

# Mars: gravitační aspekty, uhlovodíky a život

Jaroslav Klokočník<sup>1</sup>, Václav Cílek<sup>2</sup>, Jan Kostelecký<sup>3, 4</sup>, Aleš Bezděk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Astronomický ústav AV ČR, Fričova 298, 251 65 Ondřejov; bezdek@asu.cas.cz; jklokocn@asu.cas.cz

<sup>2</sup> Geologický ústav AV ČR, Rozvojová 269, 165 00 Praha 6; cilek@gli.cas.cz

<sup>3</sup> Výzkumný ústav geodetický, topografický a kartografický, Ústecká 98, 250 66 Zdiby; kost@fsv.cvut.cz

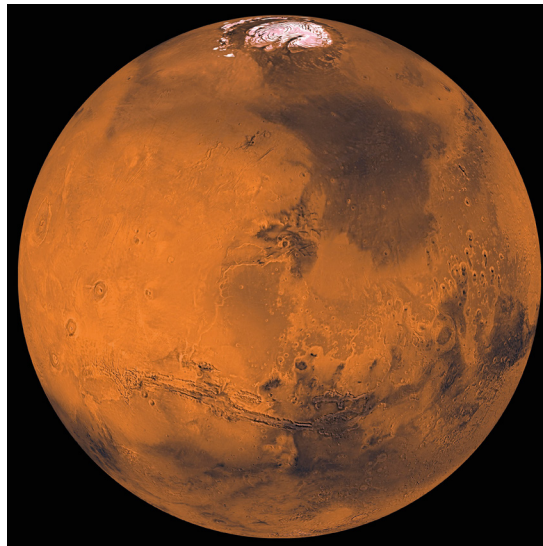
<sup>4</sup> Hornicko-geologická fakulta, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 708 33 Ostrava; kost@fsv.cvut.cz

Po rozmanitých aplikacích gravitačních aspektů na nejrůznější struktury na Zemi i na Měsíci přicházíme s podobnou analýzou pro Mars. Velmi neobvyklý je test možného výskytu uhlovodíků pomocí parametrů globálního gravitačního pole – takový postup má pro Mars světovou premiéru.

Gravitační pole kosmického tělesa charakterizuje rozvoj poruchového gravitačního potenciálu v řadu kulových funkcí s harmonickými geopotenciálními koeficienty (Stokesovými parametry). Souborům těchto koeficientů se říká modely gravitačního pole. Kombinací a vylepšováním pozemských a družicových měření v případě Země a s větším počtem umělých družic Měsíce a Marsu na nízkých drahách dlouhodobě měřících se dopracováváme k větším podrobnostem, přesnosti a spolehlivosti těchto modelů. Současný stav rozlišovací schopnosti modelů gravitačního pole je 10 km pro Zemi a Měsíc a 130 km pro Mars. To už umožňuje rozmanité globální a regionální (nikoli lokální) studie s geologickým, geofyzikálním, ale i archeologickým dosahem. (U Venuše a Merkuru je rozlišení jejich gravitačního pole pro podobné analýzy zatím nedostatečné.)

Anomálie gravitačního pole jsou vyvolány hustotními anomáliemi v tělese. Tradiční postup jejich studia pomocí gravimetrů (měřících tíhové anomálie) nestačí k jejich kompletnímu popisu, ale běžně se používá jako jeden datový vstup pro hledání ložisek ekonomických minerálů, podzemní vody, ropy, plynů aj. Pracujeme proto s více funkcemi poruchového gravitačního potenciálu než jen s tíhovou anomálií. To jsou *gravitační aspekty* (deskriptory, deriváty). Definovali jsme je již vícekrát [1, 2] a vysvětlili jejich fyzikální význam a použití i v tomto časopise [3, 4]. Zde je jen pro opakování vjmenujeme.

Kromě gravitační anomálie (poruchy) používáme Marussiho tenzor (matici druhých derivací poruchového gravitačního potenciálu) a zejména jeho radiální složku, gravitační invarianty a jejich specifický poměr. Zvláštní význam pak mají tzv. virtuální deformace nebo *strike angles* (úhly napětí). Dvě poslední veličiny velmi dobře charakterizují, zda v daném místě dochází ke kompresi/kontrakci nebo dilataci struktur, resp. zda jsou zde přítomny význačné směry, které by svědčily pro nějaké systematické silové působení. Geofyzika všechny jmenované veličiny až na virtuální deformace

