

Évszakos jégsapka peremének vizsgálata a Mars déli féltekéjén

Gergácza Mira Anna^{1,2}

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

²ELKH CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

A Marson kulcskérdés a víz mai előfordulási esélyének, lehetőségnek a megértése. Ez vizsgálható a tavaszi jégfoltok elemzésével a bolygó déli féltekéjén, melyek a pólussapka visszahúzódása nyomán visszamaradtak, és idővel az erősödő besugárzás révén nem kizárható, hogy területükön a cseppfolyós fázis is megjelenik. A megvizsgált 110 képből az látszik, hogy kisebb jégfoltok leggyakrabban a -40° és -50° szélesség között helyezkednek el 150° – 180° tartományban. Méretük 1,5 métertől egészen 300 méterig terjedhet és a jég jellemzően 19–133 marsi napig marad meg.

BEVEZETÉS

Mivel a Mars légkörének és felszíni törmelékta karójának kicsi a hővezető képessége [1,2], ezért a zsugorodó pólussapka visszahúzódása után is maradhatnak kisebb jégfoltok [3] a felszínen ott, ahol gyenge megvilágítást kaptak, például lejtőszögön vagy árnyékoló felszínformáknál. Az ilyen területeket is eléri nyáron a napfény, ilyenkor a jég gyorsan melegedhet – egyelőre nem tudni, hogy ekkor megjelenhet-e esetleg cseppfolyós fázis [3,4] vagy sem, ami az élet lehetőségé szempontjából is fontos kérdés [5–7].

MUNKAMÓDSZEREK

A kutatás keretében a Mars déli féltekéjén az évszakos pólussapka visszahúzódása után megmaradt jégfoltokat azonosítottam a Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) űrszonda optikai felvételein, amelyek a JMars szoftverrel kereshetőek a -40° és -70° szélesség, valamint a Nap 140° és 200° ekliptikai hosszúsága között (*solar longitude*, Ls: a Mars–Nap szög az északi tavaszi napéjegylenlősegtől számítva, amikor Ls=0°; értéke a marsfelszíni évszakokra jellemző). A képeken látható alakzatok kinézete szemmel, szakirodalmi publikációk alapján jellemezhető, s a felvételek kategóriálhatóak visszamaradt jégfoltot tartalmazó és anélküli képekre. Előfordulásuk és jellemzőik statisztikailag vizsgálhatóak.

