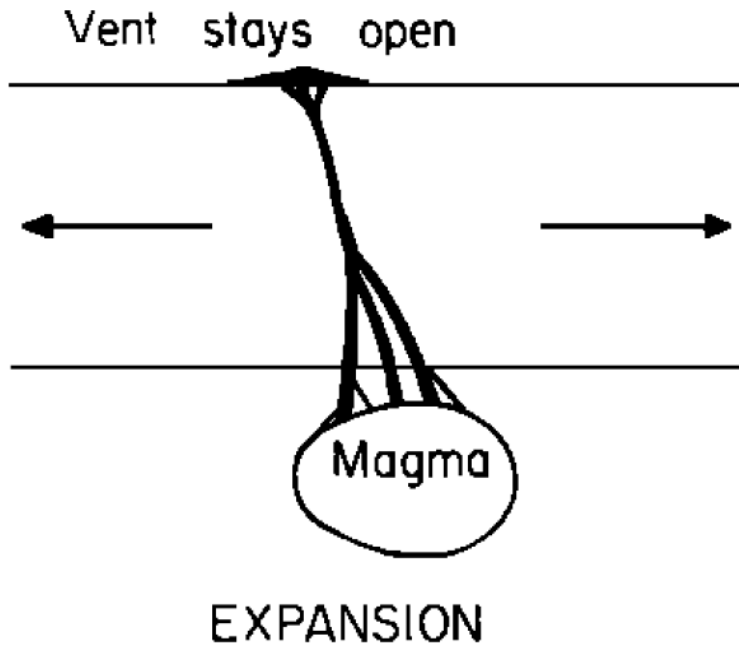


Mercury's global contraction much greater than earlier estimates

Paul K. Byrne^{1,2*†}, Christian Klimczak¹, A. M. Celâl Şengör³, Sean C. Solomon^{1,4}, Thomas R. Watters⁵ and Steven A. Hauck, II⁶

- Data z MESSENGERu umožnily prozkoumat kompresivní útvary na celém povrchu i odhalit nové druhy kompresivních útvarů
- Data naznačují zmenšení Merkuru od doby vzniku o 5 až 7 km
- V kůře planety musí panovat značné napětí – znesnadnění výstupu magmatu

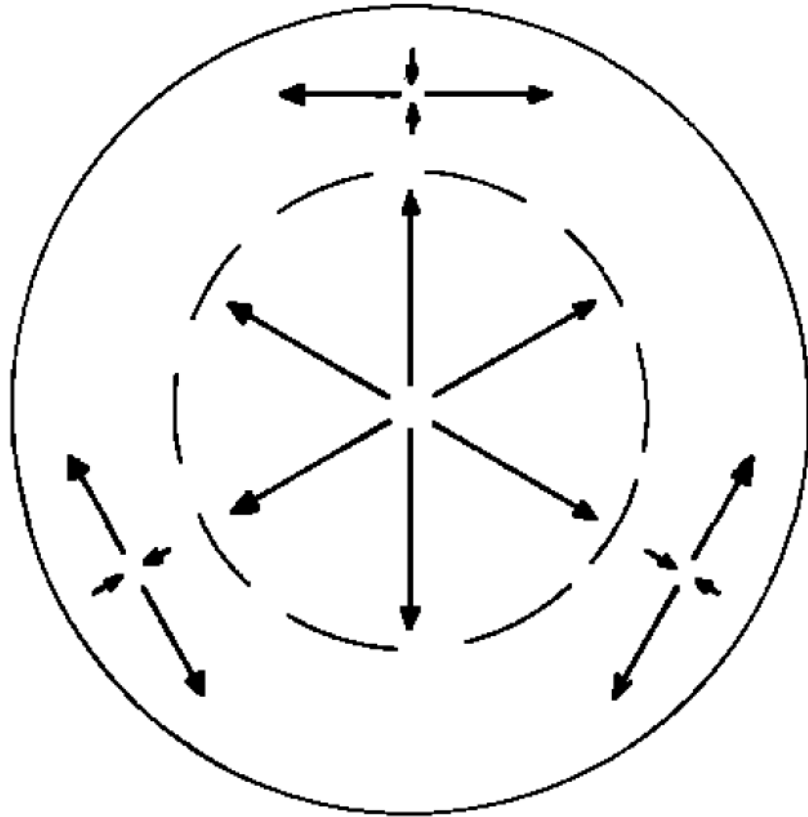
Tektonický režim



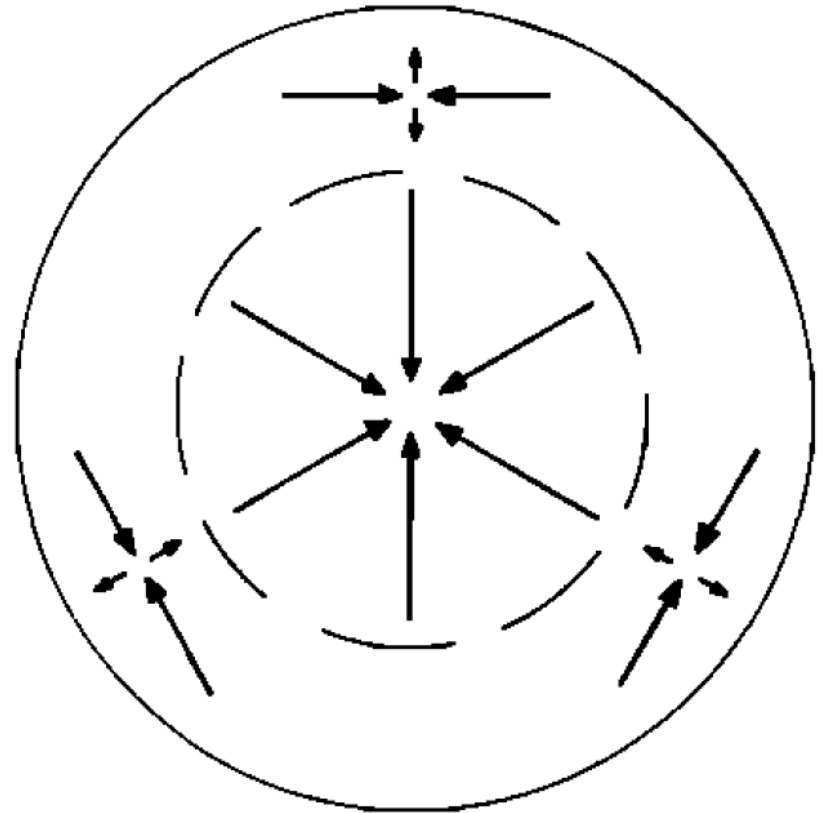
Převzato ze [Solomon \(1978\)](#)

- Vznik horizontálních ložních žil (sills) namísto vertikálních pravých žil – dominance intruzivního vulkanismu

Termální evoluce planet



EXPANSION



CONTRACTION

Vulkanismus spouštěný impakty



Proč impakty mohou spustit vulkanismus?

- Odstranění tlaku nadložních vrstev
- Dočasně uvolní/pozmění tlak v kůře
- Umožňují výzdvih korových i plášťových hornin
- Popraskají křehce se chovající horniny; vytvoření slabších míst v kůře umožňující případný výstup materiálu k povrchu