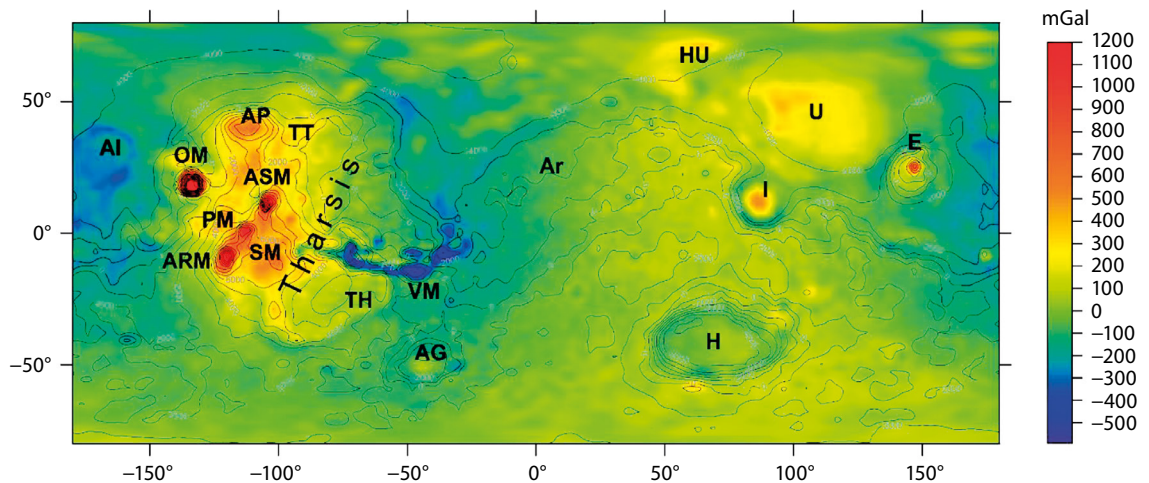


Fotografie planety Mars ve skutečných barvách, pořízená přístrojem OSIRIS, neseným sondou Evropské kosmické agentury (ESA) Rosetta v únoru roku 2007 během průletu kolem planety. Zdroj: Wikipedia

již znala, ale jejich systematické a hromadné použití s tím, že vstupními daty budou Stokesovy parametry gravitačního pole, je nové [1].

Gravitační aspekty vypadají ve vybraných geologických útvarech specificky, jsou pro ně charakteristické, ale vzhledem k povaze inverzní úlohy (lze určit parametry globálního gravitačního pole z rozmanitých družicových a dalších měření, ale nelze určit přímo hustotu pod povrchem tělesa) nejsou a nemohou být jednoznačnými vodítky pro hledání čehokoli zodpovědného za hustotní anomálie.

Na Zemi jsme s gravitačními aspekty získali značné zkušenosti. Objev korelace mezi nalezišti uhlovodíků a jednostranným nasměrováním úhlů napětí [5] nás inspiroval k testování nečekaných aplikací, někdy zdánlivě absurdních. Ukazuje se, že soubor gravitačních aspektů je v porovnání se samotnou tíhovou ano-



**Obr. 1** Stručný průvodce po Marsu: Impaktní pánev Hellas (H), pánev Isidis (Syrtis Major/Isidis) I, Utopia Planitia – a část Utopia basin (U). Hustak (HU) – v práci [15] námi pojmenovaná oblast znamená místo nevyrazné topograficky, ale gravitačně, a pozitivní tíhovou anomálií (pod vrstvou usazenin na dně paleooceánu se skrývá „husták“). Sopka Elysium (E); sopky oblasti Tharsis (T), tj. Olympus Mons (OM), Ascræus Mons (ASM), Pavonis a Arsia Mons (PM a ARM). Alba Mons (Patera) a Syria Mons (AP a SM), Tempe Terra (TT); kaňony Valles Marineris (VM), Thaumasia Highlands (TH), starobylá kráterová struktura (AI), Argyre Planitia (AG).  
Na pozadí jsou vyneseny tíhové poruchy (*gravity disturbances*)  $\Delta g$  [mGal], spočtené z modelu gravitačního pole Marsu NASA JGMRO\_120 F (Konopliv et al., 2020) [14] do stupně a řádu 80 v rozvoji ve sférické harmonické funkci (tomu odpovídající *ground resolution* je  $\sim 130$  km). Přidány jsou vrstevnice výšek nad referenčním tělesem v metrech (rotační elipsoid s hlavní poloosou  $a = 3396,19$  km a pólovým zploštěním  $1/169,8$ ). Topografie je odvozena z laserového altimetru (výškoměru) MOLA na umělé družici Marsu MGS [15].

málií „mocným čarodějem“, který dodává informace jinak nezískatelné (ale také občas zamotá hlavu). Přitom vstup je stále tentýž – je jím model statického gravitačního pole zkoumaného tělesa (tj. soubor harmonických geopotenciálních koeficientů do určitého stupně a řádu).

Gravitační aspekty nám umožnily odhalit v Antarktidě sopky a jezera skryté pod ledovým příkrovem (u jezera Vostok) a přispět k diskusi o obřím impaktním kráteru/masconu v Antarktidě (ve Wilkesově zemi) [1, 2], nastolit otázku, zda krátery Chixcubulub (severní Yucatán) nebo Popigaj (Sibiř) mohou být dvojité, či násobné, objevit nový kráter na Sibiři (Kotuykanskaja) [2], potvrdit objevy subglaciálních kráterů v Grónsku [2], prověřit známá a objevit nová paleojezera pod vrstvami písku na Saahaře [6, 7], přispět k diskusi o existenci podmořského kráteru v Indickém oceánu nebo čínského kráteru Badain [8] či vytipovat potenciální naleziště uhlovodíků na různých místech na světě [5, 9].

Metoda nevyžaduje lokální hloubkové práce a mohla by tak být levným nástrojem pro předběžnou prospekci. Není divu, že ji zkusíme aplikovat pro výběr míst s vyšší pravděpodobností nálezů podpovrchové vody kolem jižního pólu Měsíce (pro připravované mise s lidskou posádkou) [10–12] a nalezišť uhlovodíků (jednoho z možných zdrojů energie) pro Mars [13], kam lidstvo nevyhnutelně směřuje.

Rozsáhlé učené plochy gravitačních úhlů napětí se na Zemi vyskytují nejen v místech výskytu nalezišť podzemní vody, ropy a plynů. Charakteristické rysy všech gravitačních aspektů lze dosledovat i v oblastech velkých kráterů, údolí řek, paleojezer, geologických zlomů nebo sopek. Tak například kolem kráteru vytvářejí úhly napětí kruh, haló, jakousi „svatozář“. Sopka vykazuje dilataci kolem kaldery, kompresi v kruhu kolem sopky v rámci virtuálních deformací. Kráter má, jak dávno známo, negativní tíhovou anomálii uvnitř v pánvi, na dně, mascon ji

tam má pozitivní. Kráter má kompresi virtuální deformace na dně a dilataci v lemech kolem. Mascon má v podstatě nulovou druhou radiální derivaci uvnitř struktury. Postupně lze nastudovat charakteristické rysy pro jednotlivé geologické útvary a pak podle analogie přenášet to, co jsme se naučili pro známé útvary na Zemi, na nesnadno dostupná místa na Zemi a také na Měsíc a Mars a později (po zlepšení modelů gravitačního pole) i na Venuši a Merkur a některé měsíce vnějších planet.