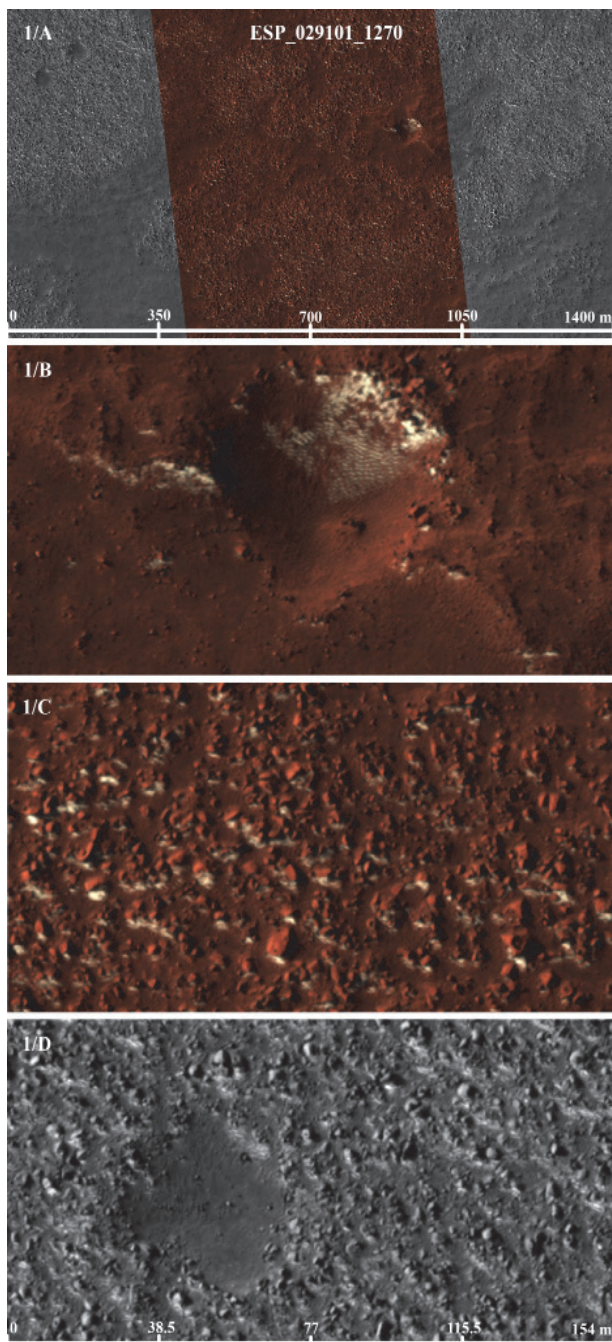
EREDMÉNYEK

A kutatás során a rendelkezésre álló, keresési paramétereknek megfelelő nagyjából 1400 képből 110 került elemzésre, ebből 37-en mutatkozott jégfolt, azonban az adatbázis bővülőben van. Kezdesnek minden világos folt a potenciális jég kategóriába került, több tucat kép vizsgálata után azonban pontosabb kritériumok fogalmazódtak meg, ennek megfelelően nem tekintendő kissebb jégfoltoknak a

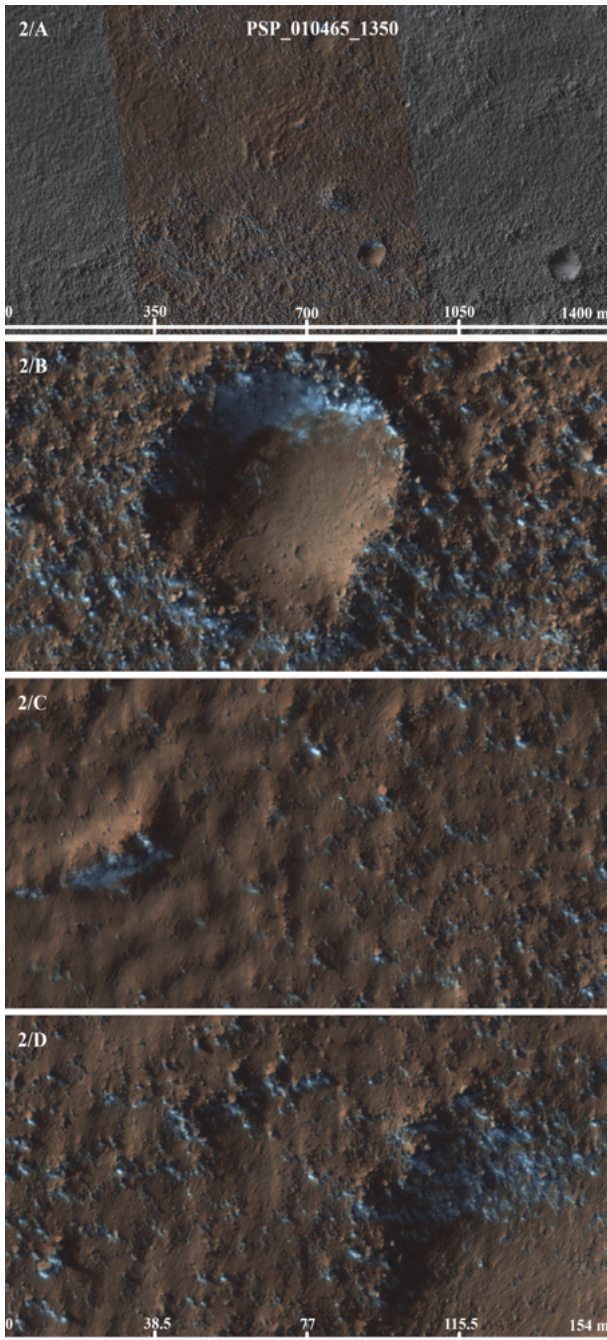
világos sziklák (árnyéket vetnek, illetve néha világos folt látható a déli oldalukon), emellett a felhők és a kiterjedt porborítások (világos foltok) diffúz peremük alapján jelentősen elütnek a kisebb jégfoltoktól.

