

Polární čepičky Měsíce

aneb stydlivý Měsíček

Jaroslav Klokočník¹, Jan Kostecký^{2,3}, Aleš Bezděk¹

¹ Astronomický ústav AV ČR, 251 65 Ondřejov; jklokochn@asu.cas.cz, www.asu.cas.cz/~jklokochn

² Hornicko-geologická fakulta, VŠB-TUO, 708 33 Ostrava

³ VÚGTK, 250 66 Zdice 98

Před sto lety si astronomové byli jisti, že na Měsíci voda být nemůže. Ke změně tohoto názoru došlo v posledním půlstoletí díky technologickému pokroku a hlavní slovo v tom už nemají astronomové. Na Měsíci voda existuje; udrží se samozřejmě pouze pod povrchem. Hledala se a našla nejprve u pólů, ale víme o ní již i mimo polární oblasti. Vyskytuje se ve formě vodního ledu v měsíčním regolitu (tj. v povrchové porézní vrstvě decimetry až desítky metrů tlusté z rozmělněných hornin a prachu, která vznikla dopady meteoritů a kosmického záření), ale i jako podzemní jezera. Naše nová studie týkající se objevu polárních čepiček Měsíce [1] pracuje s parametry globálního gravitačního pole Měsíce, získanými z dlouhodobých měření z lunárních orbiterů. Metoda přináší argumenty o výrazných rozdílech v zastoupení podzemní vody mezi polárními a nepolárními oblastmi Měsíce a identifikuje konkrétní místa – zatím u jižního pólu, kde je výskyt vody pravděpodobnější než jinde. Náš postup je na všech ostatních nezávislý.

Úvod

Polární čepičky Země a Marsu jsou notoricky známé. I když má Mars tenkou atmosféru, své čapky převážně z ledu s H₂O, CO₂ a prachu udrží (a dokonce mezi nimi probíhá sezónní výměna hmot). Měsíc v současnosti už má atmosféru extrémně řídkou (argon, helium, radon, sodík, draslík unikající z měsíčního nitra). Voda se na povrchu „vypaří“, což bylo pozorováno v rámci měsícotřesení po dopadu mikrometeoritů. O polárních čepičkách Měsíce se neuvažovalo a soudilo se, že občasné výrony plynů uvolňují velmi staré zásoby vody, oxidu siřičitého a jiných plynů z pradávnejší minulosti Měsíce.

Ukazuje se, že nejen Země a Mars, ale i další tělesa ve Sluneční soustavě mohou mít podzemní zdroje s přítomností vody u pólů (měsíce Jupitera Europa, Ganymedes a Callisto, měsíce Saturnu Enceladus, Titan, Dione a Mimas, měsíc Neptunu Triton, planetky Ceres a Vesta a další).

Voda na Měsíci je velmi aktuální téma. O místě vybudování trvalé lidské posádky na Měsíci se uvažuje už dlouho. Výběr směřoval nejprve k místům u pólů s nejmenším kolísáním teplot. NASA [2] vytypovala 13 míst u jižního pólu trvale ve stínu. Pro začátek. Tato místa jsme naším postupem potvrdili [3]. Postupně se ukazuje, že přítomnost vody není vázána jen na trvale zastíněná místa. Měření z umělých družic Měsíce (např. Chandrayaan-1), kde je umístěn neutronový spektrometr měřící zpětně odražené neutrony z měsíčního povrchu a tím odhalující výskyt lehkých prvků, jako je vodík, a z letadla NASA vysoko v zemské atmosféře (americko-německý projekt SOFIA – *Stratospheric Observatory For Infrared Astronomy*) svědčí o přítomnosti vody [4]. Objevíli vodu v kráteru Clavius a v Mare Se-

renitatis, tedy na osvětlených místech. Voda na Měsíci pro pobyt a práci lidí (samozřejmě po úpravách) bude – to je povzbudivé konstatování.

O místě vybudování první základny pro trvalou lidskou posádku v rámci projektu *Artemis* je již rozhodnuto¹: jižní polární oblast. U kráteru Malapert A nedaleko jižního pólu přistál v r. 2024 modul *Odyssey* od soukromé americké firmy *Intuitive Machines* (*IM-1/Odyssey*²). Projekt *Artemis* [5] (NASA a soukromníci) navazuje a rozhodně nezůstane jediný.