Explozivní vulkanismus

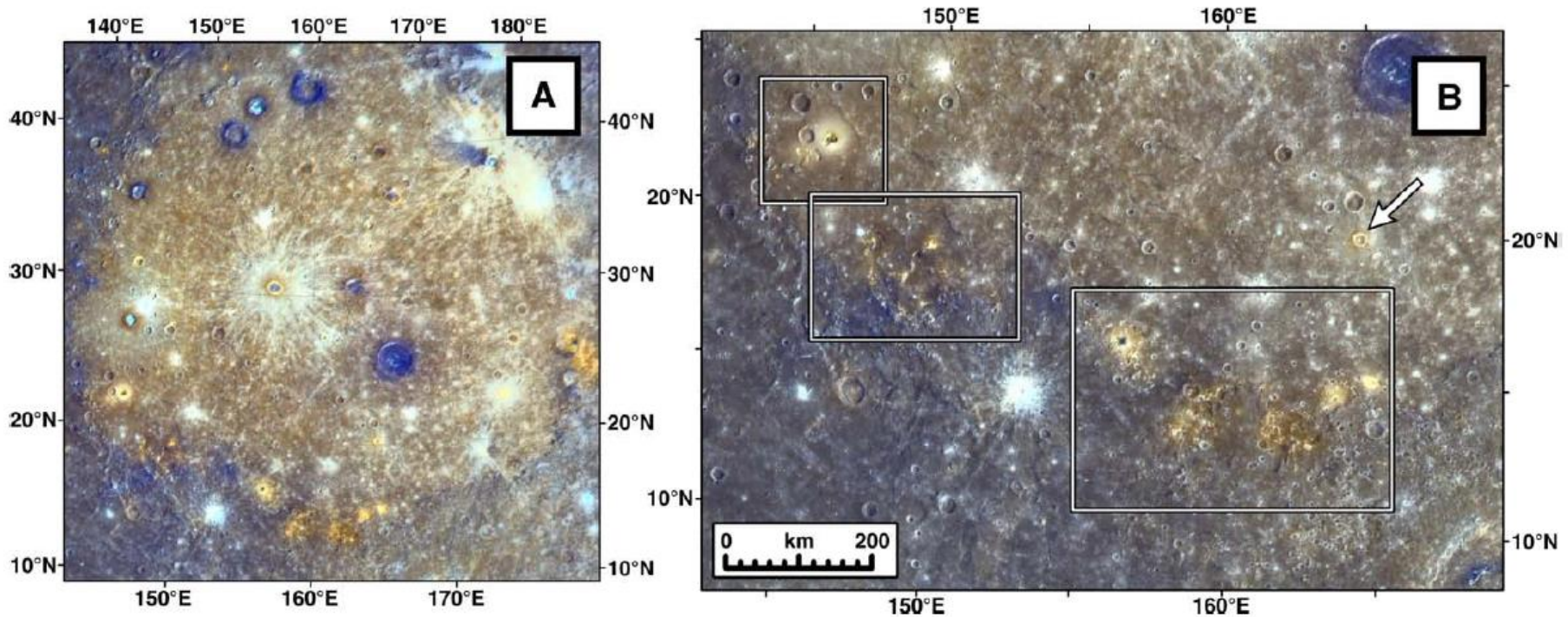
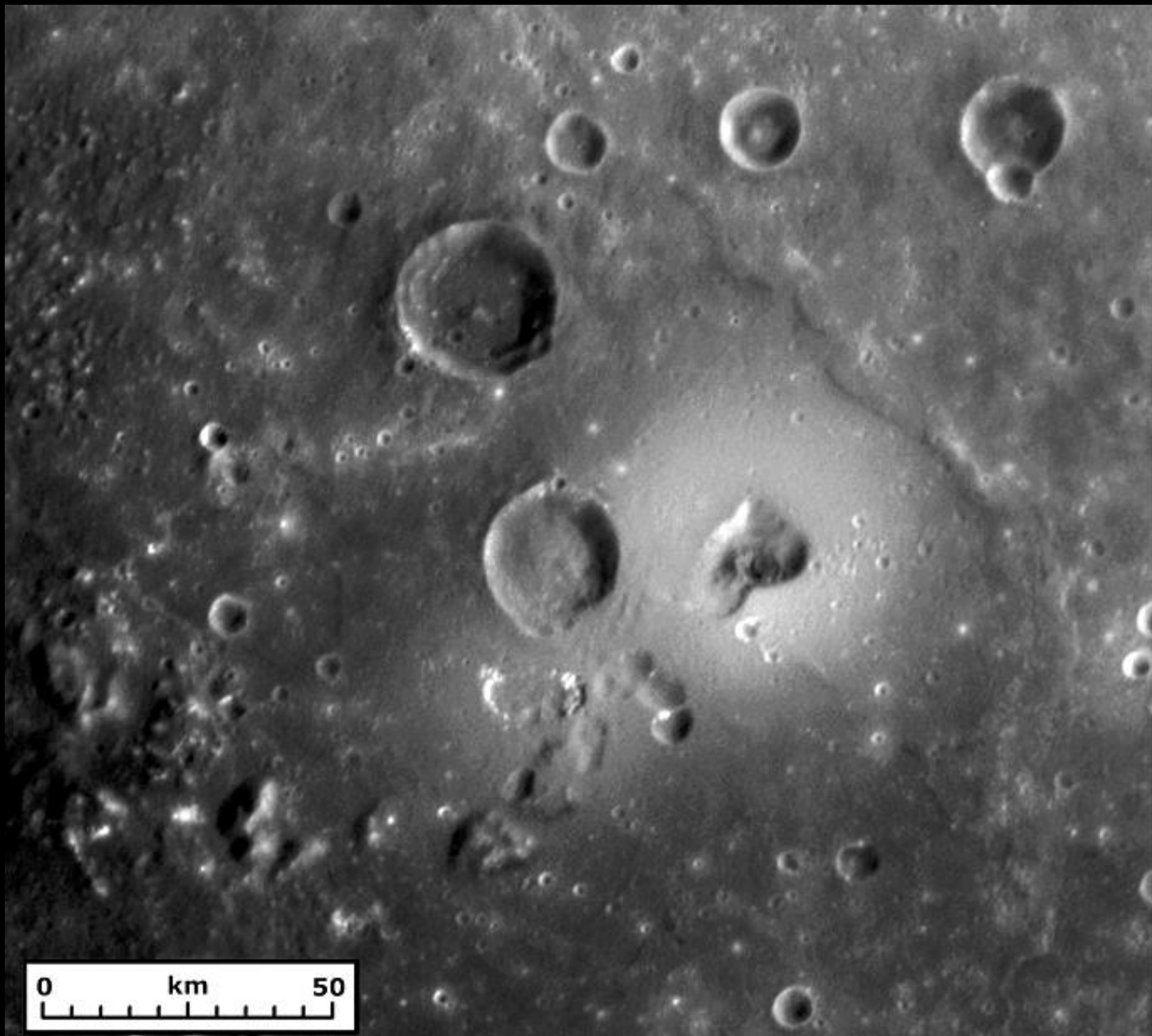
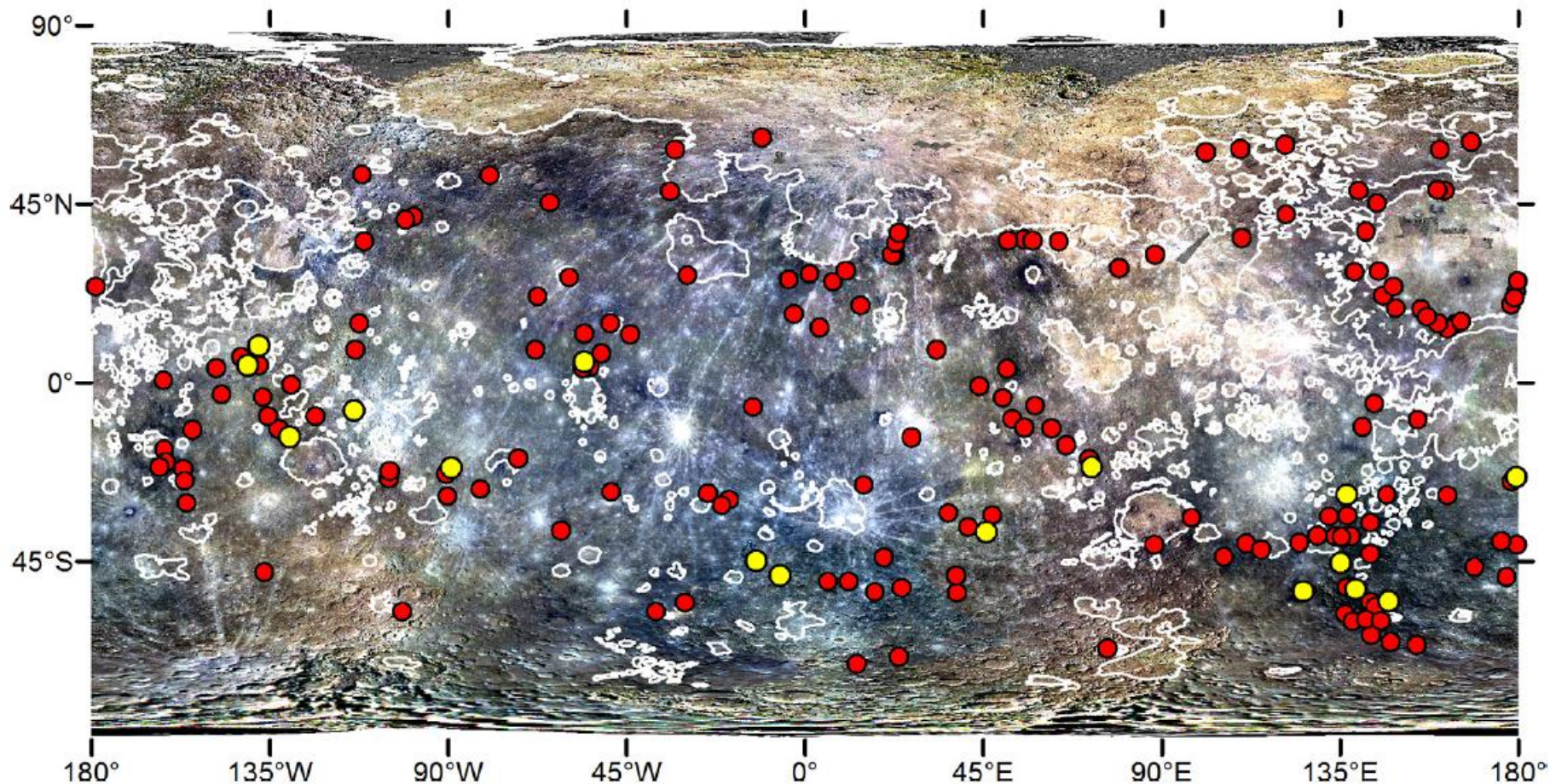


Fig. 4. Irregular rimless depressions inside the rim of the Caloris basin. (A) Color image of the Caloris basin interior showing the locations of the major color anomalies associated with the rimless depressions. Color images are RGB composites (red, inverse of PC2; green, PC1; blue, relative visible color, 430 nm/560 nm ratio; see Robinson et al., 2008 for details). (B) Southern part of the Caloris basin, showing the location of the major rimless depressions along the inner margin of the basin rim. Locations of Fig. 5A, B, and C are shown by boxes.

[Head et al., 2009](#)



Rozšíření explozivního vulkanismu

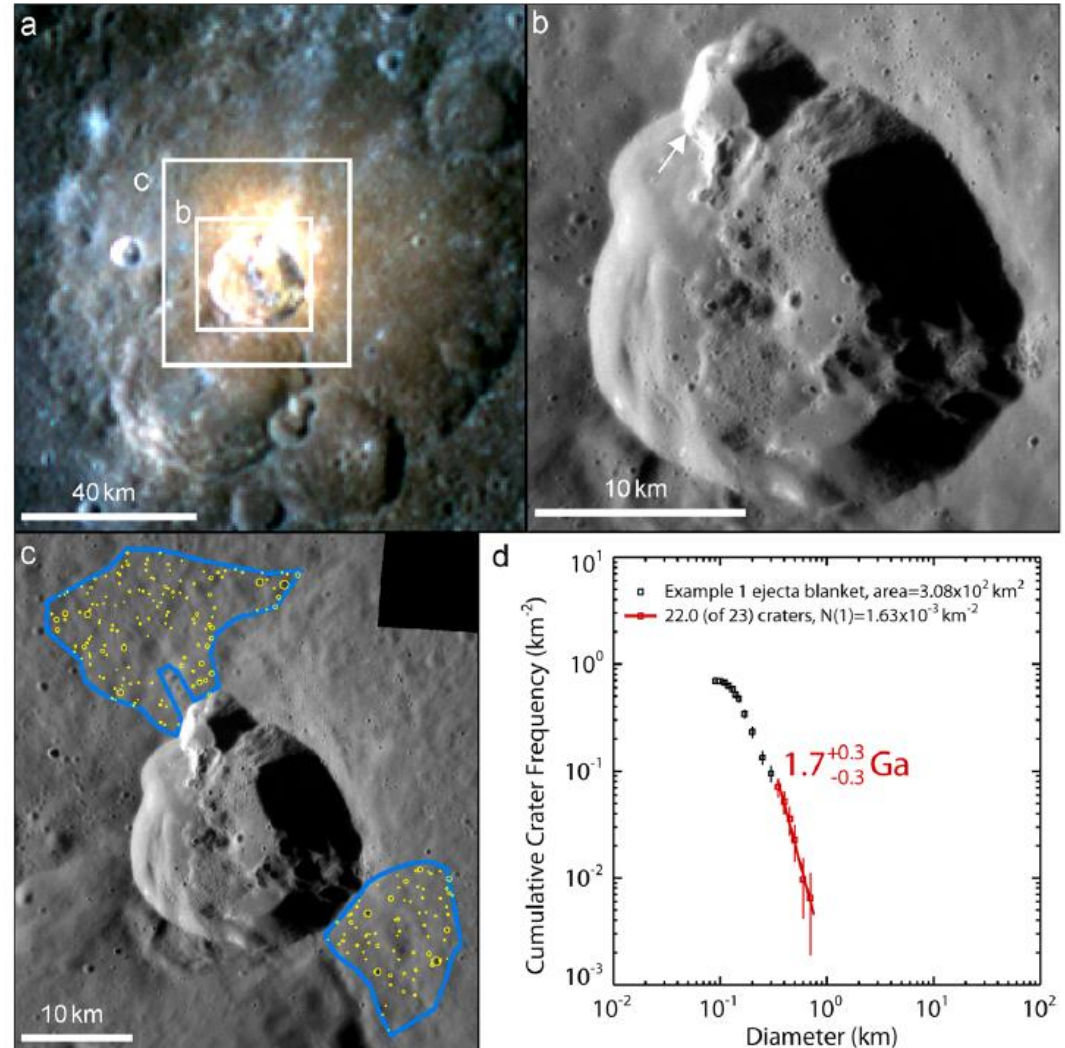


K roku 2015 známo okolo 150 oblastí

Thomas et al., 2015

Historie explozivní sopečné činnosti

- Produkty explozivního vulkanismu možno nalézt na starších hladkých pláních (Head et al., 2008) – musí být tedy mladší!
- Některé projevy explozivního vulkanismu mladé jen okolo 1 Ga!



[Thomas et al., 2014](#)

Explozivní vulkanismus, kontrakce kůry a impakty

- Vlivem komprese kůry magma propaguje v ložních žilách hluboko pod povrchem = možnost hromadění volatilních složek, převážně S (a C) Wider et al., 2016
- Nahromaděný plyn zvyšuje tlak v magmatu, což dovoluje překonat tlak okolních hornin
- Magma vystupuje po prasklinách vzniklých impakty
- Na povrch se ale dostane jen malá část magmatu bohatší na sopečné plyny



Množství vyvrženého materiálu

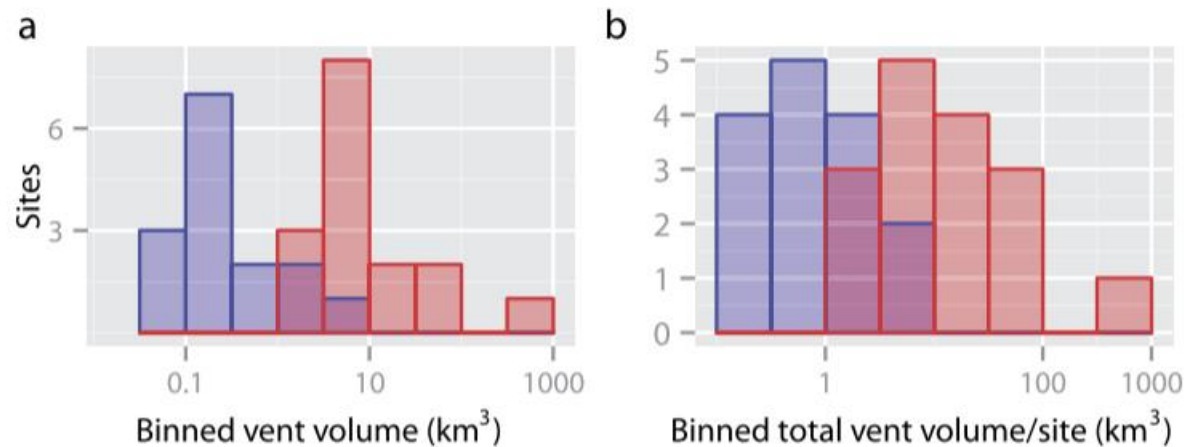


Fig. 3. Vent volumes on the Moon (blue) and Mercury (red). Both (a) the average volume and (b) total volume of vents at a site are significantly lower on the Moon than on Mercury (note the logarithmic scale for the x-axes). (For interpretation of the references to color in this figure, the reader is referred to the web version of this article.)