Az eredmények azt mutatják, hogy a jégfoltok optikai megjelenés alapján elkülöníthetők az egyéb világos alakzatoktól, mint például a szikláktól és kiterjedt felhőktől. A vízjég jelenlétének bizonyítása közvetlenül egyelőre nem lehetséges. További kérdés, hogy a jégfoltok vízjégből vagy szén-dioxid jégből állnak-e. Erre egyelőre nincs pontos válasz, s mivel a szén-dioxid jég sokkal alacsonyabb hőmérsékleten szublimál (nyomástól függően kb. 140 K [8]), mint a vízjég (páratartalomtól függően 240–220 K a Marson), az alábbiakban azonosított jégfoltok feltehetőleg főleg vízjégből állnak, de ennek eldöntése a kutatás következő lépése lesz. A színes IRB és RGB HiRISE (*MRO High Resolution Imaging Science Experiment*) képeken a jég környezeténél jelentősen világosabb, „hideg árnyalatú”, jellemzően kékes-fehéres folt, míg a világos kőzetek általában sárgás árnyalatúak. A jég jellemzően követi az árnyékoló felszíni formát, pontosabban annak árnyékát.

Dimbes-dombos helyeken és sziklamezőkön sok jégfolt fordul elő, míg sík terepen inkább csak egy-kettő, azok is laposabb mélyedések ol-



1. ábra: Jégfoltok az ESP_029101_1270 HiRISE képen (1/A) és példák a kinagyított jeges területekre (1/B, 1/C, 1/D). Képközép koordinátái: $-52,617^{\circ}$ szélesség, $113,6^{\circ}$ hosszúság, $L_s=186,477^{\circ}$



2. ábra: Jégfoltok a PSP_010465_1350 HiRISE képen (2/A) és példák a kinagyított jeges területekre (2/B, 2/C, 2/D). Képközép koordinátái: $-44,874^{\circ}$ szélesség, $213,4^{\circ}$ hosszúság, $L_s=144,419^{\circ}$

dalában vagy repedésekben. A jég mindig az árnyékoló domborzati formák árnyoldalán van (jelen esetben a déli pólus felőli oldalon).

A jégfoltok átmérője a képeken 5 pixel és 1000 pixel (azaz 1,5 m és kb. 300 m) között mozog, azonban míg a kisebb átmérőjűek jellemzően oválisak, a nagyobbak inkább elnyúltak. Ha a foltnak nincs éles határa, az akár köd vagy felhő is lehet, emellett a jégfoltok nem vetnek árnyékot, mivel a marsi légkörből kiváló H_2O mennyiség ehhez túl kevés (gyakran látni olyan világos foltokat melyek kicsi árnyékot vetnek, ezek sziklák lehetnek, amelyek odafigyeléssel kiszűrhetőek). A legtöbb megfelelő kép -40° és -50° marsrajzi szélesség között található, rajtuk kisebb jég $L_s=150-180^{\circ}$ évszakos fázis között figyelhető meg – ekkor húzódik vissza ebből a szélességi zónából az évszakos jégsapka.

A kiválasztási kritériumoknak megfelelnek az 1. és 2. ábrán látható világos foltok, mindegyik rendre az árnyékoló felszínformák déli pólus felőli oldalán van és nem vetnek árnyékot. Jellegzetes foltokat látni 2/B képen, kráterek árnyékos oldalán gyakran találni a kritériumoknak megfelelő világos foltot. Sokszor ilyen helyen maradnak meg a legtovább a foltok a pólussapka elhúzódása után.