Ještě se zmíníme o tom, jak se voda na Měsíc dostává, aby se uložila a udržela pod jeho povrchem. Je to bombardování Měsíce slunečním větrem, meteority a kometami (nekoná se žádné brzdění, popř. eliminace dopadajících částic atmosférou jako na Zemi). Dalším zdrojem je „oddychující si“ Země. Měsíc se každý měsíc kolem úplňku dostává do „chvostu“ magnetosféry Země (ta sahá daleko za oběžnou dráhu Měsíce a připomeňme, že Měsíc Zemi obíhá téměř v rovině ekliptiky). Družice Měsíce Kaguya zaznamenala periodický nárůst iontů vodíku a kyslíku kolem úplňků. Klettschka [6] navrhl mechanismus přenosu iontů ze zemské atmosféry magnetosférou až do měsíčního regolitu. Všechny jmenované postupy jsou dlouhodobě funkční, stále probíhající. Který převažuje, není známo.

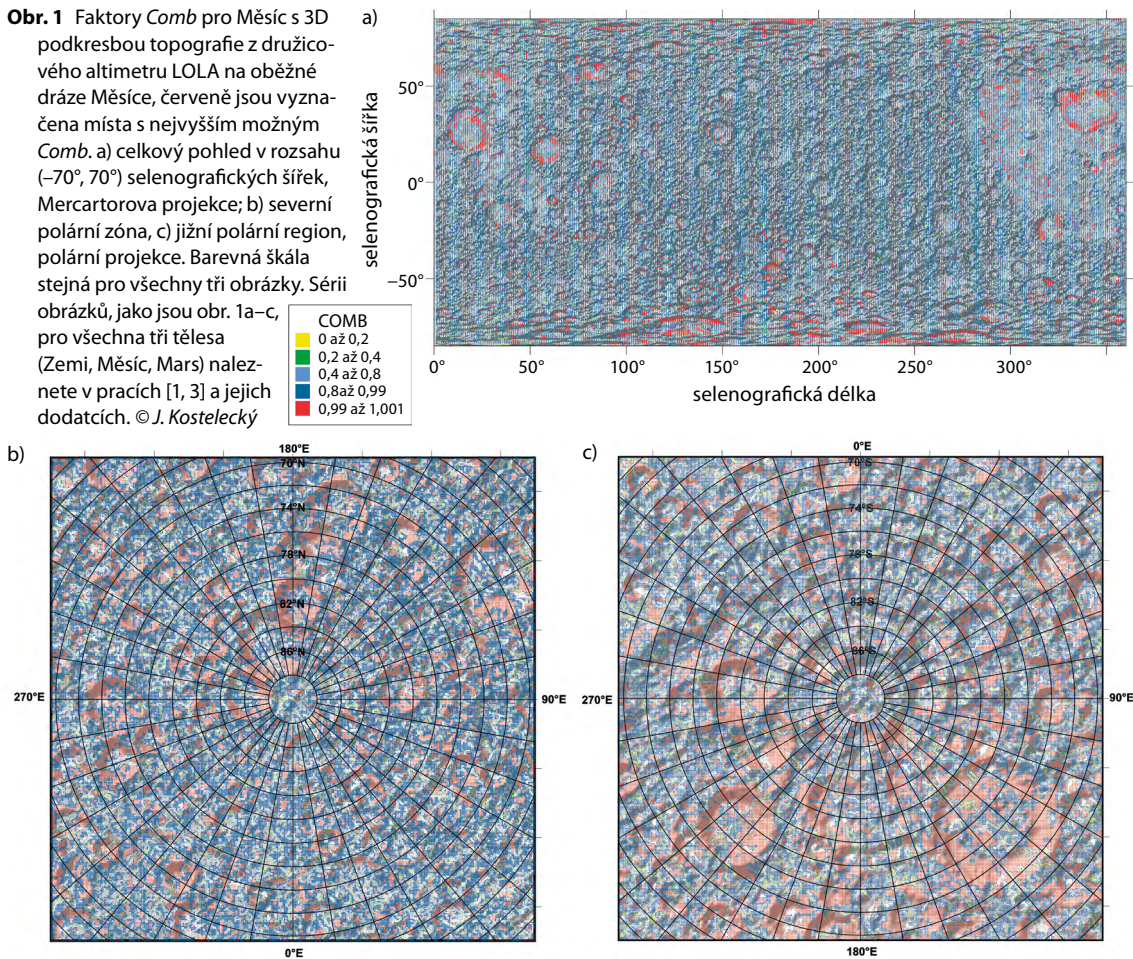
Gravitační aspekty

V tomto krátkém sdělení se nemůžeme věnovat teorii gravitačních aspektů. Odkazujeme na dodatky SM 1 k článkům [1, 3], na Atlas [6] a podrobnosti v [7].