Výsledky z rozboru drah umělých družic Marsu, hlavně *Mars Global Surveyor* (MGS), poskytly detailní a věrohodné globální modely gravitačního pole Marsu [14] spolu s podrobnou topografickou mapou celého Marsu z laserového výškoměru MOLA (*Mars Orbiter Laser Altimeter*; na téže družici). To jsou stěžejní výsledky práce rozsáhlých kolektivů hlavně v USA; a to jsou i vstupní data pro všechny naše analýzy.

Nejprve jsme gravitační aspekty pro Mars „zaměstnali“ k ověřování toho již alespoň částečně známého. Mapa na obr. 1 slouží jako rychlý (ale samozřejmě neúplný) průvodce po povrchu Marsu.

Studovali jsme hypotetický severní paleooceán (obr. 2a). Mars trpí dichotomií, celá severní polokoule (nížiny) jsou až o několik kilometrů níže než jižní vysočiny (vzhledem ke srovnávacímu referenčnímu rotačnímu elipsoidu). Voda v dávné době zabírala velkou část severní polokoule. Svědčí o tom topografie – nížina, která navíc vykazuje vcelku nevyrazný, zřejmě pískem a sedimenty (ve vrstvě až 2 km tlusté) zanesený původní terén. Co platí o topografii, neplatí obecně o gravitaci (obr. 1). Také je známa „přechodová pobřežní mělčina“ s komplikovaným terénem, zřejmě modelovaným dřívější sopečnou činností a povrchovou vodou. K těmto známým argumentům pro vymezení pozice paleooceánu jsme přidali další [15]. Zatímco gravitační anomálie reagují na hustotní anomálie až desítky kilometrů hluboko, vyšší derivace gravitačního poruchového potenciálu – a mezi nimi i úhly na-



pětí – reagují přednostně na hustotní anomálie nehluboko pod povrchem. V oblasti paleooceánu vypadají úhly napětí učesané do velkoplošných desek se stejnou orientací, jejichž rozsah mnohonásobně překračuje rozlišovací mez použitého modelu gravitačního pole Marsu. Obr. 2b a 4 porovnávají četnost a míru učesání na obou polokoulích – na severu obojí převládá oproti jihu.

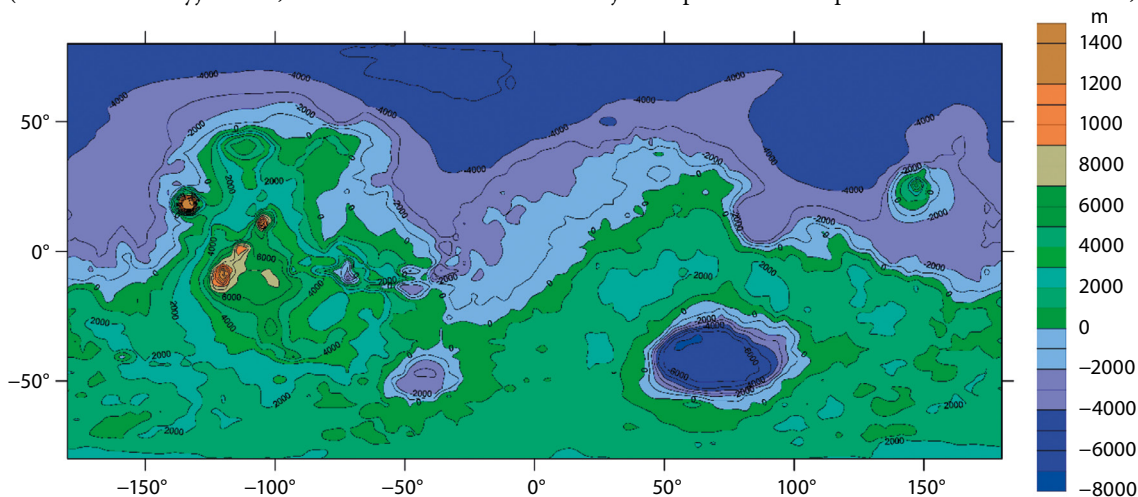
Markantním a detailně prozkoumaným objektem na povrchu Marsu jsou také Údolí Marineru (Valles Marineris, VM), nejrozsáhlejší systém kaňonů ve Sluneční soustavě. Gravitační úhly napětí zde prokazují existenci napětí podél nejdélsí osy údolí. To naznačuje, že se údolí mohla vytvářet v souvislosti s vulkanickou aktivitou v blízkosti Tharsis, kde mohlo dojít ke gravitačnímu kolapsu některého z vulkánů. Další část práce ve formování údolí už pak mohla odvést voda tekoucí z oblasti Tharsis do paleooceánu. V Údolích Marineru nalézáme výrazné učesání *strike angles* podél hlavní podélné osy směr západ–východ (od Tharsis) dolů „z kopce“ do paleooceánu (na východ a pak na sever) [15].