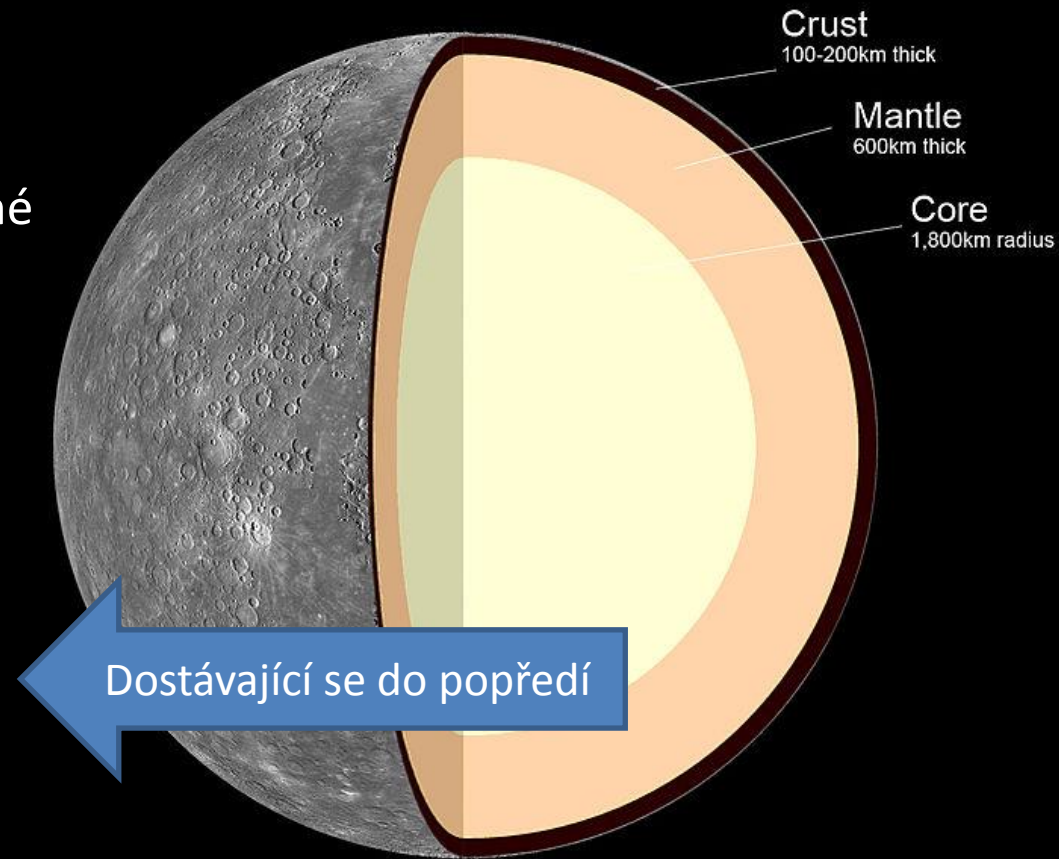
Thomas et al., 2015

Na Merkuru materiálu vyvrženo více než na Měsíci. Exploze byly více energetické, což značí větší množství plynů

Díky datům z MESSENGERu zjištěno, že povrch Merkuru je 10x bohatší na síru než Země či Mars Wider et al., 2014

Vnitřní stavba Merkuru – hustotní paradox

- Vysoká střední hustota $5,4 \text{ g/cm}^3$ (Země $5,15 \text{ g/cm}^3$) -> mnohem větší poměr kovů vs. silikátů než další terestrické planety
- Metalické jádro zabírá přes 80 % planety, silikáty max. 400 km mocné (Hauck et al., 2013)
 - Srážka s planetisimálou o velikosti 1/6 Merkuru, odpaření pláště
 - Variace výkonu Slunce (teplota v okolí Merkuru od 2500 do 10 000 K), odpaření povrchových hornin
 - Odpor prostředí v mlhovině, lehké částice vytlačeny dále od Slunce
- Změna paradigmatu o ochuzení vnitřku Merkuru o volatílie



BepiColombo



- Start říjen 2018
- Dosažení oběžné dráhy 5. prosince 2025

Shrnutí k Merkuru

- MESSENGER potvrdil sopečný původ hladkých plání i objevil projevy explozivního vulkanismu
- Sopečná činnost rozšířena globálně
- Merkur se smršťuje, takže kůra v kompresy
- Sopečná činnost je proto silně vázána na srážky Merkuru s jinými tělesy
 - Změna tektonického režimu
 - Popraskání kůry
 - Výzdvih hornin

Venuše

základní parametry

- Průměr 12 103,7 km (0,948 Země)
- Střední hustota 5,2 g/cm³ (Země 5,15 g/cm³)
- Gravitace na rovníku 8,87 m/s² (0,904 g)
- Oběh okolo Slunce za 224,65 dní, extrémně pomalá vlastní zpětná rotace (243,16 dne)
- Nízká excentricita oběžné dráhy (0,01)
- Extrémně hustá atmosféra
- Atmosférický tlak přibližně 90 krát silnější na povrchu (8 MPa) než na Zemi

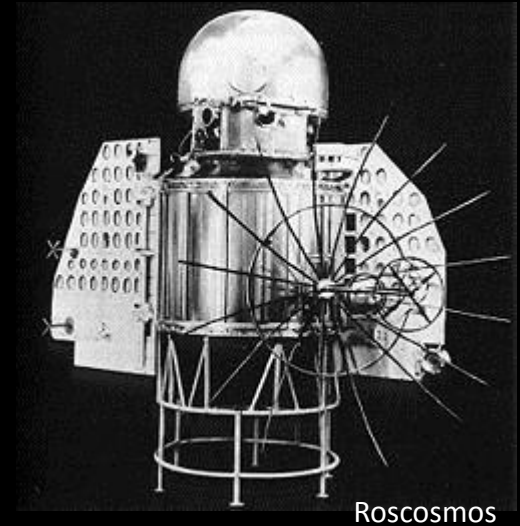


Průzkum Venuše

- Známa od nepaměti, až do 60. let 20. století přítomnost husté atmosféry zabraňovala spatřit povrch – rozvoj radioastronomie
 - Tři vysoce odrazivé oblasti (Maxwell Montes, Alpha a Beta Regio)
- Kosmický věk
 - Mariner 2 určil teplotu povrchu, hustotu atmosféry a její složení
 - Veněra 3 proletěla atmosférou (náráz na povrch), žádná data
 - Veněra 4 proletěla atmosférou i zaslala data, ale nedosáhla povrchu před vybitím baterie
 - Mariner 4 a Veněra 5, 6 a 7 (volný pád)....

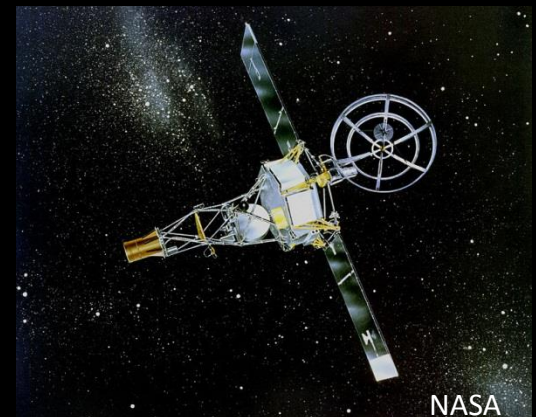
Veněra 1

1961



Mariner 2

1962



Dosednutí Veněr na povrch

(7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14)



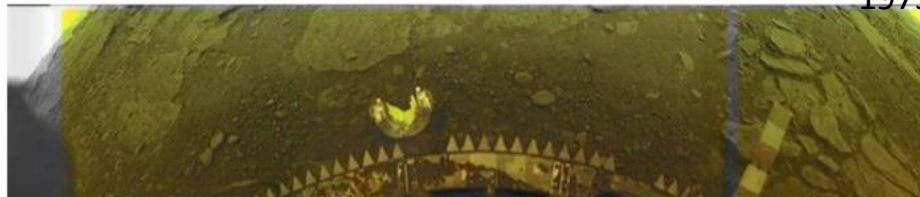
Venera 9

1975



Venera 10

1975



Venera 13

1981



Venera 14

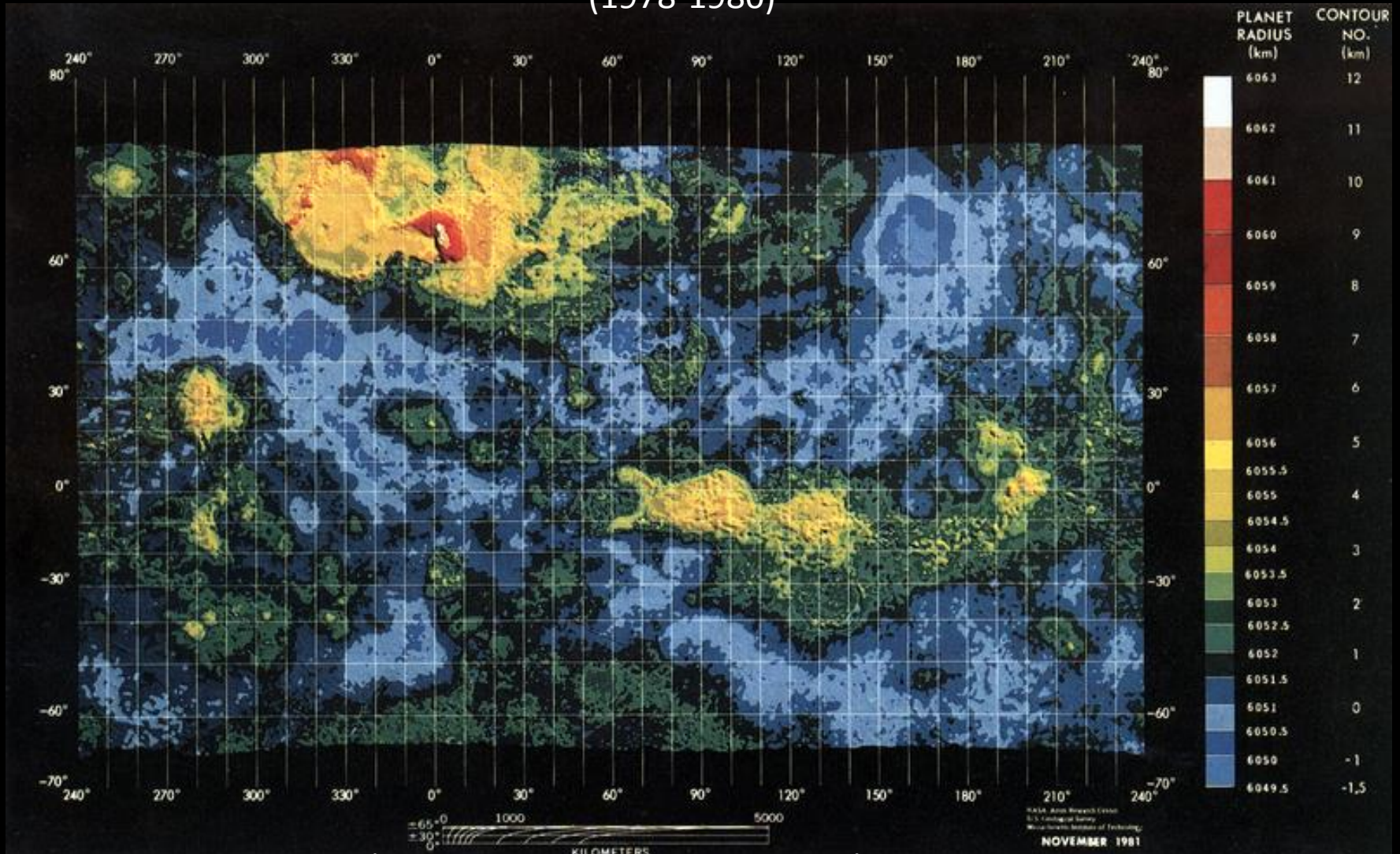
1981

Digitálně vyčištěné snímky, autor Don P. Mitchell

- Odhalení krajiny připomínající pozemské sopečné pláně tvořené bazalty
- Bazaltové složení potvrdily i spektroskopická měření v místě přistání
- **Problém: reprezentují místa přistání celou planetu?**