1 <https://www.astronomy.com/science/how-the-government-shutdown-affects-nasa/>

2 <https://www.intuitivemachines.com/im-1>

Obr. 1 Faktory *Comb* pro Měsíc s 3D podkresbou topografie z družicového altimetru LOLA na oběžné dráze Měsíce, červeně jsou vyznačena místa s nejvyšším možným *Comb*. a) celkový pohled v rozsahu (-70°, 70°) selenografických šířek, Mercatorova projekce; b) severní polární zóna, c) jižní polární region, polární projekce. Barevná škála stejná pro všechny tři obrázky. Sérii obrázků, jako jsou obr. 1a–c, pro všechna tři tělesa (Země, Měsíc, Mars) naleznete v pracích [1, 3] a jejich dodatcích. © J. Kostecký



Hustotní anomálie pod povrchem vyvolávají anomálie v gravitačním poli. Geodeti, geologové, geofyzici a další běžně pracují s tíhovými anomáliemi (*gravity anomalies*) Δg , odvozenými z měření gravimetrie. Solný peň, dno impaktního kráteru nebo třeba jezero se ukáže jako negativní Δg , rudné ložisko jako pozitivní vůči okolí. Druhé derivace statického poruchového gravitačního potenciálu se měří gradientometry; je právě pět nezávislých složek Marussiho tenzoru (*Marussi tensor*) druhých derivací. Jeden gradientometr dokonce létal na oběžné dráze kolem Země a přispěl podstatnou měrou ke zpřesnění našich znalostí o jejím globálním gravitačním poli. Z Marussiho tenzoru lze odvodit právě tři gravitační invarianty (*invariants*) I_i a jistý poměr dvou z nich I informuje o tom, jaký tvar má zkoumané těleso (zde je spíše „placička“, nebo „kulička“).

Marussiho tenzor má hlavní směr, který je geofyzikálně významný. Jde o úhel napětí (*strike angle*) θ , který může informovat o existenci a směru existujících napětí. Právě θ nás nejvíce zajímají [7]. V některých místech jsou θ nasměrovány chaoticky, jinde lineárně (kaňon, zlom, katéna) narovnány ve směru stresu nebo stočeny do kruhu, vytvářejí halo či „svatozář“ (lem impaktního kráteru, sopka); pak říkáme, že jsou „učesány“ (*combed*). Pro míru učesanosti jsme zavedli a používáme faktor *Comb* (rozsah 0–1); pro „rozcuchaná“ θ je *Comb* malý, pro „pečlivě“ učesaná θ se *Comb* blíží jedné. Velké hodnoty faktoru *Comb* byly pozorovány v terénu s nižší hustotou či vyšší porézností materiálu. Od známého k neznámému. Ověřena byla známá a přidána byla dosud neznámá paleojezera na Saahaře, možné rezervoáry podzemní vody, naleziště uhlovodíků,

krátery a sopky včetně těch pod ledem a další, viz [7] (kde je celá řada odkazů na naše další práce).