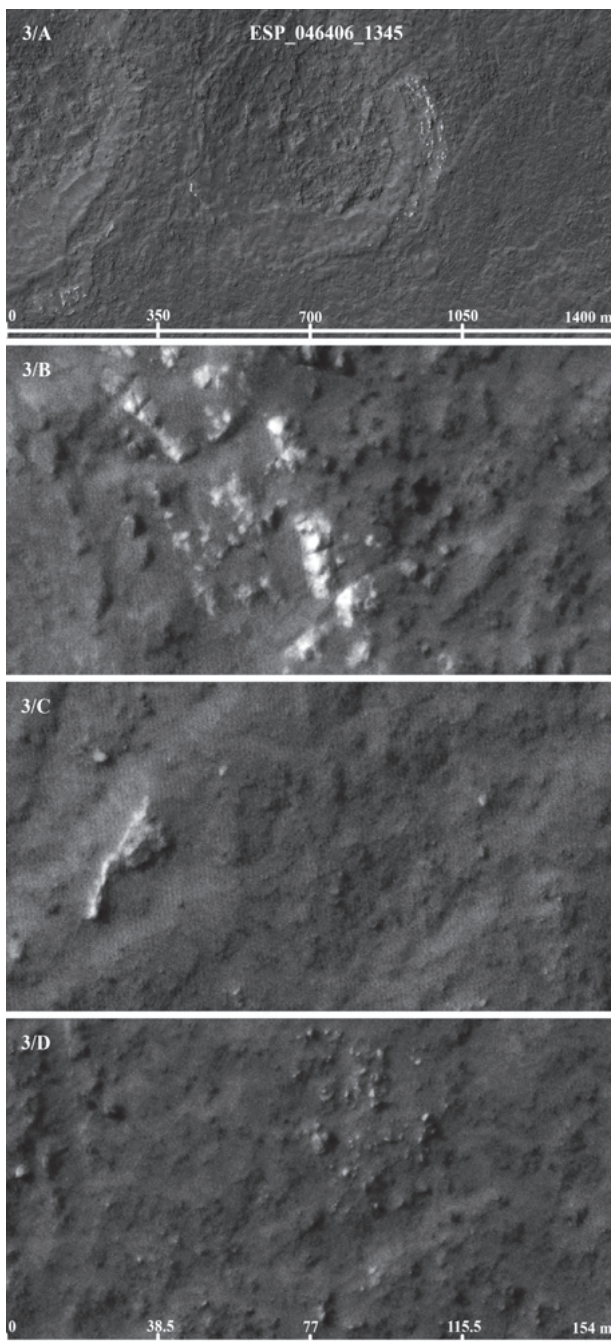
Világos foltok az 1/D képen is megfigyelhetők, azonban ezek

a foltok kevésbé ütnek el a környezettől, így gondolhatnánk akár világosabb árnyalatú homoknak is. A környező, jégnek azonosított foltokból azonban következtethetünk arra, hogy itt is jég az, amit látunk, azonban sok helyen nem látni árnyékoló felszíninformát, amely védelmet biztosítana a besugárzástól. Ezek alapján nem lehetünk biztosak a foltok jegességében. Ebből is látszik, hogy sokat segít a beazonosításban a színinformáció.