Isidis Planitia (na obr. 1 označená I) je impaktní bazén, který podle většinového názoru obsahuje mascon (na Marsu dost výjimečné, na Měsíci běžné u větších

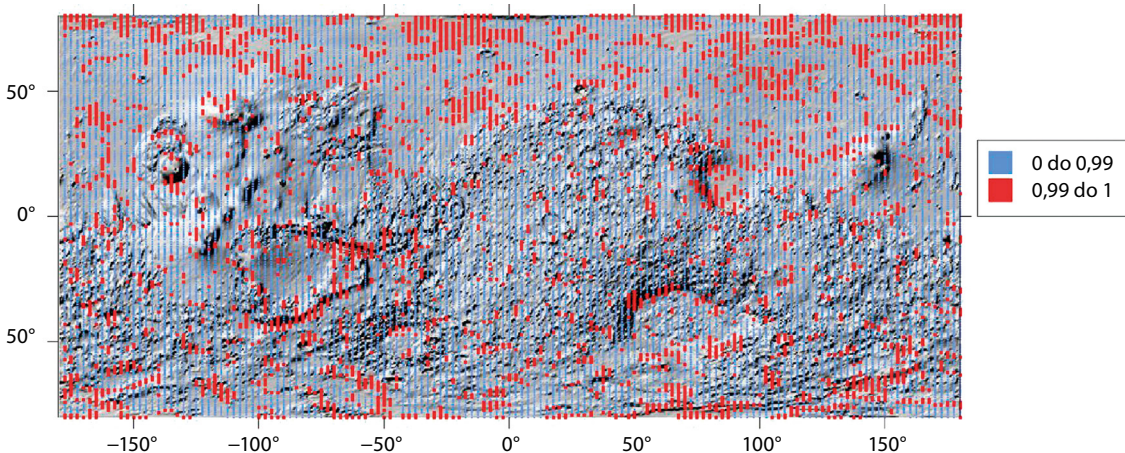
kráterů). Gravitační aspekty ale spíše svědčí o sopce. Obr. 3a a 3b porovnávají virtuální deformace sopek z oblasti Tharsis (typický signál sopky, jak jej známe se Země) se signálem Isidis – vypadá úplně stejně. Topografie ale žádnou sopku nevykazuje, ledaže bychom připustili, že sopka je celá ponořená ve vlastním materiálu. Po delší diskusi jsme v práci [15] udělali tento závěr: „...Our observations based on the virtual deformations present Isidis as a volcano-like feature (pile of lava) inside an impact crater, or simply – a mascon...“. Jsme si vědomi toho, že samotný gravitační signál bez dalších dat a účasti geologů nemůže rozhodovat, co je co.

Mars je poměrně malá planeta, a proto na počátku své existence vychladl dřív než Země. Jeho severní část byla pokryta poměrně hlubokým mořem, ve kterém se velice pravděpodobně vyskytovaly teplé podmořské prameny typu „bílých kuřáků“ (*white smokers*), které jsou na rozdíl od kyselých a životu nebezpečných černých kuřáků alkalické a vynášejí sloučeniny, jejichž rozkladem lze získat energii. Analogií je opět Země a její sopečná činnost, která i na Marsu byla velice aktivní.

Teplé podmořské prameny představují zdroj energie zejména pro starou skupinu chemotrofních bakterií,

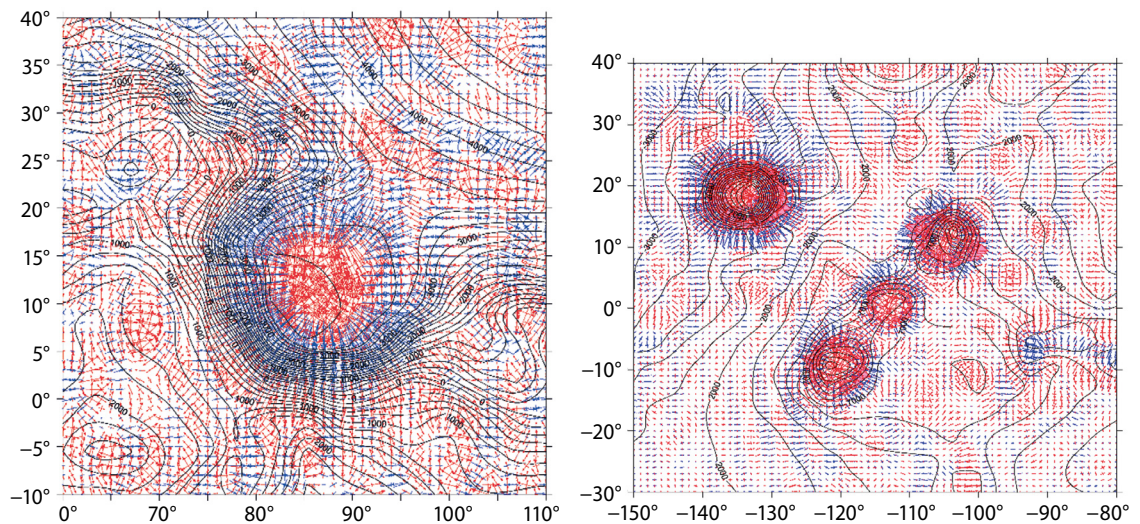


**Obr. 2a** Hypotetický paleooceán na severní polokouli Marsu (vyznačen modře) na topografické (vrstevnicové, generalizované) mapě z měření MGS MOLA [m]. Výrazná dichotomie Marsu.