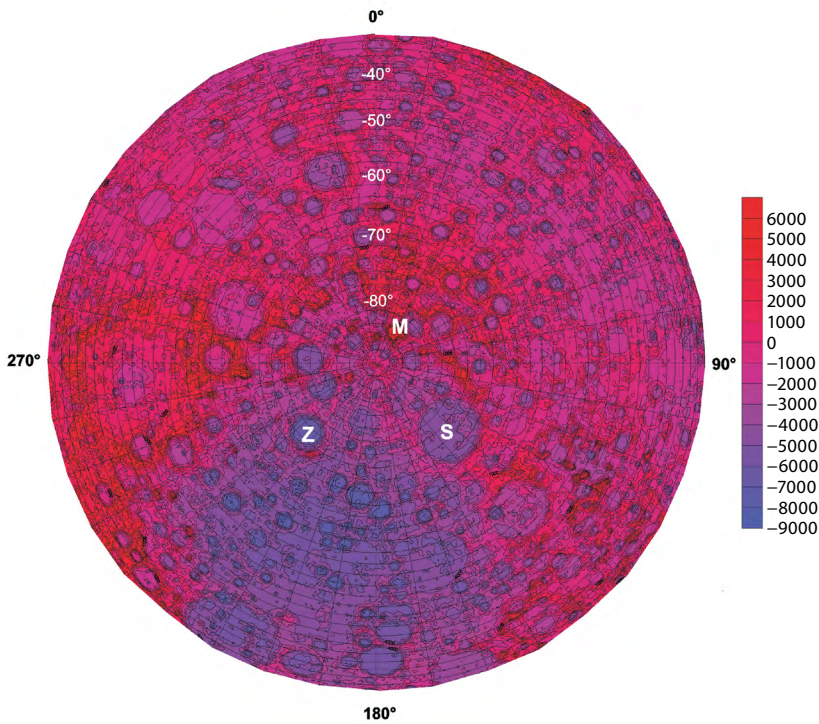
Nakonec zmíníme virtuální deformace (*virtual deformations*) vd , tj. posuny přepočtené z úhlových veličin analogických tížnicovým odchylkám, které existují jako dilatace nebo komprese a ukazují míru energie ve studovaném objektu, jež se projevila jako ireverzibilní deformace, např. podél zlomů. Sopky a krátery mají charakteristický signál, zejména v θ a vd [7].

Všechny vyjmenované veličiny shrneme pod názvem *gravitační aspekty* (deskriptory). Všechny dohromady poskytují úplnější a objektivnější informaci o studovaném objektu (*causative body*), oně příčinné hustotní anomálii, než by mohla poskytnout samotná Δg (ale za cenu pracnějšího výpočtu nelineárních funkcí).

Problém je přirozeně v tom, že obrácená úloha, o kterou se zde snažíme, není a nemůže být jednoznačná. Gravitační signál vyvolaný hustotní anomálií může mít různé příčiny a přitom vypadat podobně. Vždy je tedy vítán geovědec se znalostí regionu, který může říct, co je a co není v místě možné. Po exaktním matematickém postupu (teorie a výpočet gravitačních aspektů) tak nastupuje empirická fáze – úplná detektivka.

Metoda

Pracujeme s globální informací o gravitačním poli tělesa. Statický poruchový potenciál je rozvinut do řady kulových funkcí s harmonickými koeficienty (Stokesovými parametry) C_{lm} , S_{lm} do určitého stupně a řádu (l/m) podle dostupných dat. Ony parametry jsou jakožto *modely gravitačního pole* veřejně přístupné pro



Obr. 2 Topografie Měsíce kolem jižního pólu se spekulací o umístění a rozsahu polární čepičky. Obří pánev Aitken (modře) je na odvrácené straně Měsíce; ovlivňuje pozici jižní čepičky. Označené krátery pro lepší orientaci: M – skupina Malapert, S – Schrödinger, Z – Zeeman. Stupnice výšek vůči referenční kouli (o poloměru 1 737,4 km) je v metrech. Povšimněte si obrovských výškových rozdílů. Topografická mapa Měsíce je sestavena z altimetrických měření LOLA (*Lunar Orbiter Laser Altimeter*). Další obrázky jsou v dodatcích 2 a 3 k článku [1] ke stažení na: https://www.asu.cas.cz/~jklokocn/MOON25_supplements.

nejrozmanitější testy a použití. Jsou výsledkem zpracování monumentálního počtu měření poruch drah umělých družic a měření z těchto družic dotyčných těles a v případě Země ještě hromady terestrických dat.

Pro Měsíc používáme americký gravitační model Měsíce GRGM1200A [8] do max. $l/m = 600$ s rozlišením na povrchu (*ground resolution*) ± 10 km (tj. menší útvary „nevidíme“); přesnost ~ 10 mGal. Model využívá data hlavně z LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*) a dvojice družic GRAIL (*Gravity Recovery And Interior Laboratory*). Topografie terénu je získána z měření LOLA (*Lunar Orbiter Laser Altimeter*) na palubě LRO. Výšky se vztahují k referenční kouli o poloměru 1 737,4 km. Nominální přesnost výšek je ~ 10 cm.