Radarové mapování Pioneer-Venus 1

(1978-1980)



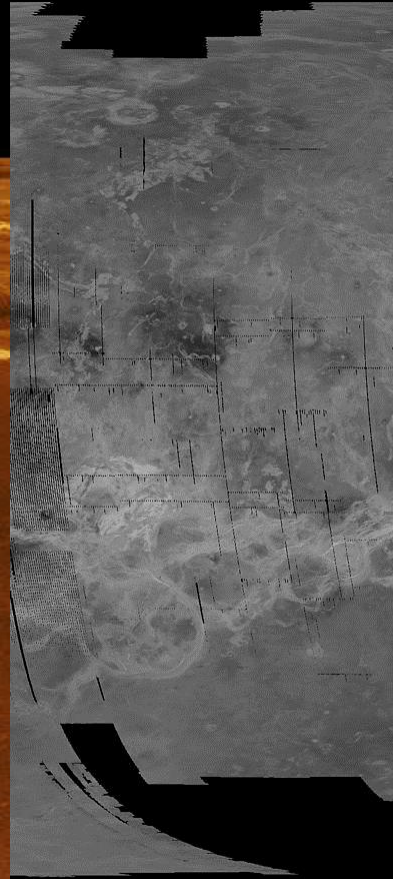
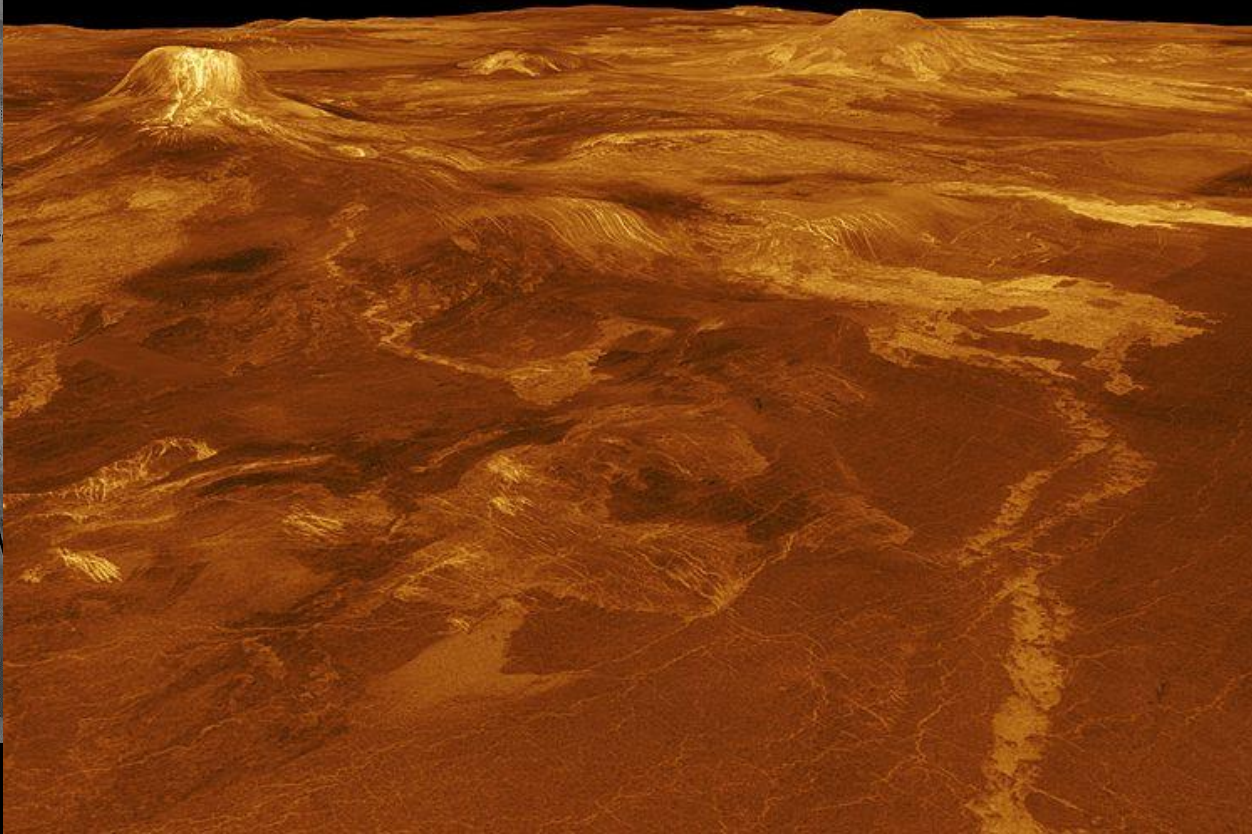
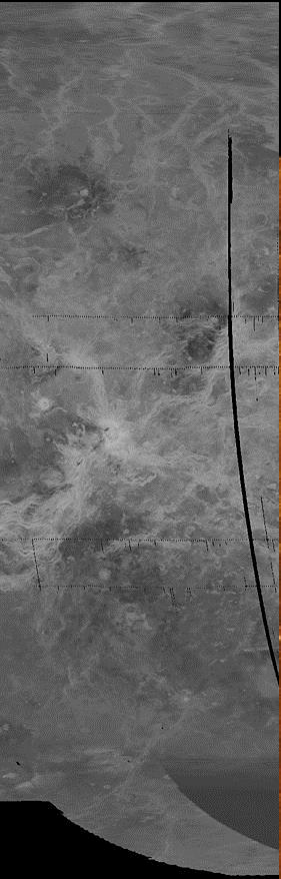
Rozlišení ca 150 km/pixel (polární oblasti) až 30 km/pixel (rovníkové oblasti) NASA, USGS

Radarové mapování

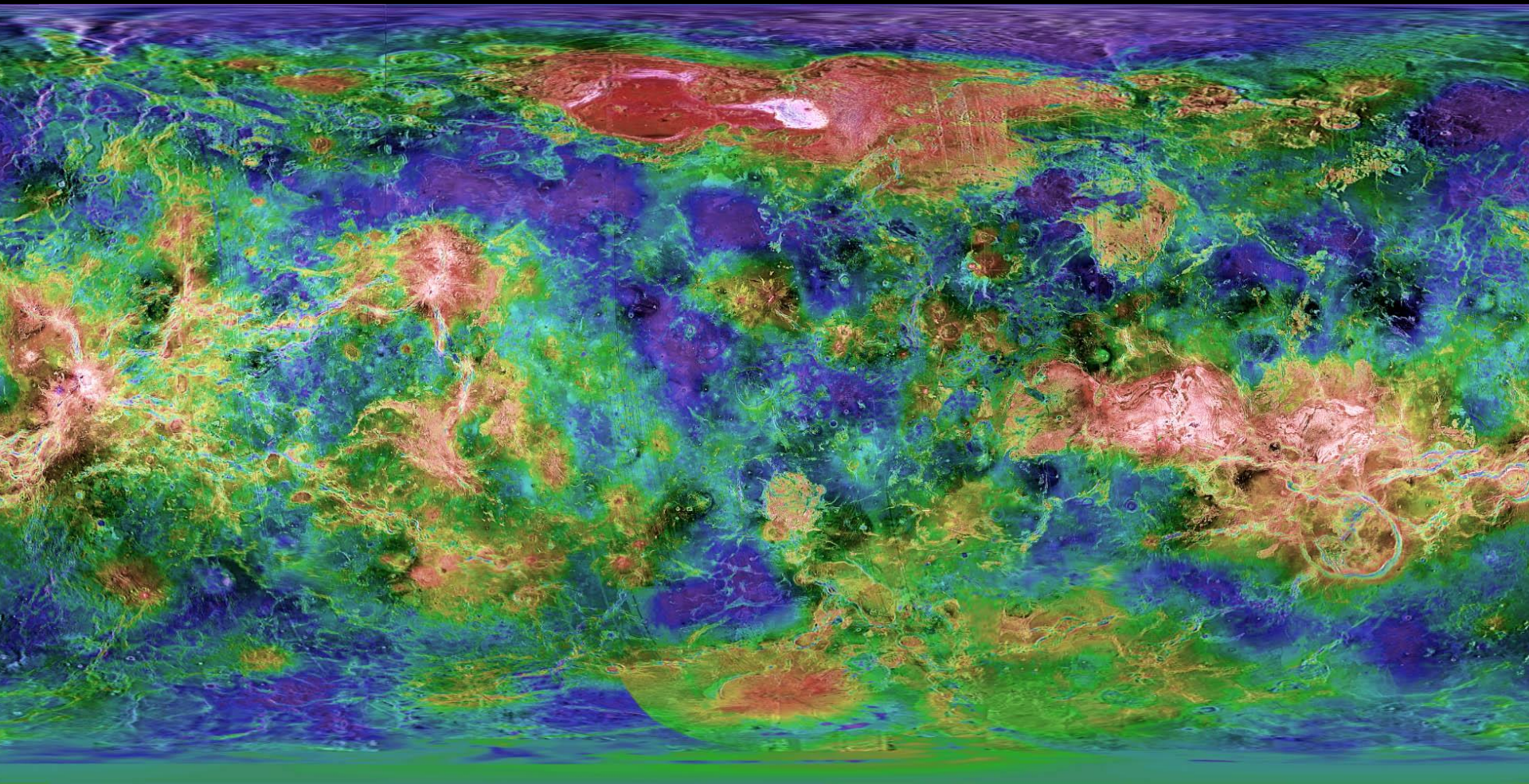
- Sovětské sondy Veněra 15 a 16 zmapovaly část severní polokoule v lepším rozlišení (zhruba 1 až 2 km/pixel)
 - Potvrzení přítomnosti hladkých plání
 - Objevení rozsáhlých prasklin
 - Objevení stovky km dlouhých proudů vycházejících ze svahů hor
- Kvantitativní skok; Magellan (1990-94)
 - rozlišení okolo 150 m/pixel
- Venus Express (2006-2015)



Mapování povrchu a pořizování stereo snímků



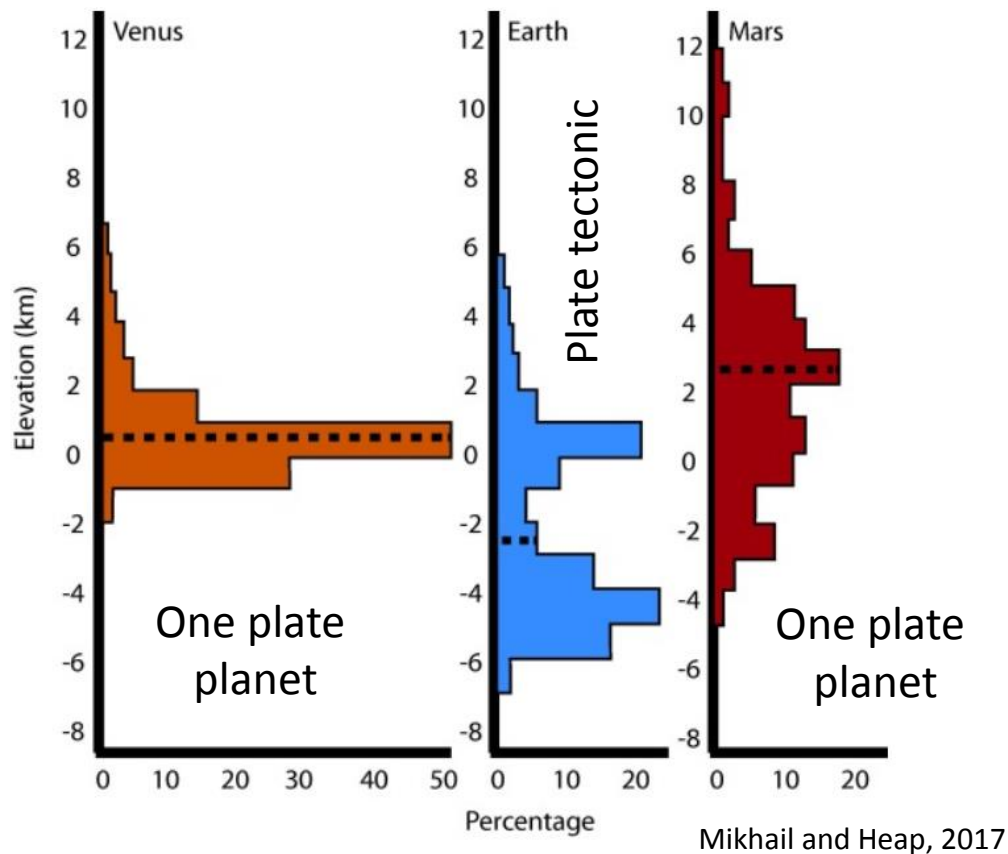
Výšková mapa povrchu Venuše



Calvin J. Hamilton / Magellan

Maximální převýšení 13 km

Venuše – planeta plání



[Download high-res image \(193KB\)](#) [Download full-size image](#)

Fig. 1. Hypsography of Venus, Earth, and Mars (Head and Solomon, 1981; Basilevsky and Head, 2003; Taylor and McLennan, 2009). Dashed lines mark the mean surface relief for each planet.