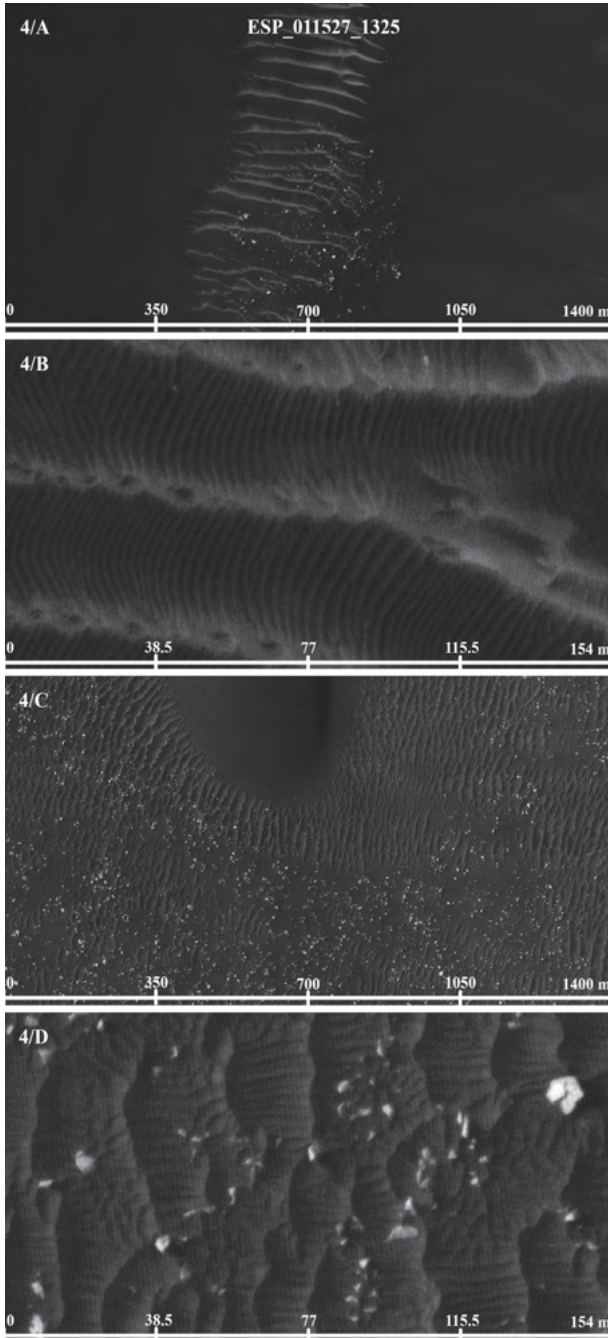
ELLENPÉLDÁK

Ha megnézzük a 3. ábrát, akkor láthatjuk, hogy bár apró fehér foltok vannak a képen, azok mind a kiemelkedések napsütötte oldalán helyezkednek el. A 3/B és 3/C képeken éles és kontrasztos a határuk, valamint 3/B-n és 3/D-n kicsi árnyékot is vetnek. Ezek alapján a foltok kőzetblokknak minősülnek.

A 4. ábra első áttekintő képén (4/A) hullámfodros felszínt látni, a domborzati formán világos foltokat. Elsőre gondolhatnánk, hogy jeget látunk, hiszen a folt követi a fodrokat, azonban ha jobban megvizsgáljuk (4/B), akkor látni, hogy a foltok a napsütötte oldalon helyezkednek el, valamint a foltok meglehetősen diffúzak. Így kizárhatjuk a jég jelenlétét. Valószínűleg azért világos ott a felszín, mert megvilágítja a homokot a fény. A



3. ábra: Példák világos kőzettömbökre az ESP_046406_1345 HiRISE képen és kinagyított részletein (9/A, 9/B, 9/C, 9/D). Képközép koordinátái: $-45,124^{\circ}$ szélesség, $357,75^{\circ}$ hosszúság, $L_s=172,084^{\circ}$



4. ábra: ESP_011527_1325 HiRISE kép (10/A, 10/C) és részletei (10/B és 10/D). Képközép koordinátái: $-47,232^{\circ}$ szélesség, $19,478^{\circ}$ hosszúság, $L_s=189,102^{\circ}$

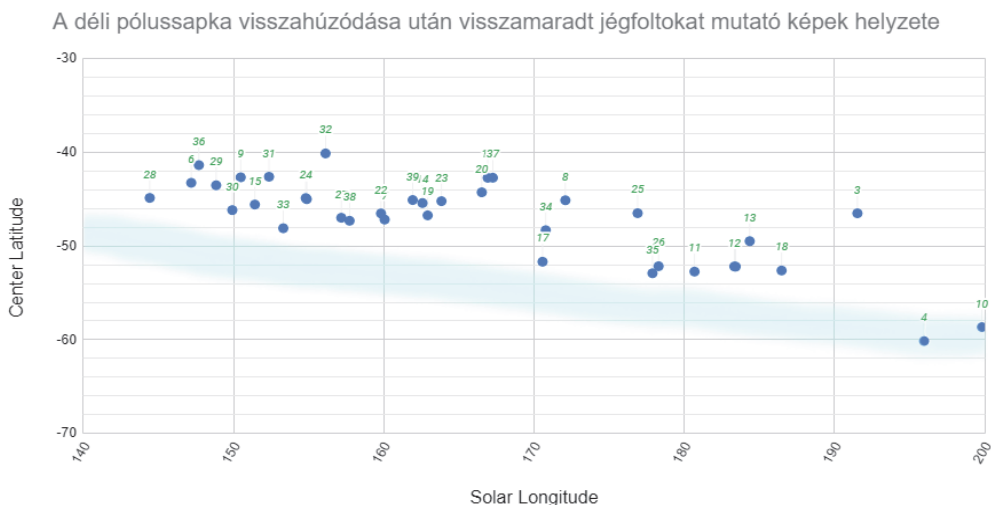
képen kisebb, hullámfodroknak nevezett szélformát látni.