Výstup z modelu GRGM1200A, tj. soubor C_{lm} , S_{lm} , je pro nás vstupem do výpočtů a kreslení všech gravitačních aspektů. V ukázce se omezíme na faktor *Comb* (obr. 1a-c), více viz [1].³

Polární čepičky

Vodou na Zemi, Měsíci a Marsu prostřednictvím gravitačních aspektů, zejména úhlů napětí, se zabýváme již delší dobu; pro Měsíc odkazujeme na [3] a na shrnutí v [7]. Práce [1], ze které zde čerpáme, je nejnovější z této série.

Vypočetli jsme gravitační aspekty a faktor *Comb* a zobrazili je spolu s LOLA topografií pro celý Měsíc. Obr. 1a ukazuje *Comb* pro nepolární oblast mezi selenografickými šířkami -70° a $+70^\circ$. Největší míra učesání úhlů napětí, zobrazená červenou barvou, je zjev-

3 https://www.asu.cas.cz/~jklokocn/MOON25_supplements nebo https://www.asu.cas.cz/~jklokocn/MOON24_supplements.

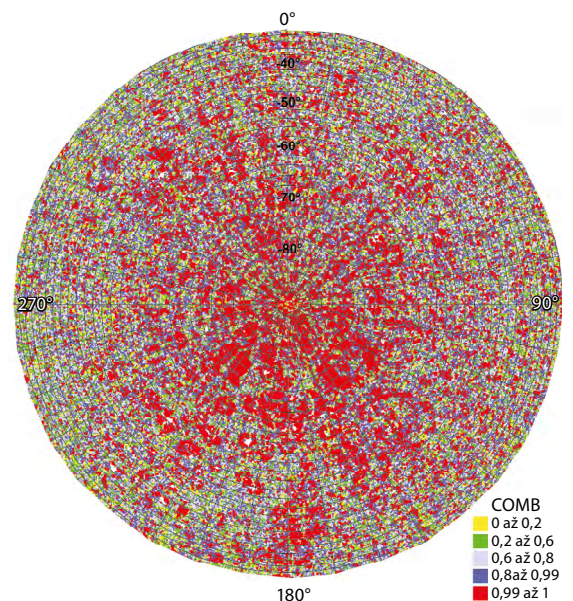
ně v některých kráterech a měsíčních mořích, směrem k pólům, zejména jižnímu. Podrobnější pohled na situaci kolem pólů umožňují polární projekce na obr. 1b a c. Situace je nesymetrická, jižní pól Měsíce obsahuje více potenciálních ložisek ledu než pól severní. Jižní oblast obří a hluboké Aitkenovy impaktní pánve ukazuje jasné gravitační signatury, které nejspíš souvisejí s vodou. Dojem ještě prohlubuje samotná topografie, jak ji ukazuje obr. 2 (obrovská deprese, až 9 km pod referenční kouli, zobrazená modře). Výběr, co je a co není „polární“ oblast, je kompromisem přijatelným pro všechna tři porovnávaná tělesa (tab. 1). Chce to nějakou statistiku.

Ze spočtených θ jsme vybrali místa s $Comb > 0,99$ a v jemném kroku spočetli četnost jejich výskytu v nepolární oblasti *A* a v polárních oblastech *P* se šířkami $> |70^\circ|$ a z toho poměry $r = P/A$ pixel po pixelu. Hodnoty *r* jsou v tab. 1 k porovnání pro Zemi, Měsíc a Mars; v [1] s dalšími podrobnostmi.