**Obr. 2b** Celoplanetární mapa gravitačních úhlů napětí na Marsu ukazuje, že na severní polokouli je jejich učesání (jednostranné nasměrování) ve větší míře častější (červené plochy) než na jižní. Na severní polokouli byl s velkou pravděpodobností paleooceán. Nacházel se samozřejmě v nížině. Mezi jižní a severní polokouli je několikakilometrový výškový rozdíl (vzhledem ke srovnávací hladině, obr. 1), daný dichotomií (nesouměrností) planety (která tu je patrně od jejího vzniku). Zbyla po něm až dvoukilometrová vrstva usazenin čili dosti porézního (méně hustého) materiálu. To je prvotně to, na co úhly napětí svým jednostranným nasměrováním (učesáním) do jakýchsi plátů reagují, viz obr. 4–5c. Jižní polokoule je vysočina s řadou geologických útvarů, které učesání umenšují. Topografie z MOLA ve formě 3D.

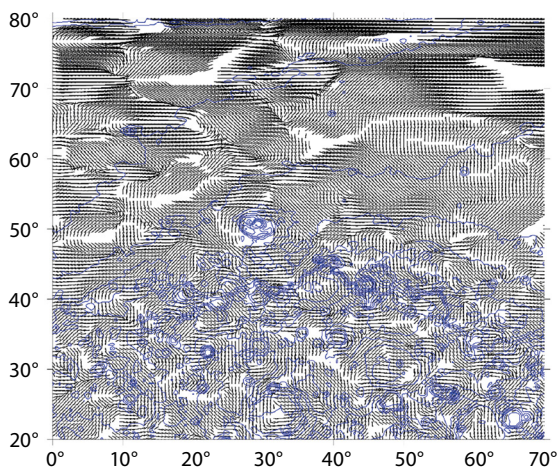




**Obr. 3a, b** Virtuální deformace v Isidis (a) a v sopečné oblasti Tharsis (b). Typická sopka vykazuje dilataci v kuželi a u sopouchu (červeně) a kompresi/kontrakci kolem (modře). Přidána je topografie z MOLA ve vrstevnicovém provedení [m]. Virtuální deformace *vd* pro Isidis vykazuje podobné rysy jako sopka, ale geologové upřednostňují mascon. Ukázky *vd* a  $\theta$  pro mascony jsou v suplementech prací [13] a [15] a v pracích věnovaných Měsíci [11] a [12].

jaké nalézáme v pozemských horkých pramenech nebo hluboko pod dnem oceánu. Vždy jsme geocentricky předpokládali, že Země je díky evoluci života jedinečná, ale pravděpodobně tento pohled můžeme obrátit a říct, že život je vlastnost hmoty a vzniká, kdykoliv má k tomu určité podmínky. A ty se v naší Sluneční soustavě nalézají na nejméně deseti místech na měsících Saturnu a Jupitera. Potřebují k tomu však ochrannou tepelnou oázu oceánu, dlouhodobě stabilní podmořský pramen a nějaký zdroj energie, kterým mohou být třeba sloučeniny železa či manganu.

Důkazy nejstaršího života, ať už na Marsu, nebo na Zemi, jsou málokdy jednoznačné. Různá kruhová, eliptická či koncentrická tělesa, která vypadají jako mikroorganismy, vznikají i mnoha anorganickými reakcemi, nicméně z Marsu je na základě detailních foto-



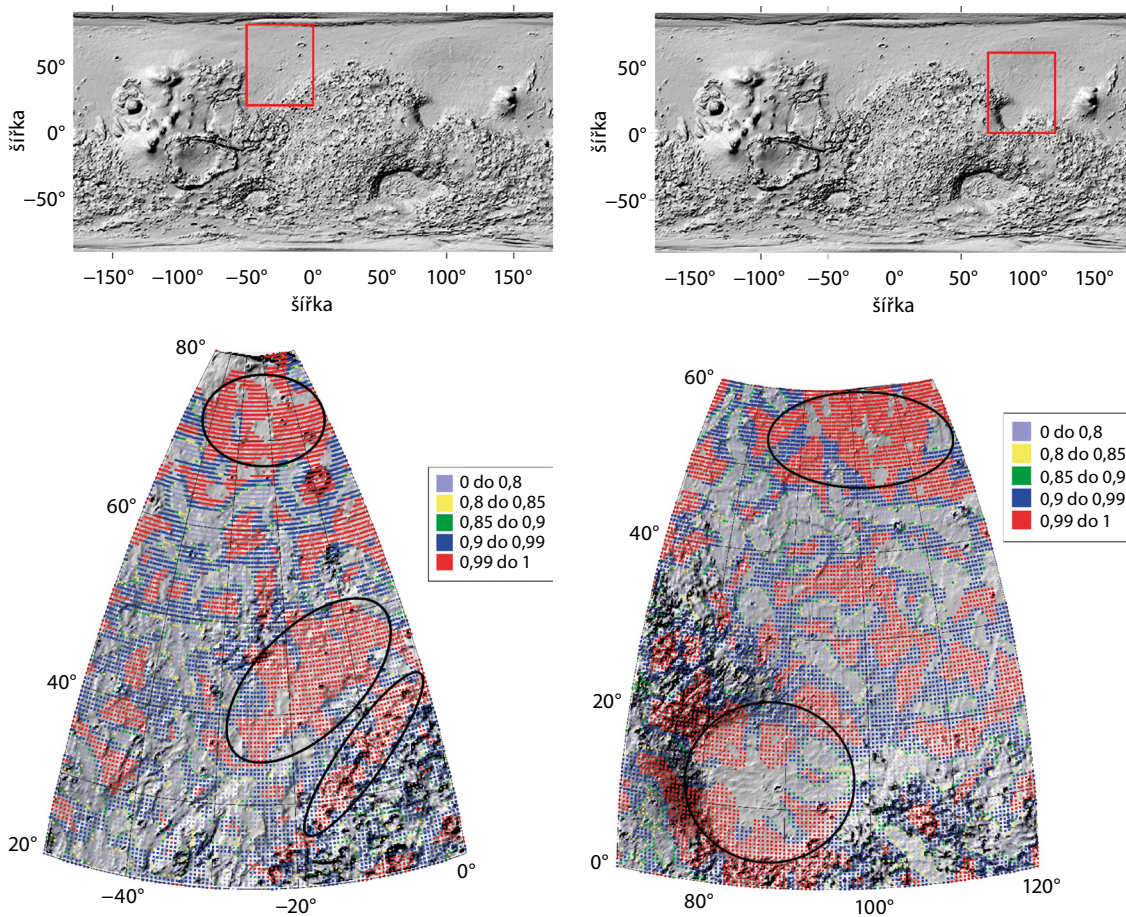
**Obr. 4** Část paleooceánu k porovnání učesanosti *strike angles* v nížině na severu (kde je výrazná) a na vysočině na jihu. Topografie z MOLA je naznačena vrstevnicemi modře. Orientační měřítko: 1 stupeň = 50 km. Zatímco gravitační anomálie reagují na hustotní anomálie ve větších hloubkách, vyšší derivace gravitačního potenciálu – a mezi nimi i úhly napětí – reagují primárně na hustotní anomálie nehluboko pod povrchem. V oblasti paleooceánu vypadají úhly napětí učesaně do velkoplošných plátů (pozor na zavádějící vzhled plátů ve vyšších areografických šířkách (kvůli použitému mapovému zobrazení), jejichž rozsah mnohonásobně překračuje rozlišovací mez použitého modelu gravitačního pole Marsu.

