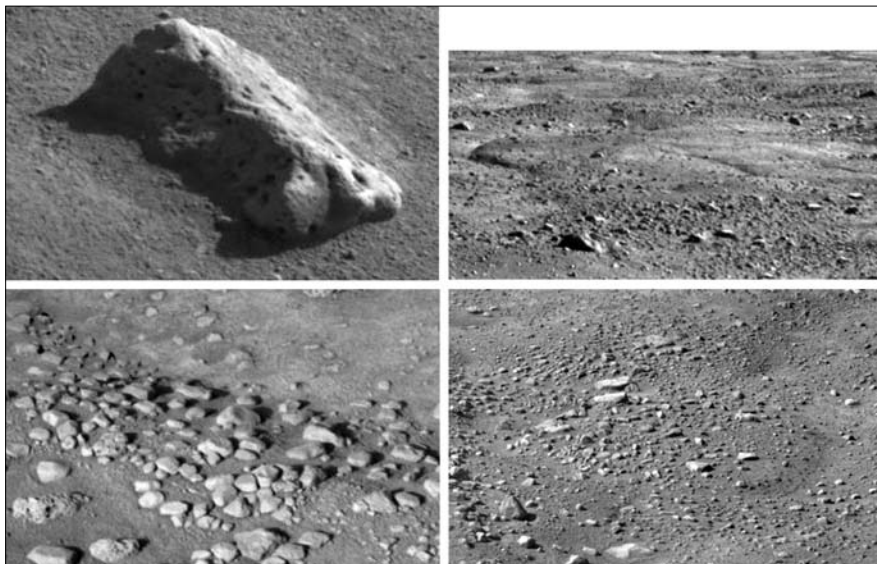


Havas nyár a Marson

A Mars északi sarkvidékén landolt Phoenix-szondáról a Meteor 2008/9. számában adtunk áttekintést. Az alábbiakban az öthónapos üzemelés befejezése óta napvilágot látott eredményeket vesszük sorra. A szonda 2008. május 25-én szállt le a Mars az é.sz. 68,22 és k.h. 234,3 fokánál lévő -4,1 km-es magasságú, az északi pólusapka körüli síkágón, amit csak télen borít jégtakaró. A felszínt a Scandia Formáció takarja, amely a közeli Alba Patera vulkán kitérőseinek porából, vagy a pólus körül lerakódó jég és por keverékéből áll. A Mars Reconnaissance Orbiter-űrszonda a magasból megörökítette az ereszkedő szondát és a róla levált hővédőpajzsot, valamint a becsapódott részeket is, emellett azonosította a fékezőhajtóműtől elszíneződött területet, ahonnan néhány centiméter vastag réteget lefújt a landolás végén.

A Phoenix fontos feladata volt a felszín alatti részek feltárása. Ennek során összesen 12 ásásnyomot mélyített a felszínbe, a poligonok közepétől (Snow White) az őket elválasztó peremi árkokig (Stone Soup). Az ásás a peremi ároknál volt a legkönnyebb, a poligonok közepén pedig a legnehezebb. A Phoenix közel 25 ezer fotót sugárzott a Földre, amelyek között szeptember 16-án, a küldetés 111. marsi napján azonosították a szondától 300 méterre becsapódott hővédőpajzsot, amely egyszer felpattant becsapódása után.

A leszállóhelyen viszonylag kevés szikladarab volt – noha a területtől 20 kilométerre északkeletre található 10 kilométeres Heimdal-kráterből kibottott sötét anyag is előfordult a vidéken. A felvételeken egy méternél nagyobb szikla nem látszott, a kódarabok néhány centiméteresek, és álta-



Felszíni részletek: egy lilacsos kódarab (balra fent), egy poligon közepét átszelő újabb repedés (jobbra fent), egy poligon árkaiban felhalmozódó kódarabok sávja (balra lent) és egy ellenpélda: kódarabokban szegény árok

lában likacsosak voltak. A felszín 1,5–2,5 méteres sokszögletű, ún. poligonális alakzatok szabdalták, amelyek közötti árkok 1–20 cm mélyek voltak. Mélységük és lejtőik szöge nem mutatott kapcsolatot a napsütésnek való kitettséggel, feltehetőleg eltérő fejlődési állapotot képviseltek. Több kódarab mutatkozott a poligonok peremi mélyedéseiben, mint átlagosan, a poligonális mintázat mélyebb peremi árkait néhol kisebb árkok keresztették.

A törmeléktakaróban a legtöbb szemcse 10 mikrométernél kisebb vöröses porszem volt. Gyakoriak voltak még a 20 és 100 mikrométer közötti fekete köztetszilánkok, amelyek magnetitkristályok lehettek, és koptatott megjelenésük alapján a szél szállította őket. A legkisebb szemcséket a karbonátok és a közel 1% arányban jelenlévő sók cementálhattak legfeljebb néhány cm-es vöröses tömbökké. A szonda üde olivinkristályokat és mállott vas-oxid-tartalmú ásványokat talált, a törmeléktakaró részei tehát eltérő körülmények között keletkeztek, majd összekeveredtek. A regolit felső és laza rétegéből származó mintákban nem mutatkozott vízjég, de néhol kevés jég vagy szulfátsók rögökké cementáltak azt, és a kivett anyag kis része a mintavevő kanál falához tapadt.