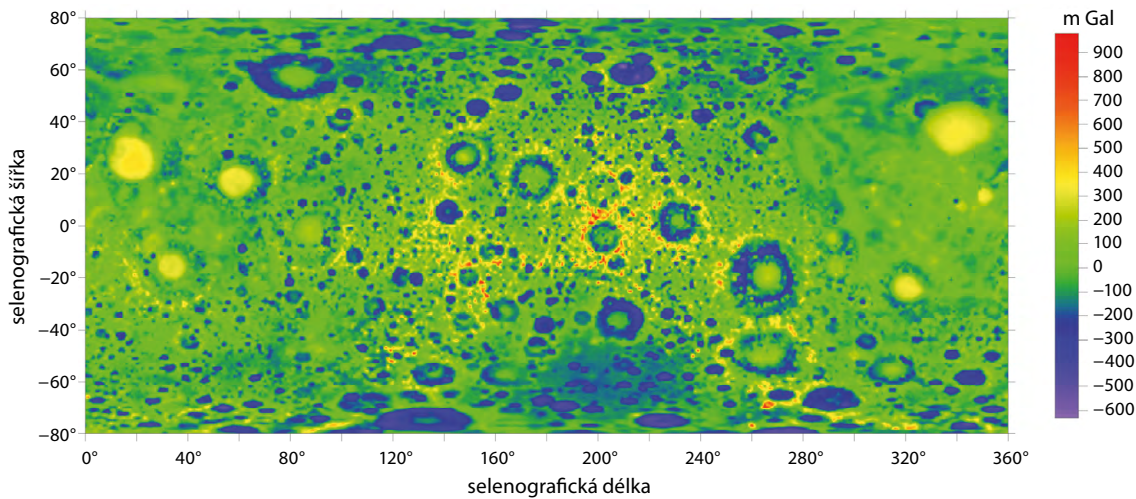
Země má poměr *r* velký pro Antarktidu (10), Arktida je chabá, nemůže konkurovat (2). Antarktida je jak bochník ledu narostlý na pevnině. U Marsu se poměr *r* může zdát nečekaně malý. Mars má mnohem výraznější severní polární čepičku (H_2O , CO_2 a prach), zase takový bochník namrzlý u pólu v místech bývalého paleoocéanu. Všude kolem čapky je terén s usazeninami a nížinou (hluboko pod referenčním elipsoidem) [9]. Takže není divu, že *r* je malé. Jižní čepička je proti severní nevýrazná a leží na vysočině (vysoko nad referenčním elipsoidem) s horami a krátery a možností podzemního ledu.

Výsledky pro Měsíc nás ohromily. Poměry *r* jsou 6–8 pro polární oblasti. (Při jiné volbě polární a nepolární oblasti by mohly být ještě větší.) Je tam tedy mnohem větší šance k přítomnosti materiálu s větší porozitou a menší hustotou než jinde. Škoda že Měsíc nemá aspoň nějakou atmosféru schopnou vodu udržet. Na obloze by se pyšnil ozdoben polárními čepičkami (poněkud asymetricky posazenými).

Je však polární čepička pod povrchem ještě čepička? Podle definice z [10] ano. Požadavek planetární fyziky je jen ten, že to musí být „*a body of solid phase matter in the polar region*“.



Obr. 3 Místa s nejvyššími hodnotami *Comb* faktorů ve stejném rozsahu selenografických šířek jako na obr. 2. Zde je větší šance na podpovrchový led než jinde. Podle [1].



Obr. 4 Tíhové anomálie [mGal] pro Měsíc v Mercatorově projekci. Negativní anomálie (modře) jsou u impaktních kráterů uvnitř kráterů, kolem je pás pozitivní anomálie (červeně); u maskonů naopak. Evidentní je koncentrace negativních hodnot směrem k jižnímu pólu. Podle [1].

Šance na vodu na Měsíci, hlavně v polárních oblastech, je povzbudivá, ale k pitné vodě bude ještě dlouhá cesta. To, co na místě vyvrtáme, může být jedovatý hydroxyl (OH-) a z vrstev u povrchu (regolit) cosi kontaminovaného kosmickým zářením. Je tu ale naděje nevoztit vše ze Země nebo nevyrábět na místě. To stojí za průzkum.