51 % povrchu +/- 500 metrů od střední hladiny
Pouze 8 % výše než 2 km nad střední hladinou

Hladké pláně

Pokrývají 70 % povrchu

50 km



Magellan / NASA

Hladké pláně

Tvořeny množstvím lávových proudů, téměř dokonalá absence impaktních kráterů

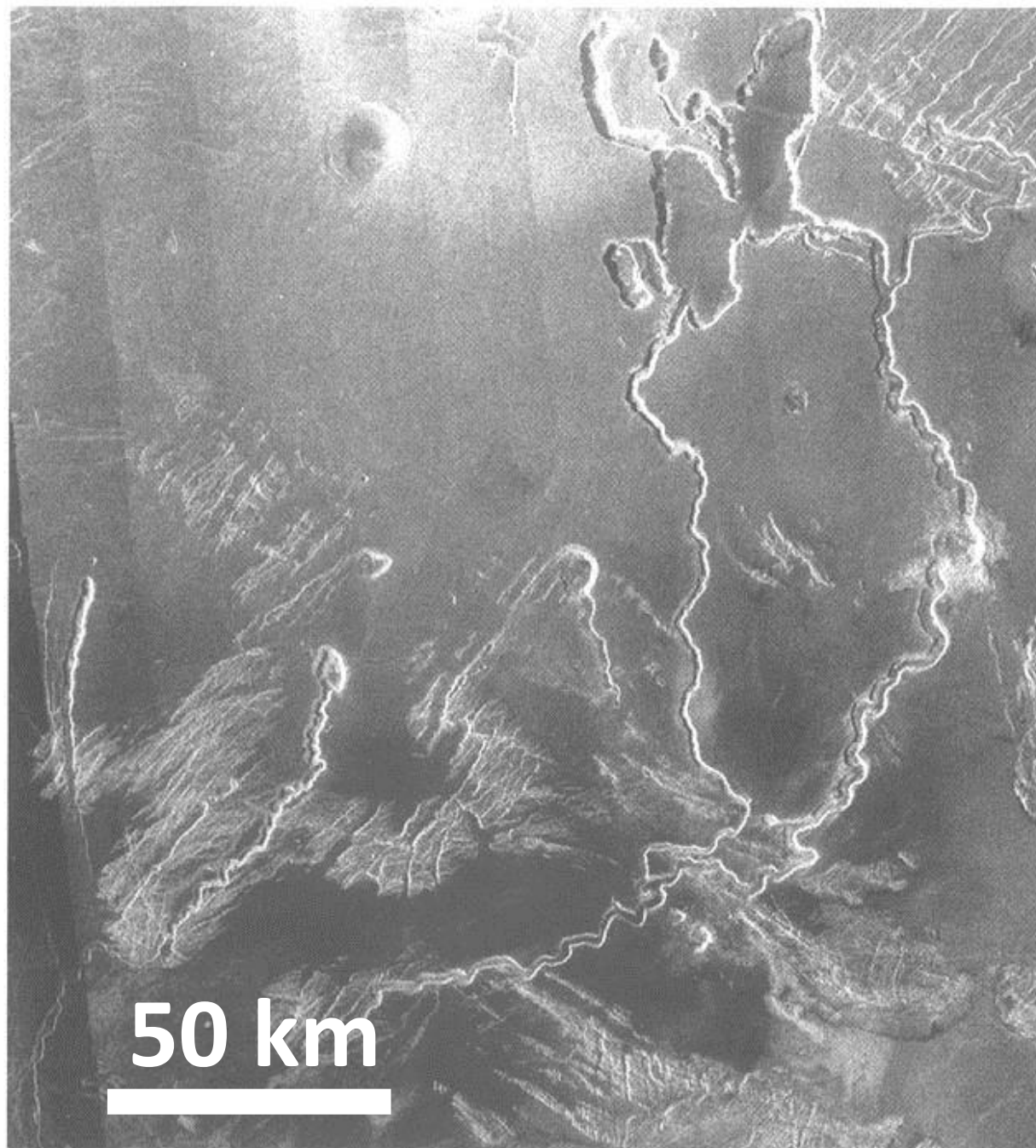
Lávové proudy až tisíc kilometrů dlouhé
Prostředí brání chladnutí

20 km

Magellan/NASA

Sinuous Rilles

Erozivní koryta
vzniklá
turbulentním
prouděním
lávy o vysoké
teplotě a nízké
viskozitě



0

100 km

Štítové sopky

Sapas Mons

100 km

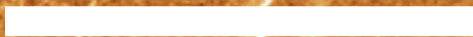


Magellan / NASA

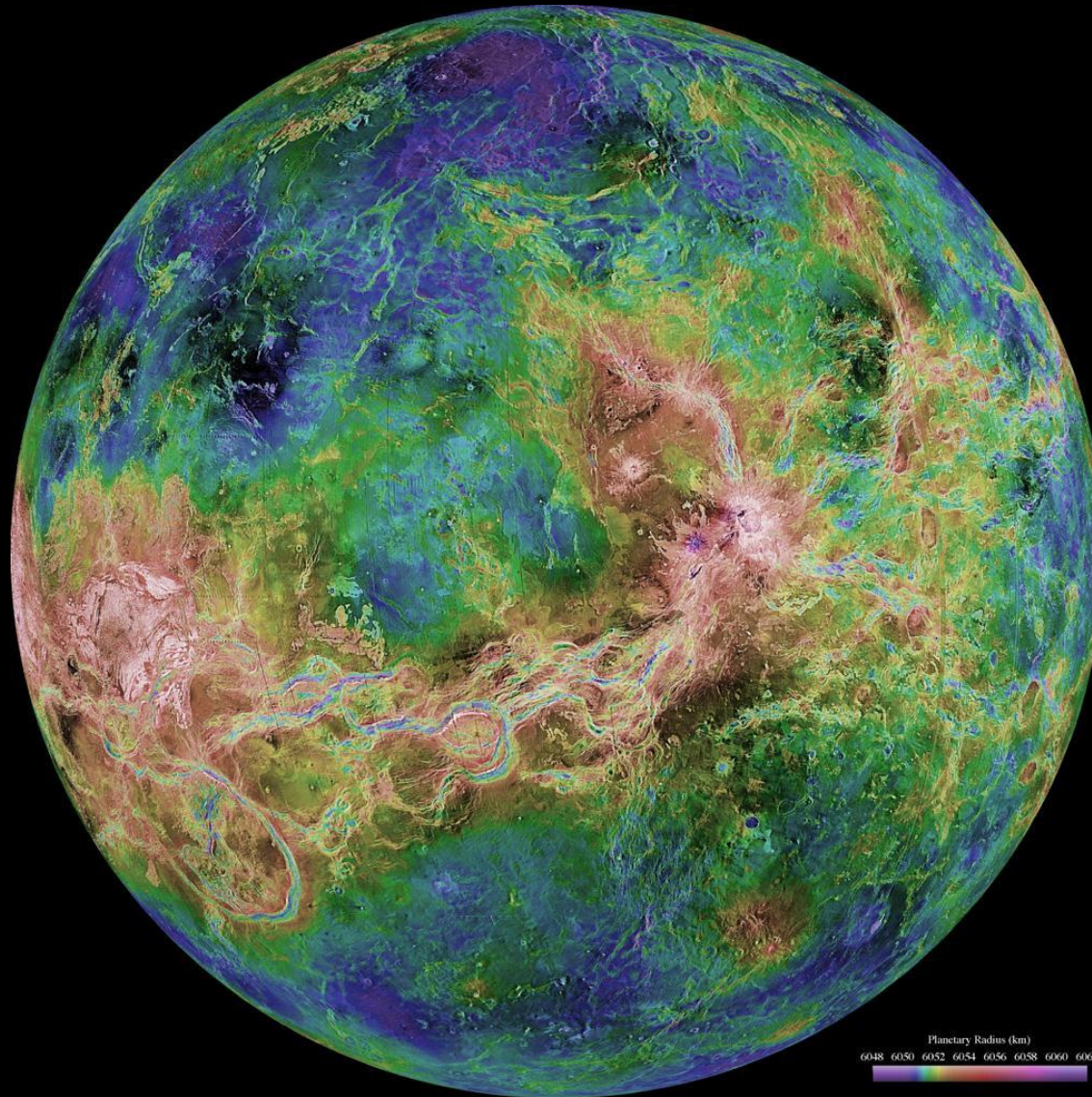


Malá sopečná tělesa...

15 km

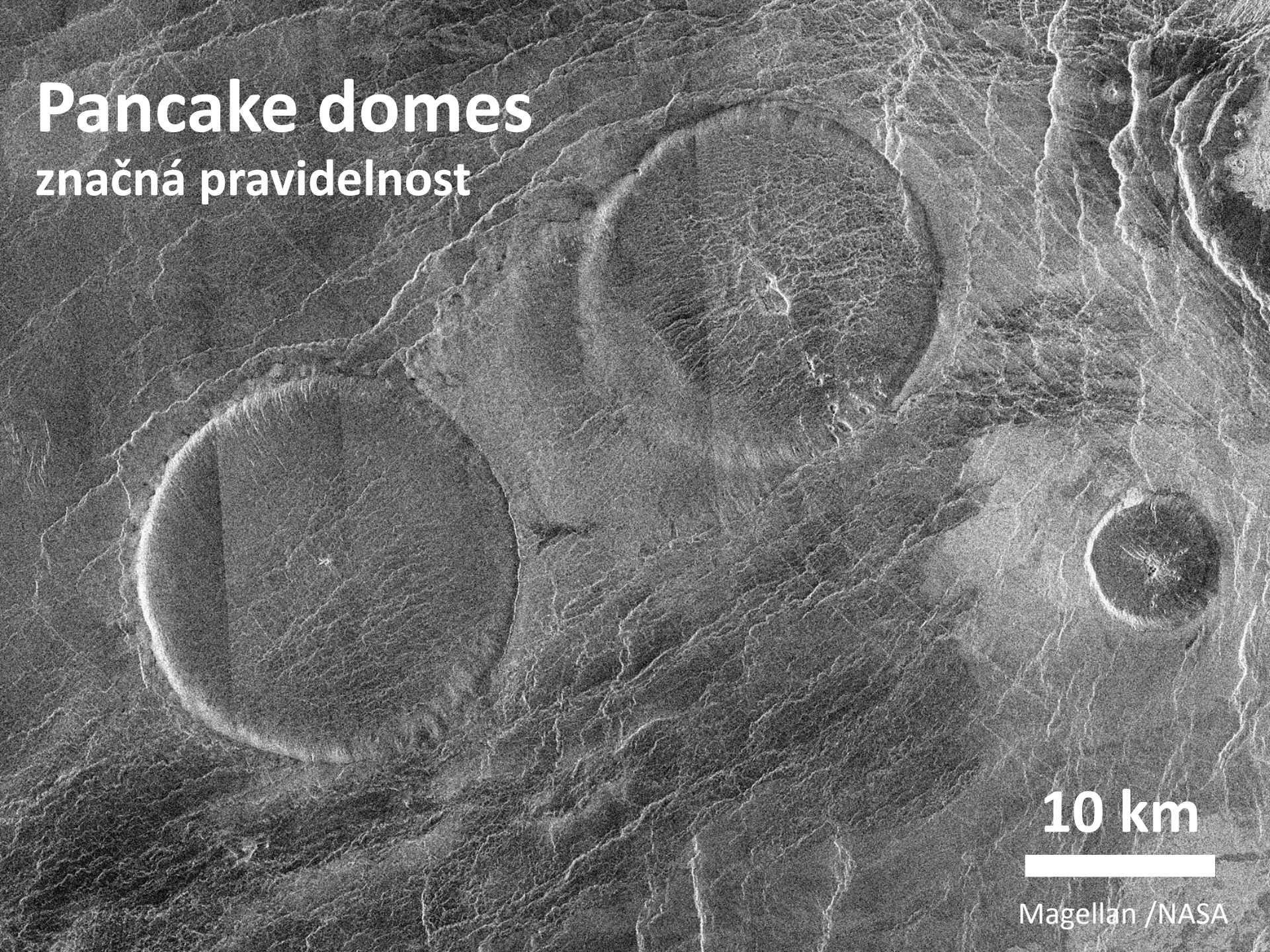


I rozsáhlé sopečné provincie



Pancake domes

značná pravidelnost



10 km



Magellan / NASA



Zpravidla 20 až 50 km široké
100 až 1000 m vysoké

Nejbližší pozemský ekvivalent představují
lávové dómy

Ty ale bývají 10x až 100x menší...