grafií pořizovaných marťanskými vozítky popsáno – a to skupinami respektovaných autorů – hned několik typů organických struktur. Patří mezi ně např. mikrobiální filmy, tenké povlaky vyskytující se na povrchu kameňů a skal v mělkém moři. U nás jsou tyto nejstarší zkameněliny známy např. z šikmých ploten proterozoických hornin u Vraného nad Vltavou. Jiným možným dokladem jsou jemně vrstevnaté marťanské struktury blízké pozemským stromatolitům, tedy organismům, které poprvé ve větší míře vytvářely atmosféru s průměsí několika procent kyslíku. Chlorofyl tehdy změnil geochemickou trajektorii celé planety.

Astrobiologové jsou celkem jednotni v názoru, že na Marsu se rozvíjel život, který pravděpodobně nikdy nepřekročil úroveň dejmě tomu mikrobiálních společenstev typu stromatolitů. Ale co se dělo dál? Mars rychle chladl, molekuly vody snáz opouštěly těleso s nižší gravitací. Oceán postupně mizel. Ale ještě předtím byly sedimenty s pozůstatky mrtvých těl mikroorganismů pohřbívány do větších hloubek a proměňovány tlakem i teplotou nitra planety či jejich sopek. Tak nějak podobně, dlouhodobou destilací planktonu za přítomnosti rozkládajících mikroorganismů a minerálních katalyzátorů vznikala na Zemi ropa. Nezástávala na místě, ale v podobě kapének rozptýlených ve vodě se podle tlakových a teplotních poměrů a v závislosti na pórizitě hornin ukládala až desítky kilometrů daleko od míst svého původu. Na ropu se můžeme dívat jako na chemofosílii. Nemá tvar bývalého živého těla, ale jeho látkové a zejména izotopové složení. Podobně i na Marsu bude jednodušší nalézt horniny, obvykle jinak celkem běžné pískovce, které budou obsahovat chemické stopy života, než samotné zkameněliny.

Podobným způsobem jsme uvažovali i o Marsu, kde jsme se podle pozemských analogií snažili nalézt taková místa, v nichž je přítomnost uhlovodíků pravděpodobnější [13]. Neznamená to, že takové místo automaticky označovalo lokalitu, kde bude ropa nebo podzemní voda, ale oblast, kde je větší pravděpodobnost jejího nálezu (porézni, méně hustý materiál vůči širšímu okolí). Na Zemi to je důležité zejména pro dosud neobjevená ložiska hlavně v hlubokém oceánu, kde každý vrt stojí desítky milionů dolarů. Podle analogie





**Obr. 5a** Část paleooceánu. Červeně označeny jsou plochy s nejvyšší mírou učešanosti *strike angles* (elipsy). Tam je, podle analogie se Zemí, zvýšená pravděpodobnost nálezu uhlovodíků. Ovály: 1. *Vastitas Borealis lowland* [ $\varphi = 65\text{--}75^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 40\text{--}0^\circ\text{W}$ ]; kráter *Lomonosov*: ( $65^\circ\text{N}$ ,  $10^\circ\text{W}$ ). *Acidalia Planitia*: [ $\varphi = 35\text{--}50^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 30\text{--}5^\circ\text{W}$ ]. Rozhraní nížiny a vysočiny *Cydonia Mensae*: [ $\varphi = 25\text{--}45^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 20\text{--}0^\circ\text{W}$ ]. Topografie z MOLA ve formě 3D. Poznámka: N = North, S = South, E = East, W = West.