Závěr

Gravitační aspekty pro Měsíc, zejména pak úhly napětí, vykazují charakteristiky zvýšené pravděpodobnosti výskytu podpovrchového ledu. Úhly napětí jsou v kritických místech lineárně uspořádány („učesány“) a faktor míry učesání *Comb* se blíží jedné (obr. 1a-c). Přítomnost vody není vázána jen na krátery a trvale zastíněná místa. Podle našich nálezů může Měsíc mít polární čepičky (jižní je výraznější než severní) [1]. Ne že by byl Měsíček stydlivý, ale je bez atmosféry, a tak čepičky musejí být schované pod povrchem. Oblast jižní polární čepičky (obr. 2) má 8× větší pravděpodobnost přítomnosti podzemní vody/ledu v té či oné podobě (poměr *r*) než nepolární oblasti, tj. lokality v námi vybraném intervalu selenografických šířek (-70°,70°), viz tab. 1.

těleso	Země δ	Měsíc ζ	Mars σ
jih	10	8	1,1
polární oblast			
sever	2	6	1,5

Tab. 1 Porovnání poměrů $r = P/A$ pro Zemi, Měsíc a Mars, spočtených pro nejvyšší „faktor učesání úhlů napětí“ *Comb* > 0,99 mezi polárními *P* a nepolárními *A* oblastmi [„polární“ znamená: pro planetografické šířky > |70°|, nepolární v intervalu (-70°,70°)]. Sérii obrázků, jako jsou obr. 1a–c, pro všechna tři tělesa k porovnání naleznete v [1].

Náš postup v [1] je typickou ukázkou dálkového průzkumu bez nutnosti geologických prací. Byl opakovaně vyzkoušen pro Zemi, Měsíc i Mars. Může být použit v přípravné fázi spolu s dalšími výsledky jiných výzkumníků k výběru vhodných míst pro lidské posádky na Měsíci. Zpočátku to bude v jižní polární oblasti, jak bylo rozhodnuto podle kritérií NASA z r. 2022 (Artemis III). Ta místa vycházejí i nám [3]. Přítomnost dostupné a upravitelné podpovrchové vody by byla úlevou pro provoz budoucích misí s trvalou lid-

skou posádkou. Ve vzdálenější budoucnosti může voda být i součástí na místě vyráběného paliva (po rozkladu na vodík a kyslík).

Literatura⁴

- [1] J. Kostecký, J. Klokočník, A. Bezděk: Polar caps on the Moon. *Astrophysics and Space Sci.* **370**, 67 (2025). Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10509-025-04457-0>.
- [2] NASA releases: NASA identifies candidate regions for landing next Americans on Moon. *NASA Release 22-089*, 2022.
- [3] J. Klokočník, J. Kostecký, A. Bezděk: Groundwater at the Southern Pole of the Moon via the Gravity Strike Angles: IM-1 and Artemis. *Planetary and Space Sci.* **256**, 106037 (2025). Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2025.106037>.
- [4] C. I. Honniball et al.: Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA. *Nature Astronomy* **5**, 121–127 (2021). Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41550-020-01222-x>.
- [5] NASA: Artemis plan. *NASA’s Lunar Exploration Program Overview* 2020.
- [6] J. Klokočník et al.: *Atlas of the Gravity and Magnetic Fields of the Moon*. Springer Geophysics, eBook 2022. ISBN 978-3-031-08867-4, series ISSN 2364-9119; series E-ISSN 2364-9127. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-08867-4>.
- [7] J. Klokočník et al.: Gravity strike angles to study geological features on the Earth. *Acta Geodyn. Geomater.* **22** (2), 151–182 (2025). Dostupné z: <https://doi.org/10.13168/AGG.2025.0011>.
- [8] F. G. Lemoine et al.: GRGM900C, a degree 900 lunar gravity model from GRAIL primary and extended mission data. *Geophys. Res. Letts.* **41**, 3382–3389 (2014). Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2014GL060027>.
- [9] J. Klokočník et al.: Gravity aspects for Mars. *Icarus* **406**, 115729 (2023). Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115729>.
- [10] L. Tu, W. H. Ip, Y. C. Wang: A Sublimation-driven Exospheric Model of Ceres. *Planet Space Sci.* **104**, 157–162 (2014). Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2014.09.002>.

4 Další zdroje: Teorie: https://www.asu.cas.cz/~jklokocn/MOON25_supplements. Další práce: <https://www.asu.cas.cz/~jklokocn>. Animace: A. Bezděk, J. Sebera: MATLAB script for 3D visualizing geodata on a rotating globe. *Comp. & Geosci.* **56**, 127–130 (2013). Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2013.03.007> a https://www.asu.cas.cz/~bezdek/vyzkum/rotating_3d_globe/.