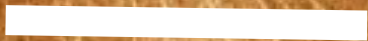
25 km



Magellan /NASA

Klíšťata (ticks)

30 km



Magellan /NASA



Pavučiny

(coronae)

50 km



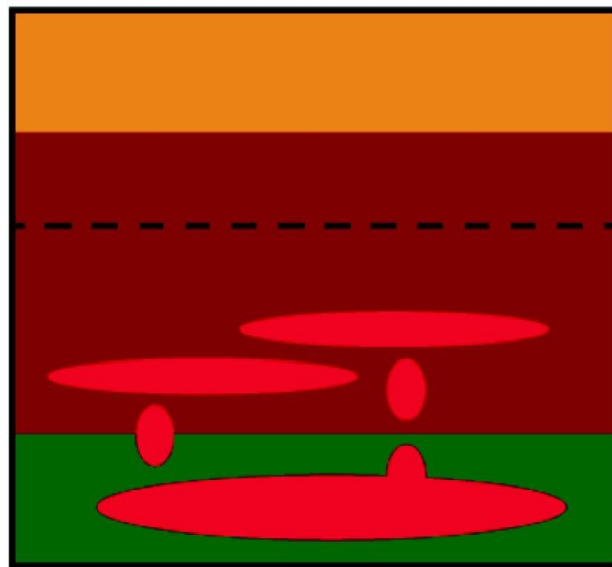
Magellan /NASA

Nejspíše povrchový
projev intruze v
podobě deformace
kůry



Ovlivňuje vysoká teplota povrchu reologii kůry? křehká vs. duktilní deformace

Magmatism on Venus

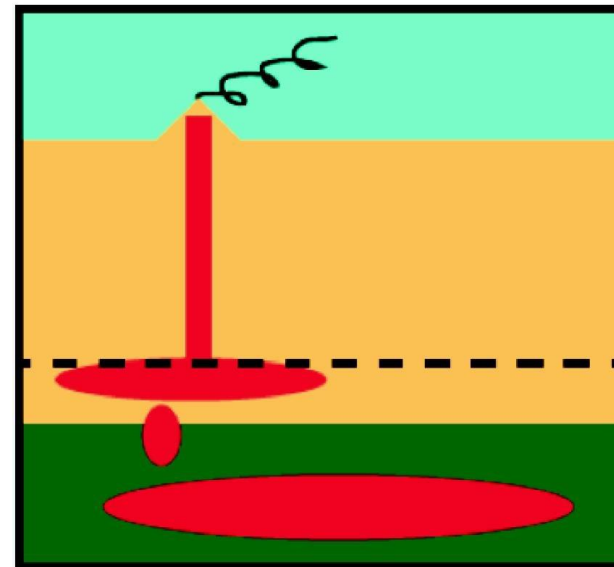


BDT

2 až 12 km

Mantle

Magmatism on Earth



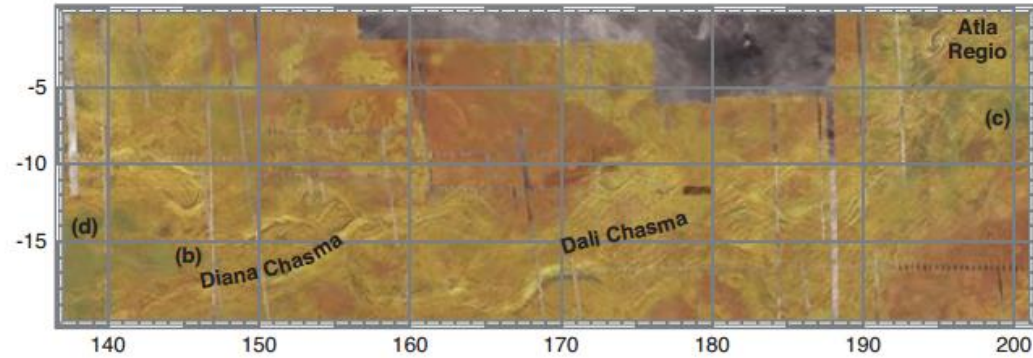
BDT

25 až 27 km

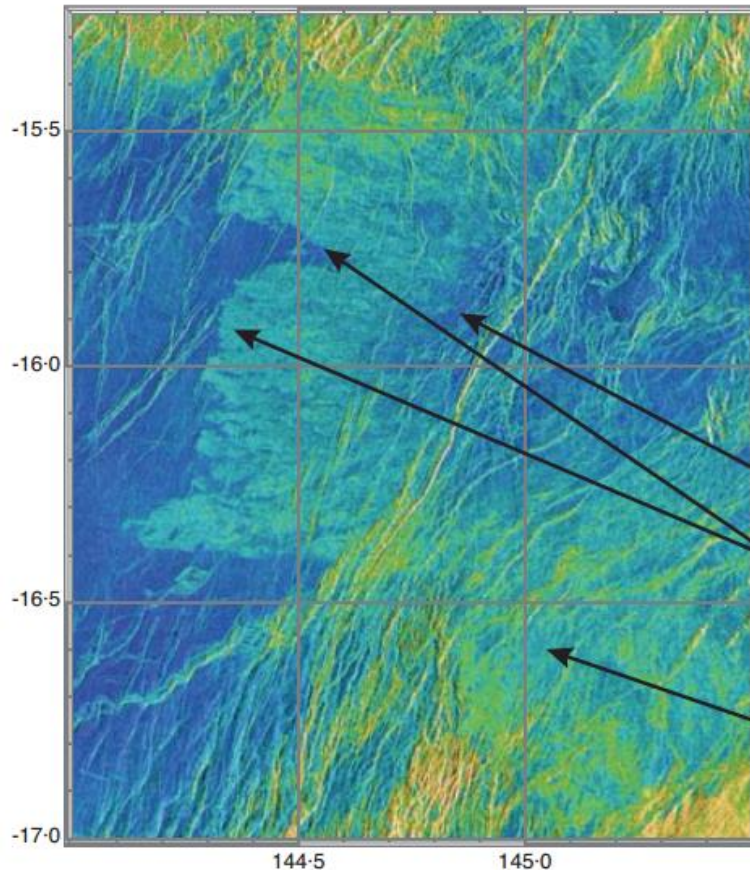
Pokud ano, kůra by nebyla schopna podporovat výrazné topografické rozdíly – což by vysvětlovalo současný vzhled povrchu...

1 (a) Localities

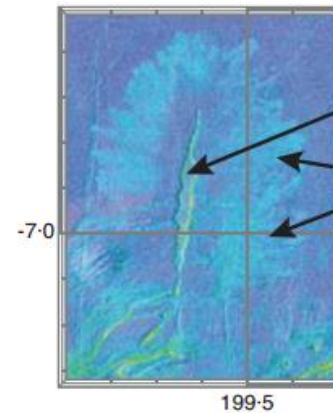
False colour Magellan SAR image of eastern Aphrodite Terra, in the equatorial region of Venus. The localities referred to in the text, and illustrated in detail below, are indicated along with the names of the principal geographical features in the region.



1 (b) 16s145 Scathach Fluctus



1 (c) 7s199 Anemone

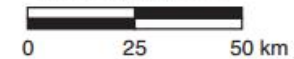


- (i) Central vent with smooth or flow-free margin
- (ii) Discrete flows with lobate margins at a uniform source distance

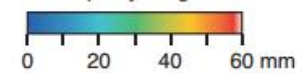
- (i) Smooth or flow-free interior lacks an obvious source
- (ii) Straight flows with abrupt straight margins and termini. Flows lack a channel morphophology
- (iii) Flow deposits on rough terrain are difficult to identify and lack clear morphological characteristics



Mercator Projection



Asperity Height



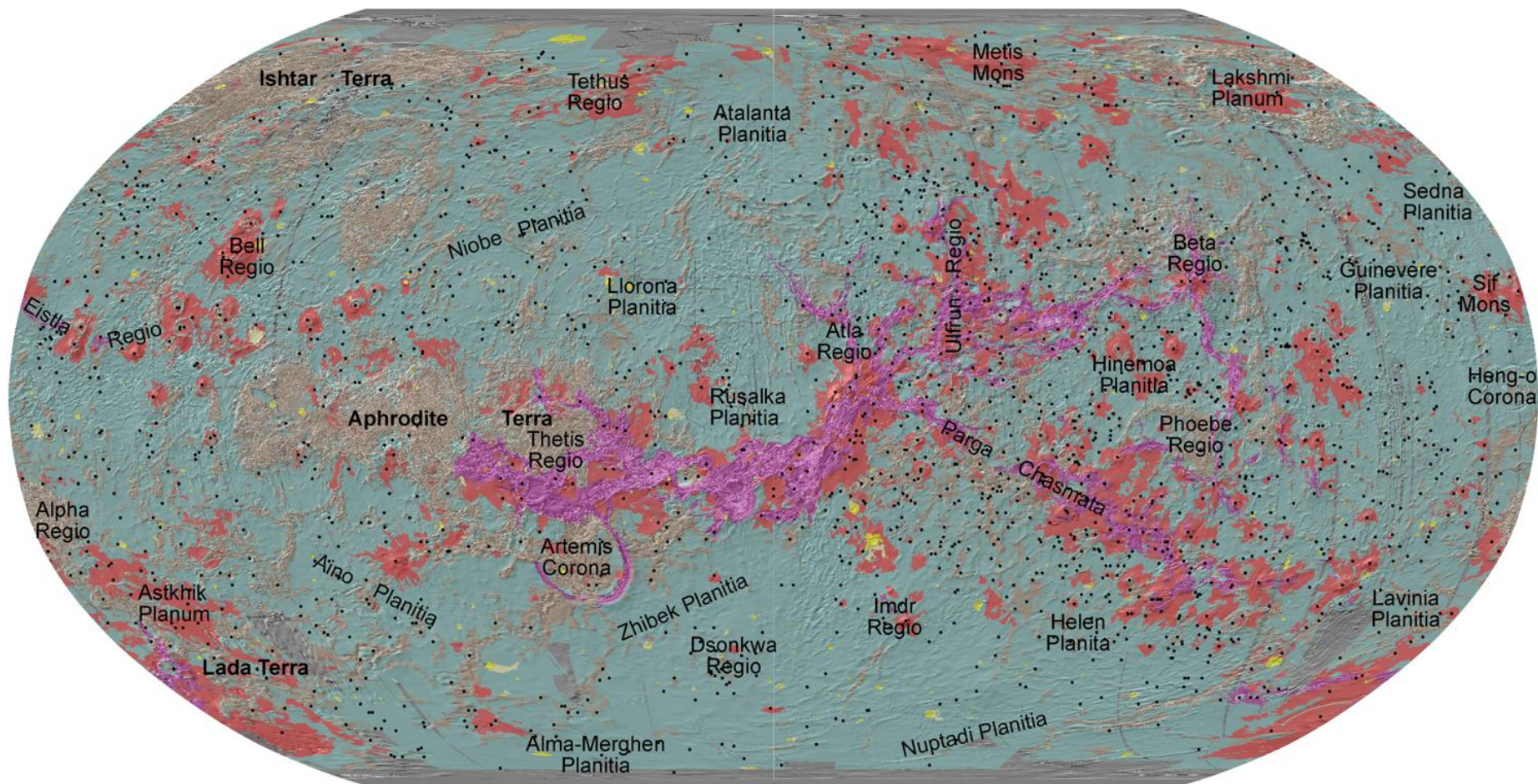
(b), (c) and (d)
Common Scale
and Key

[Převzato z Ghail a Wilson \(2013\)](#)