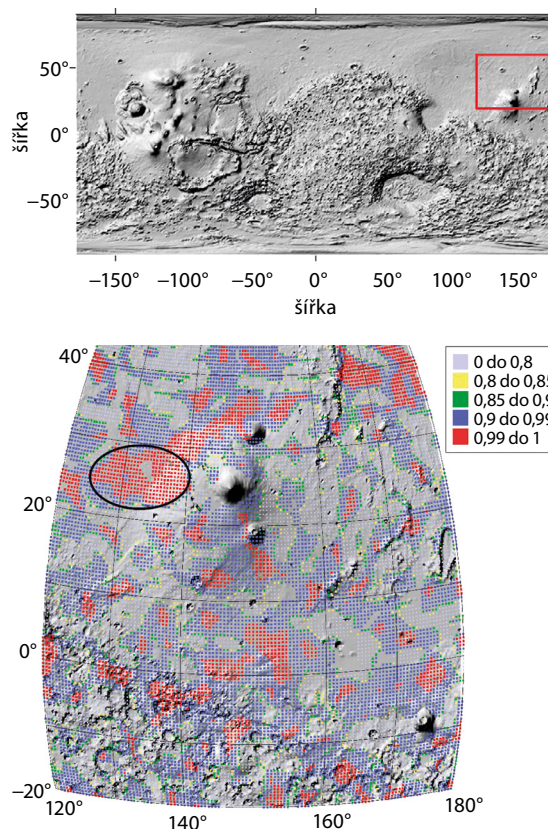
**Obr. 5b** (vpravo nahoře) Část paleooceánu od pánve *Isidis* převážně na sever: *Utopia Planitia*: [ $\varphi = 50\text{--}60^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 85\text{--}120^\circ\text{E}$ ]. *Isidis Planitia*: [ $\varphi = 0\text{--}20^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 75\text{--}100^\circ\text{E}$ ]. Topografie z MOLA ve formě 3D.

se Zemí jsme vytipovali (konkrétně v paleooceánu) rozsáhlá místa s nejvyšší mírou učešanosti úhlů napětí jako místa se zvýšenou pravděpodobností nálezu uhlovodíků. To je hlavní výsledek studie [13] (zde ukázky na obr. 5a–c).

Ovšem na Marsu je slovo ropa nutné nahradit slovem chemofosílie a maximálně počítat s indikativní příměsí uhlovodíků v porézních sedimentech ropných pastí. Jaký je význam tohoto typu výzkumů? Jedná se podle našeho názoru o jeden z pěti či šesti významných geologických indikátorů, které by měly být přednostně zkoumány martanskými misemi. Máloco nás lidí totiž na Marsu zajímá tak intenzivně, jako je přítomnost dávného života, který může vnést i trochu světla (a nejspíš mnoho dalších otázek) do počátků biologické evoluce na Zemi.

Nicméně tento článek, a tím pádem ani [13] a [15], není o životě na Marsu, ale zabývá se zejména oblastmi, kde podle analogií ze Země je možné očekávat zvýšenou koncentraci uhlovodíků.

Téma života na Marsu je sice kontroverzní, ale vzhledem k rostoucímu počtu článků o rychlosti vý-



**Obr. 5c** Část paleooceánu západně u sopky *Elysium*. Červeně označeny jsou plochy s nejvyšší mírou učešanosti úhlů napětí. Zde se shodují s lahary (porézním sopečným materiálem, elipsa) na západ od sopky. Topografie z MOLA ve formě 3D. Sopka *Elysium*: [ $\varphi = 20\text{--}30^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 125\text{--}140^\circ\text{E}$ ]; kráter *Gale*: [ $\varphi = 5^\circ\text{S}$ ,  $\lambda = 138^\circ\text{E}$ ]; sopka *Apollinaris Pater*: [ $\varphi = 9^\circ\text{S}$ ,  $\lambda = 175^\circ\text{E}$ ].