A második áttekintő képen (4/C) árnyékban elhelyezkedő, vagy akár szikla-szerű, kisebb jégfoltokat láthatnánk. Azonban nem követik az árnyékoló domborzati formát, tehát nem elnyúlt alakjuk van, mint a domborzati egyenlenségnek, amelyek védhetik a foltokat a napfénytől. Ha jobban megvizsgáljuk a képet, akkor látni, hogy a világos foltok árnyékot vetnek, napsütötte oldalon vannak és néhol ki is lógnak a homokból. Ezek alapján világos sziklákat látunk, nem jeget.

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A Mars déli féltekéjén az évszakos pólussapka visszahúzódása után visszamaradó jégfoltok azonosíthatóak a HiRISE felvételek alapján. A jég szinte mindig árnyékoló formák pólus felőli oldalában figyelhető meg. Az azonosítást segíti, ha RGB felvételt vizsgálunk, ugyanis a folt árnyalata is fontos információ.

Az 5. ábra a kiválasztási kritériumoknak megfelelő foltokat mutató képek marsrajzi szélességét ábrázolja a kép készítése idejének függvényében. Az idő balról jobbra halad az ábrán, a déli pólussapka pereme pedig ennek megfelelően lefelé (a déli pólus felé) húzódik, amelyet diffúz kék sáv jelez. Az így



5. ábra: A kritériumoknak megfelelő képek (a grafikonon kék pontok) követik a visszahúzódó szén-dioxid-jégsapka szélesség szerint átlagolt TES (Thermal Emission Spectrometer) ún. Crocus vonalát (világoskék sáv) [9]

kapott ábra szépen mutatja, hogy a kérdéses jégfoltok a Mars déli szén-dioxid-jégének évszakos visszahúzódása után maradtak vissza [9].

Az 5. ábrán látszik, hogy a pontok kis lemaradással követik a szélességi fok szerint átlagolt TES Crocus vonalat (azon hideg környezet határát, amin még létezhet szén-dioxid-jég). Mindezek alapján kb. 10–70 Ls (azaz 19–133 marsi nap) időtartamon keresztül maradhatnak vissza jégfoltok vizsgált területeken.

A kutatás keretében a következő lépésben a Mars Odyssey THEMIS (Thermal Emission Imaging System) felvételek alapján vizsgáljuk a megfigyelt foltok helyén és idején jellemző hőmérsékletet [10], ami segíthet a szén-dioxid-jégből és a vízjégből álló foltok elkülönítésében. Néhány megfigyelés alapján [11] ugyanis nem lehetetlen, hogy szén-dioxid-jégből álló foltok viszonylag alacsony szélességen, a pólussapka visszahúzódása után is előfordulhatnak. Ezt követően éghajlati modellek eredményeivel [12] lehet összehasonlítani azonosított foltok előfordulási viszonyait.

Amennyiben a fenti lépések is megtörténtek, és mind szén-dioxid-, valamint vízjegek is előfordulnak az azonosított foltok esetében, CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) felvételek alapján a két jégtípus [13] elméletileg elkülöníthető egymástól.