- Extr (na oce
- Atm mag
- Výp nas % v -V
- Po d

ot.
O₂
y

Globální charakter sopečné činnosti



*psh, rp1,
rp2*

global volcanic
units

rz, ac

ripping related volcanism
and tectonic components

pl, ps, sc

*t, pdl, pr,
mb, gb*

tectonised
terrains

c

Impact craters and
crater outflows

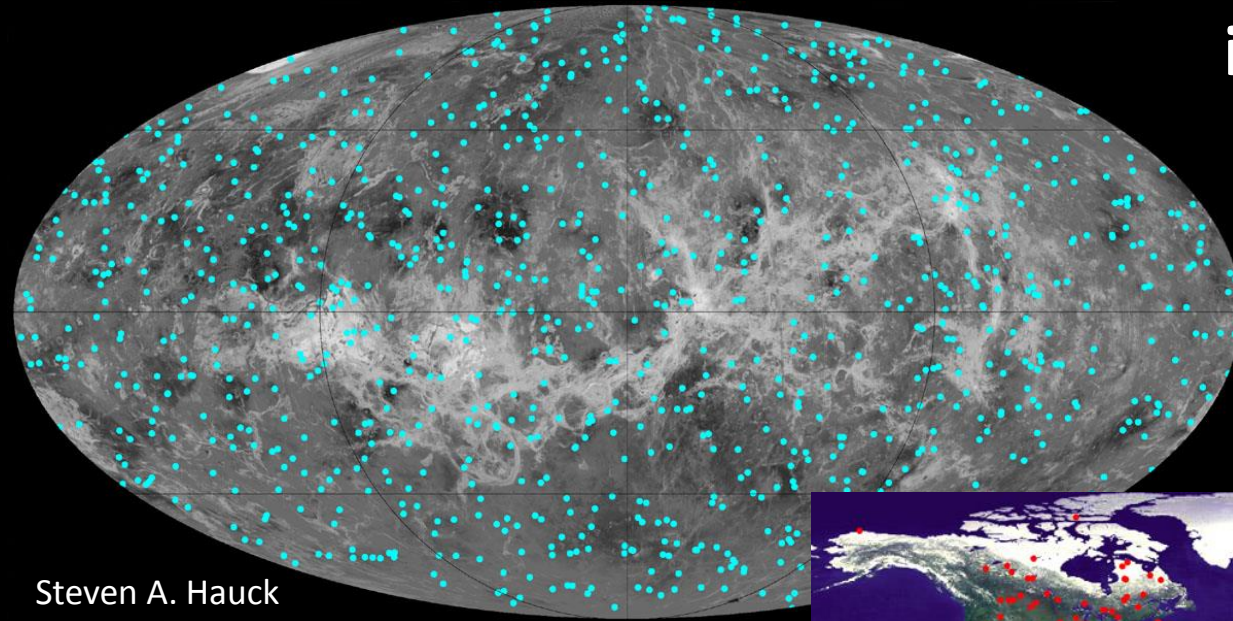
cf

Převzato z [Platz a kol. \(2014\)](#)

+ černé tečky značí pozici sopek

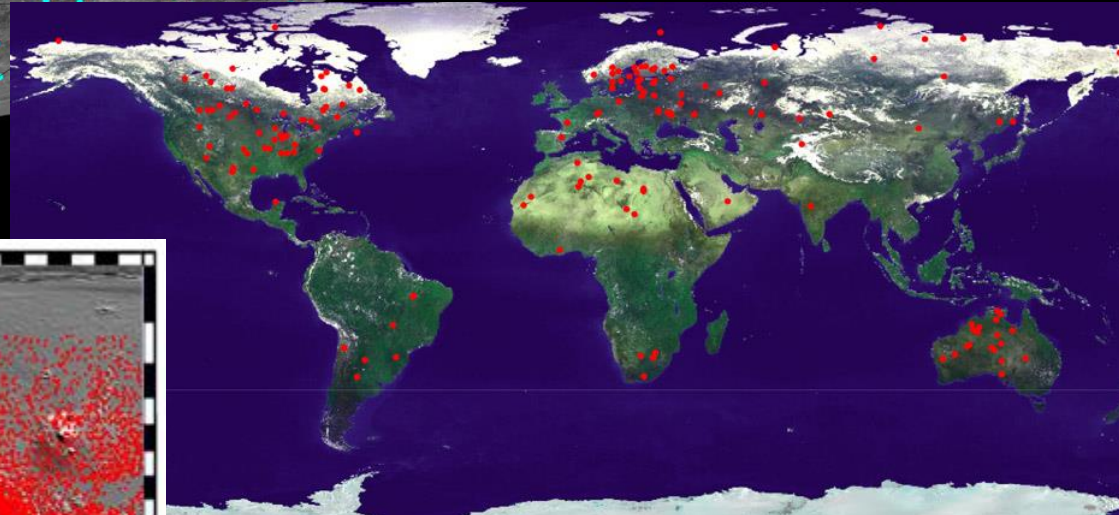
Nízká četnost impaktních kráterů

Jen okolo 1000 kráterů,
84 % má zachovalý tvar
jen 2,5 % obklopeno lávou
náhodná distribuce



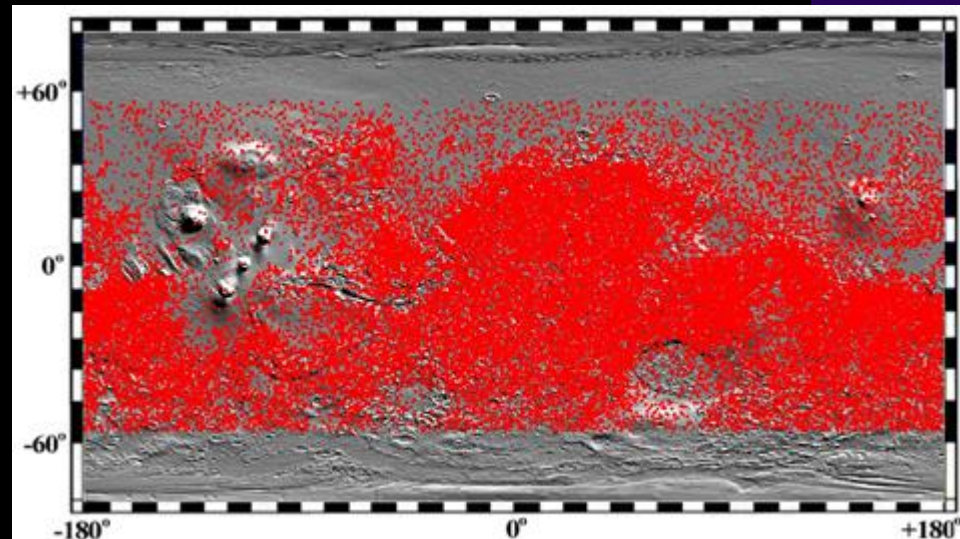
Steven A. Hauck

Mars



Space Imagery Center: <http://www.lpl.arizona.edu/SIC/>

Země



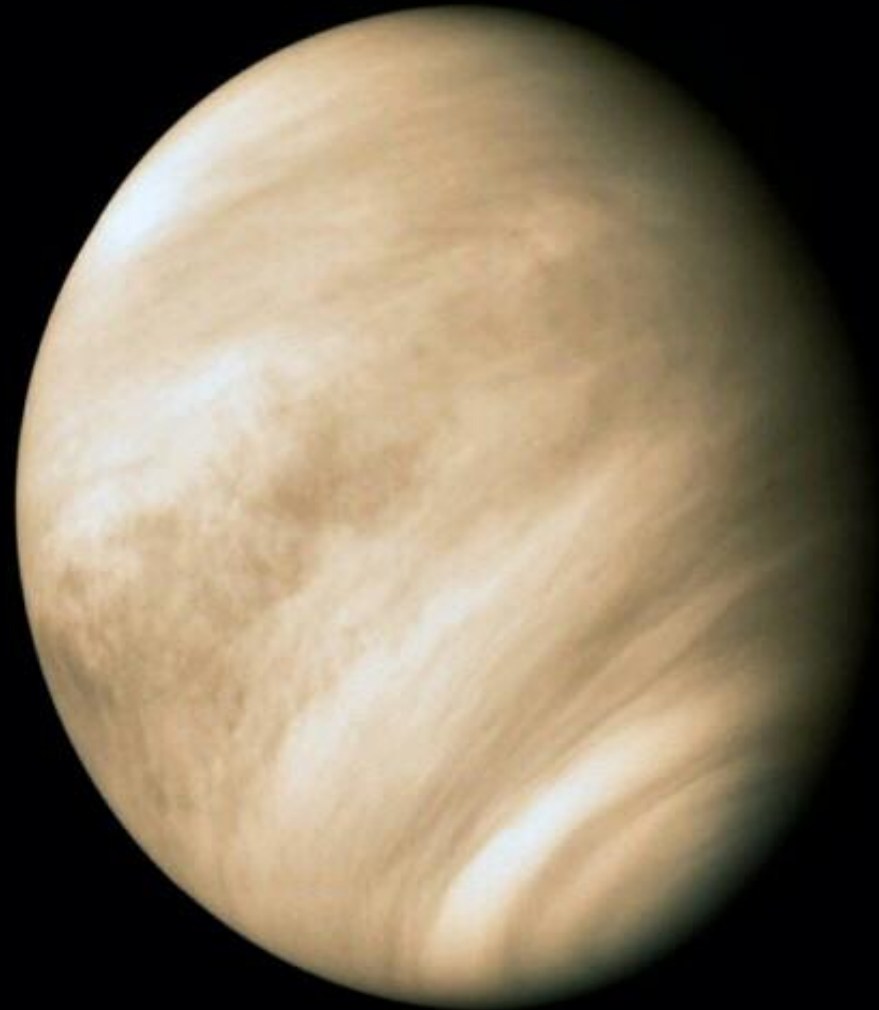
Barlowova databáze na šedém reliéfu Marsu z MOLA

Co omlazuje povrch Venuše?

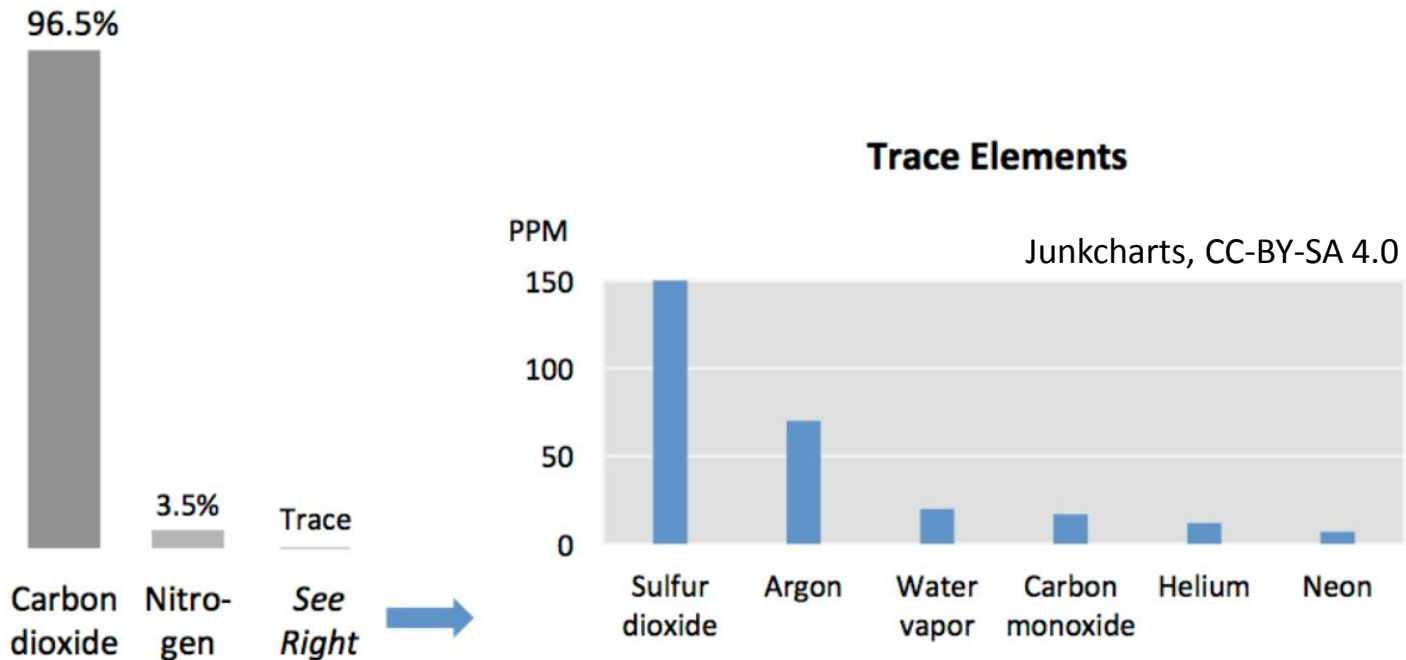
- Nízké množství impaktních kráterů naznačuje stáří povrchu 300 až 1000 My McKinnon et al., 1997
- Povrch Země omlazuje desková tektonika, jenže Venuše doklady o její přítomnosti nenabízí.
- Co omlazuje povrch Venuše?
- Tektonický vs. magmatický model
 - Tektonický: recyklace povrchu vlivem změn hustoty (teplo či chemismus) Jak rychle k tomu došlo?
 - Magmatický: vznik masivního magmatismu zalévající povrch
- Katastrofické přepovrchování Venuše Turcotte, 1993
- Postupné přepovrchování Venuše, tzv. princip uniformity
 - Procesy stále stejné, mění se jen jejich intenzita
 - Sopečná činnost by tak přetvářela povrch soustavně
 - Některé oblasti by ale mohly přežít, takže by část povrchu měla vykazovat vyšší stáří

Jsou na Venuši aktivní sopky?