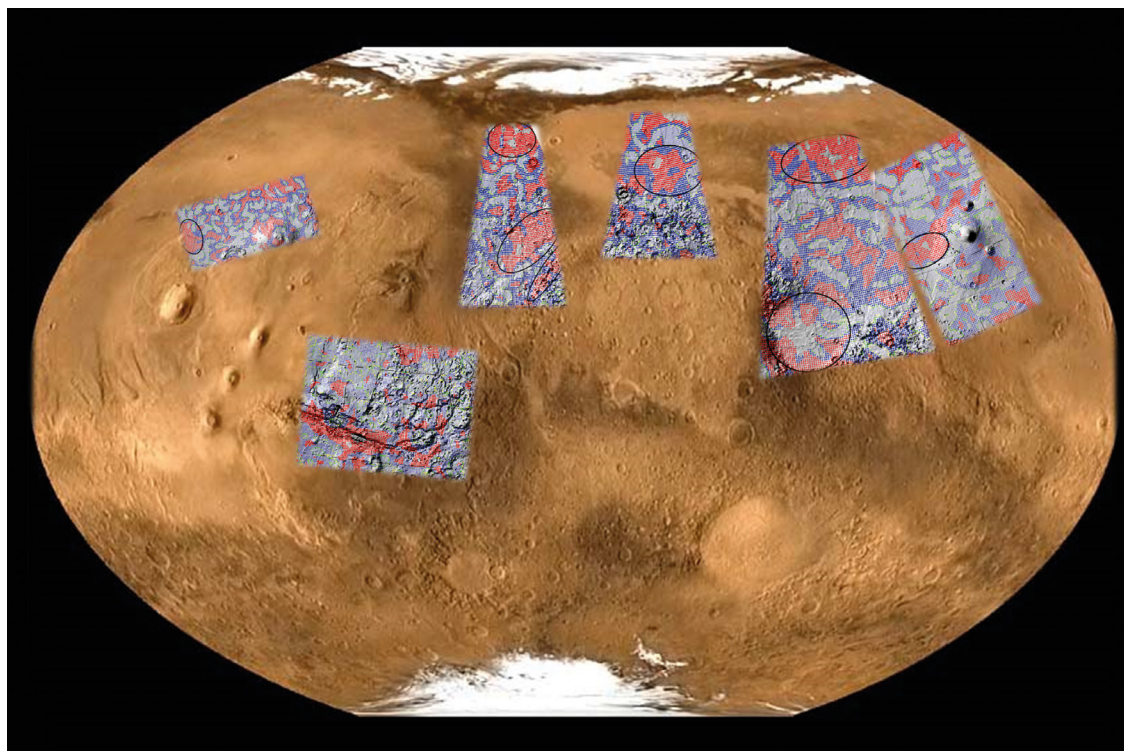


voje života na rané Zemi a o možnosti, že se jedná o opakovaný proces, se většina vědců domnívá, že život na Marsu vzniknout musel. Otázka je, do jaké fáze se stačil rozvinout a v jaké formě se zachoval. Podobně jako na Zemi může posloužit kritérium chemofosilií. Jde o to, že zejména kulovitá či oválná tělíska mohou vznikat mnoha organickými i anorganickými způsoby a něco podobného platí i pro laminované sedimenty typu stromatolitů, ale izotopový otisk může ukazovat na působení biogenních faktorů.

Život na Marsu našimi pracemi [13] a [15] dokázán není a ani o to v nich primárně nejde. Jen jako vedlejší produkt poskytujeme indicii pro existenci života na Marsu v minulosti. Je třeba na povrch Marsu dopravit geology, ať se rozhlédnou, a pak udělat vrt – radovat se můžeme, až když bude voda (potřebná pro trvalé lidské mise na Marsu) nebo ropa (zdroj energie) nalezena. Když k tomu „rozhlížení“ použijí i naše výsledky [13], budeme to považovat za úspěch.

### Literatura

- [1] J. Klokočník, J. Kostecký, A. Bezděk: *Gravitational Atlas of Antarctica*. Series Springer Geophysics. Springer Nature, 2017. ISBN: 978-3-319-56639-9.
- [2] J. Klokočník, J. Kostecký, V. Čílek et al.: *Subglacial and underground structures detected from recent gravito-topography data*. Cambridge Scholars Publishing, 2020. ISBN: 978-1-5275-4948-7.
- [3] J. Klokočník: Gravitační data pro geoaplikace. *Čs. čas. fyz.* **70**, 401–407 (2020).
- [4] J. Žďárská: Může astronomie pomoci s hledáním nalezišť ropy a plynu? *Čs. čas. fyz.* **72**, 59–60 (2022).
- [5] J. Klokočník, J. Kostecký: Gravity signal at Ghawar, Saudi Arabia, from the global gravitational field model EGM 2008 and similarities around. *Arab. J. Geosciences* **8**, 3515–3522 (2015). DOI: 10.1007/s12517-014-1491-y; ISSN 1866-7511.
- [6] J. Klokočník, V. Čílek, J. Kostecký et al.: Gravity aspects from recent Earth gravity model EIGEN 6C4 for geoscience and archaeology in Sahara, Egypt. *J. African Earth Sciences* **168**, 103867 (2020). Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103867>.
- [7] J. Klokočník, J. Kostecký, L. Varadinová et al.: A Gravity Search for Oil and Gas and Groundwater in Egypt Using the Strike Angles Derived from EIGEN 6C4. *Applied Sciences* **10**, 31 (2020). Dostupné na: <https://doi.org/10.3390/app10248950>.
- [8] J. Mizera et al.: Parent crater for Australasian tektites beneath the sands of the Alashan Desert, Northwest China: Best candidate ever? In *In the Footsteps of Warren B. Hamilton: New Ideas in Earth Science* (Ed. G. R. Foulger et al.), Geol. Soc. Am., 2022, Vol. 553, s. 251–260. Dostupné na: [https://doi.org/10.1130/2021.2553\(25\)](https://doi.org/10.1130/2021.2553(25)).
- [9] J. Klokočník, J. Kostecký, A. Bezděk et al.: The spatial distribution of the strike angles derived from EIGEN 6C4 gravity model – A new possibility for oil&gas exploration? *Internatl. J. Oil, Gas and Coal Techn.* **28** (3), 306–332 (2021). Dostupné na: <https://doi.org/10.1504/IJOGCT.2021.10037627>.
- [10] G. Kletetschka, J. Klokočník, N. Hasson et al.: Distribution of water phase near the poles of the Moon from gravity aspects. *Scientific Reports* **12**, 4501 (2022). Dostupné na: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08305-x>.
- [11] J. Klokočník, J. Kostecký, V. Čílek et al.: Gravity aspects from recent gravity field model GRGM1200A of the Moon and analysis of magnetic data. *Icarus* **384**, 115086 (2022). Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115086>.
- [12] J. Klokočník, J. Kostecký, V. Čílek et al.: *Atlas of the Gravity and Magnetic Fields of the Moon*. Springer, Cham 2022. ISBN: 978-3-031-08867-4. Dostupné na: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-08867-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-08867-4_2).
- [13] J. Klokočník, J. Kostecký, A. Bezděk et al.: Hydrocarbons on Mars. *Internatl. J. Astrobiology* **22**, 696–728 (2023). Dostupné na: <https://doi.org/10.1017/S1473550423000216>.
- [14] A. S. Konopliv et al.: Detection of the Chandler Wobble of Mars From Orbiting Spacecraft. *Geophys. Res. Letters*. **47**, e2020GL090568 (2020). Dostupné na: <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020GL090568>.
- [15] J. Klokočník, G. Kletetschka, J. Kostecký et al.: Gravity aspects for Mars. *Icarus* **406**, 115729 (2023). Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115729>.



Přehled míst s nejvyšší pravděpodobností výskytu uhlovodíků na Marsu v prostoru hypotetického paleooceánu.