A fentiekben bemutatott visszamaradó jégfoltok fontos célpontok lehetnek a következő keringő egy-egy számára, továbbá a helyszíni kutatómunka tervezésében is számíthat az ilyen jégfoltok előfordulása [14, 15]. Emellett a vizsgálat segíthet a bolygó fejlődéstörténete jeges vonatkozásainak tisztázásában [16–19]. Magának az esetleges cseppfolyós fázisnak az azonosítása nehéz feladat, de további célzott mérések révén, ha rendszeresen víz jelenne meg ezeken a helyszíneken, akkor ennek esetleges kémiai következményei is elemezhetőek lennének, valamint a jég előfordulásával kapcsolatos légköri paraméterek becslése is pontosítható [20].

Irodalomjegyzék

- [1] Grott M. (2021): Thermal Conductivity of the Martian Soil at the InSight Landing Site From HP3 Active Heating Experiments. *Journal of Geophysical Research*, 126, E006861
- [2] Kereszturi Á. (2012): Mars – fehér könyv a vörös bolygóról. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest
- [3] Langevin Y. et al. (2009): Investigations of selected areas of the south seasonal cap of Mars in early 2009. *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU2009-8148
- [4] Pál B., Kereszturi Á. (2017): Possibility of microscopic liquid water formation at landing sites on Mars and their observational potential. *Icarus*, 282, 84
- [5] de Vera J.-P. et al. (2014): Results on the survival of cryptobiotic cyanobacteria samples after exposure to Mars-like environmental conditions. *International Journal of Astrobiology*, 13, 35
- [6] Marschall M. et al. (2012): Migrating and UV screening subsurface zone on Mars as target for the analysis of photosynthetic life and astrobiology. *Planetary and Space Science*, 71, 146
- [7] Horváth A. et al. (2009): Analysis of Dark Albedo Features on a Southern Polar Dune Field of Mars. *Astrobiology*, 9, 90
- [8] Kelly N.J. et al. (2006): Seasonal polar carbon dioxide frost on Mars: CO₂ mass and columnar thickness distribution, *Journal of Geophysical Research*, 111, E03S07
- [9] Frédéric S. et al. (2009): Albedo control of seasonal South Polar cap recession on Mars. *Icarus*, 200, 374
- [10] Ahern A.A. et al. (2021): Thermophysical Properties and Surface Heterogeneity of Landing Sites on Mars From Overlapping Thermal Emission Imaging System (THEMIS) Observations. *Journal of Geophysical Research*, 126, E006713
- [11] Piqueux S. et al. (2016): Discovery of a widespread low-latitude diurnal CO₂ frost cycle on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 121, 1174
- [12] Giuranna M. et al. (2019): The current weather and climate of Mars: 12 years of atmospheric monitoring by the Planetary Fourier Spectrometer on Mars Express. *Icarus*, 353, 113406
- [13] Brown A.J. et al. (2014): Interannual observations and quantification of summertime H₂O ice deposition on the Martian CO₂ ice south polar cap. *Earth and Planetary Science Letters*, 405, 102
- [14] Orgel Cs. et al. (2014): Scientific Results and Lessons Learned from an Integrated Crewed Mars Exploration Simulation at the Rio Tinto Mars Analogue Site. *Acta Astronautica*, 94, 736
- [15] Kereszturi Á. (2011): Geologic field work on Mars: distance and time issues during surface exploration. *Acta Astronautica*, 68, 1686
- [16] Nagy B. et al. (2020): The Thermal Behavior of Ice-Bearing Ground. *Astrobiology*, 20, 701
- [17] Séjourné A. et al. (2018): Grid-mapping the northern plains of Mars: using morphotype and distribution of ice-related landforms to understand multiple ice-rich deposits in Utopia Planitia. *Journal of Geophysical Research*, 124, 483
- [18] Orgel Cs. et al. (2018): Gridmapping the Northern Plains of Mars: A New Overview of Recent Water- and Ice-Related Landforms in Acidalia Planitia. *Journal of Geophysical Research*, 124, 454
- [19] Changela H. et al. (2021): Mars: New insights and unresolved questions. *International Journal of Astrobiology*, 20, 394
- [20] Pál B. et al. (2019): Global seasonal variations of the near-surface relative humidity levels on present-day Mars. *Icarus*, 333, 481