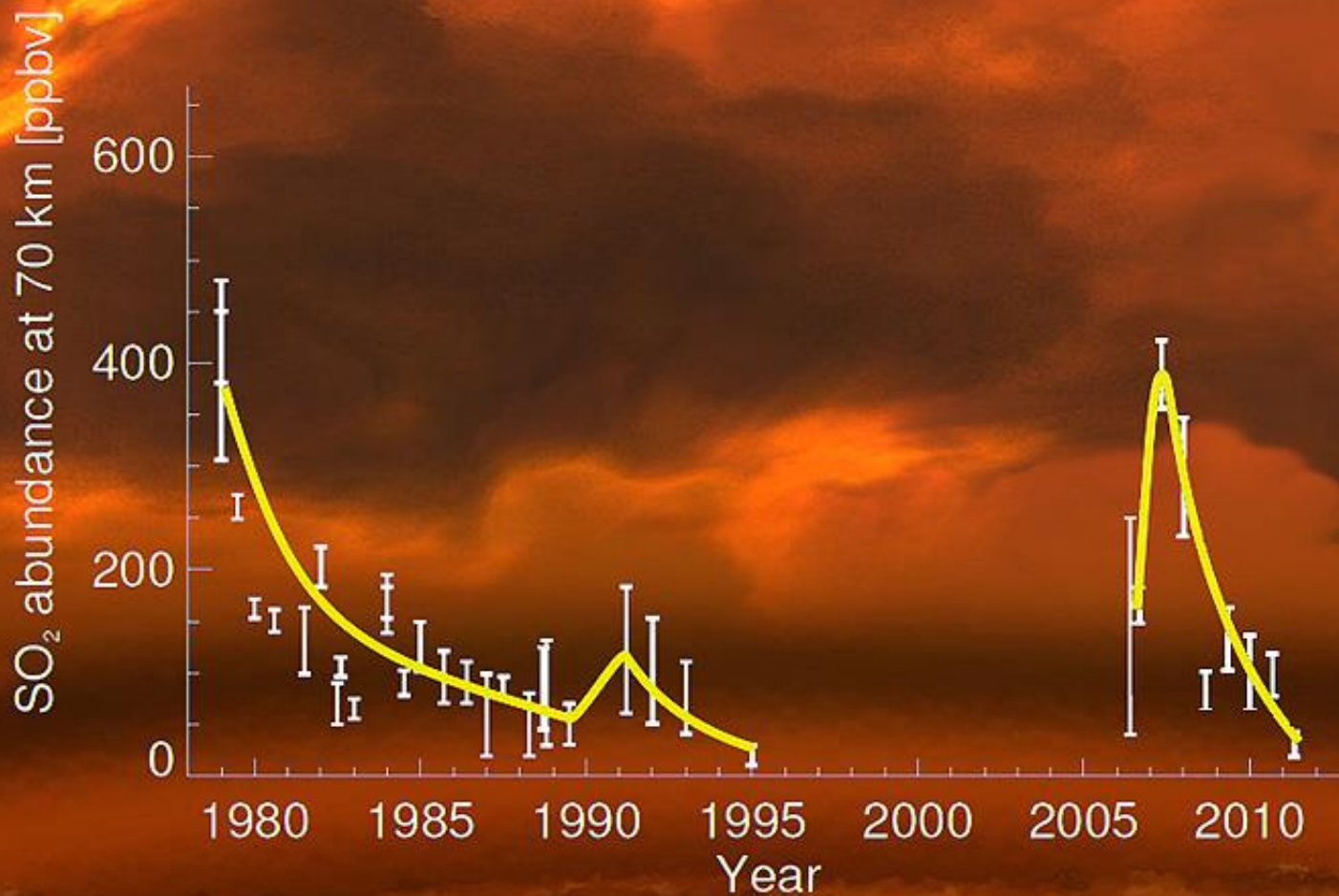
Složité hledání odpovědi



Složení atmosféry Venuše



- SO_2 není v atmosféře stabilní, během 1 až 50 miliónů let by mělo vymizet (Fegley and Prinn, 1989; Bullock and Grinspoon, 2001)
- Je potřeba zdroj pro jeho obnovování – nabízí se sopečná činnost...



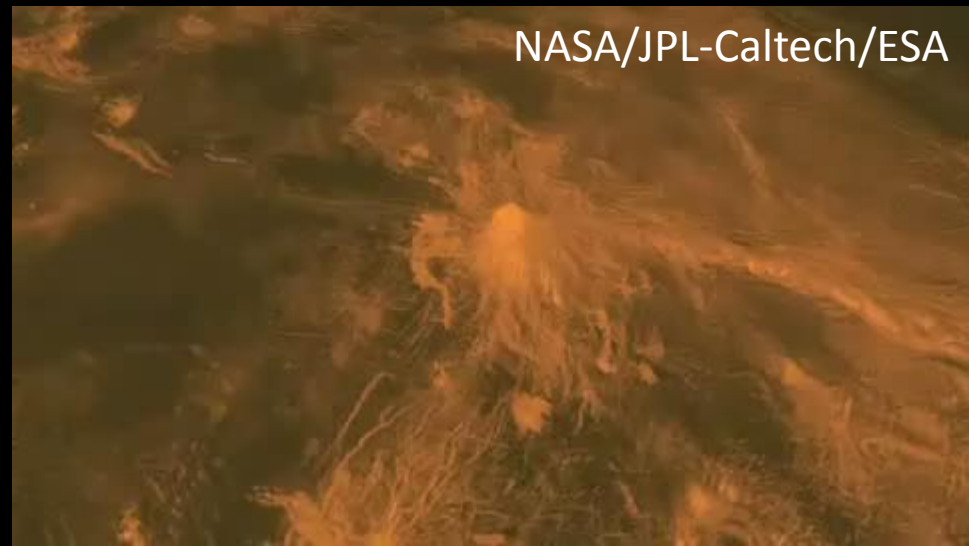
Data: E. Marcq et al. (Venus Express); L. Esposito et al. (dřívejší data); podklad: ESA/AOES

Tepelné snímkování povrchu



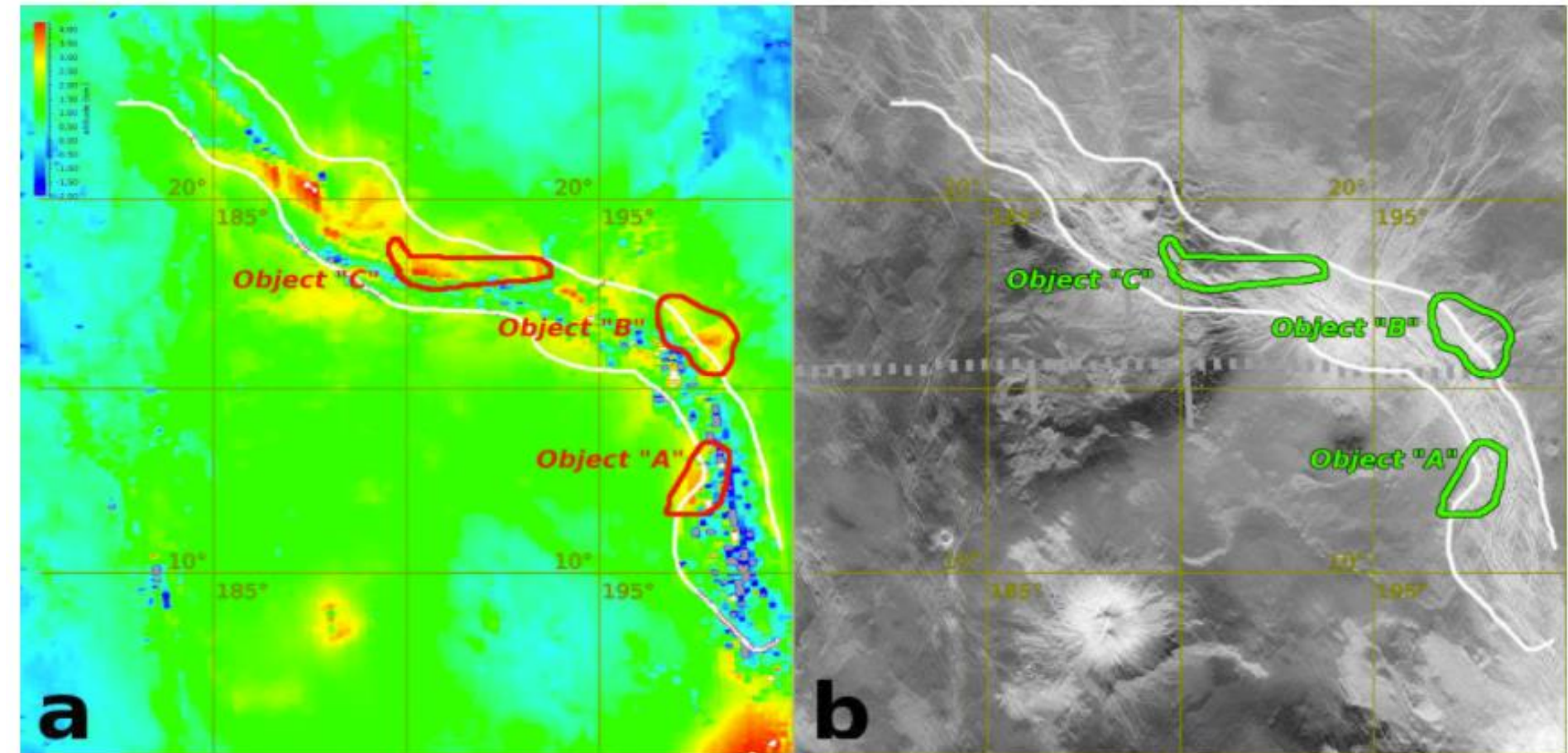
NASA/JPL-Caltech/ESA/Ryan Ollerenshaw a Eric DeJong

- Termální snímkování povrchu
- 9 horkých skvrn na jižní polokouli (1 až 2 °C více)
- Staré 250 až 2,5 miliónu let...



NASA/JPL-Caltech/ESA

Smrekar et al., 2010



- Proč se teplotní anomálie ukazuje na celém snímku, nikoliv jen v „sopečném centru“?

Máme tedy na Venuši aktivní sopky?

Kdo ví...

Neexistence jednoznačných vědeckých důkazů.

Shrnutí Venuše

- Povrch velice mladý – globální přepovrchování
- Výrazně poznamenaný sopečnou činností
 - Vysoká variabilita sopečných těles
 - Některá nemají na Zemi obdoby
- Atmosféra výrazně ovlivňuje průběh sopečné činnosti
- Důkazy o současné sopečné činnosti jsou naprosto nejednoznačné!