Agyakok, karbonátok, oxidánsok

A regolitban sikerült a perklorát nevű anyagot kimutatni, amelyben a perklorát ionhoz (ClO^+) feltehetőleg magnézium ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$) avagy kalcium ($\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$) kapcsolódott, és 1 tömegszázalék koncentrációban volt jelen. Az összetevő egy agresszív folyadékból, a perklorátsavból (HOClO_3) kivált só. Az anyagot a Dodo–Goldilocks-árok mintáján 2008. június 25-én, a küldetés 30. marsi napján, a Snow White mélyedés mintájában július 6-án, a 41. marsi napon azonosították a MECA berendezéssel. A bennük lévő klór vulkáni eredetű lehet, és a molekulák légköri elektromos folyamatok, avagy gázok, esetleg gáz és szilárd felületek reakciói során keletkeztek. A perklorát vízben lebomlik, a Földön csak extrém száraz helyeken, például az Atacama-

svatagban fordul elő, de ott is a marsinál sokkal kisebb koncentrációban.

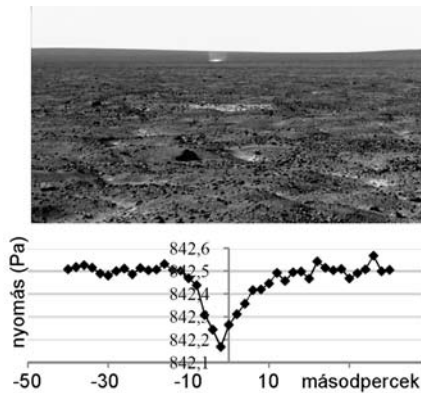
Később a TEGA detektorral is azonosítottak perklorátokból felszabaduló oxigént, ám a klórgáznak nem akadt nyomára. Bár egyes rakéta-hajtóanyagokban is használnak perklorátot, de a Phoenixnél nem ez volt a helyzet, így nem a szonda lehetett a forrás. A marstalajban legfeljebb 1% arányban volt perklorát, koncentrációja nem változott a mélységgel. Erős oxidánsként lebontja a szerves molekulákat, de erre hidegben alig kerül sor. Vízrel alkotott keveréke alacsony hőmérsékleten fagy meg, a légköri vízpárát erősen megköti, és víz jelenlétében oxigént ad le. Azonosították még a klorid (Cl^-), a bikarbonát (HCO_3^-) és a szulfát (SO_4^{2-}), továbbá K^+ , Mg^+ , Na^+ , Ca^{2+} ionokat. A Marson elterjedtek a szulfát (SO_4) tartalmú ásványok, de a Phoenix leszállóhelyén nem sikerült pontosan egyetlen szulfátásványt sem azonosítani. Itt kevesebb volt belőlük, mint a többi leszállóhelynél mért 5 és 9% közötti érték. A megfigyelt sók nem alkottak külön réteget. Szerves anyag nem mutatkozott a mintákban, ha volt is, az a melegítés során egyre agresszívebbé váló perklorátok miatt lebomolhatott, miközben szén-dioxidot adott le.

A minták melegítésekor a TEGA detektorokban hő felvételével járó csúcs mutatkozott 725 és 820 °C között, amely a regolitban 5 tömegszázalékban lévő kalcium-karbonátok jellegzetes következménye. 860 és 980 °C között is maximum mutatkozott, de ennek eredete egyelőre ismeretlen. A felszabadult szén-dioxid 400 és 680 °C között vas- és magnézium-karbonát ásványok felületén megtapadt szén-dioxidból származhatott, de akár szerves anyagnak a perkloráttól bekövetkezett lebomlásával is keletkezhetett.

A mintákból létrehozott oldatok kémhatása semlegeshez közeli, pH=7,7 körül alakult, és alig változott további reagensek hozzáadásával. Az oldatot feltehetőleg karbonátok pufferolták (tartották állandó kémhatású újabb reagensek hozzáadásá ellenére), és a közel 5 centiméter mélységig vett minták egymáshoz képest nem mutattak észrevehető eltérést.

Porördögök és havazás

A meteorológiai állomás a landolás után 18 órával kezdte meg méréseit. A hőmérséklet általában -80 és -30 $^{\circ}\text{C}$ között változott, a légnyomás pedig 8,55 millibar körül alakult (ugyanaz a Földön a tengerszinten 1024 millibar). A nappali szélsősebesség néha elérte a 12 m/s-ot, éjszaka max. 4 m/s volt, az égbolt a küldetés első felében felhőmentesnek mutatkozott. Érdekes módon nem voltak dűnék a területen, bár hozzájuk való alapanyag, és a szemcsék mozgatásához szükséges szélsősebesség előfordulhat alkalmanként.



Egy porördög képe (fent) és egy másik porördöghöz kapcsolódó nyomásgörbe a 13. marsi napról (lent)

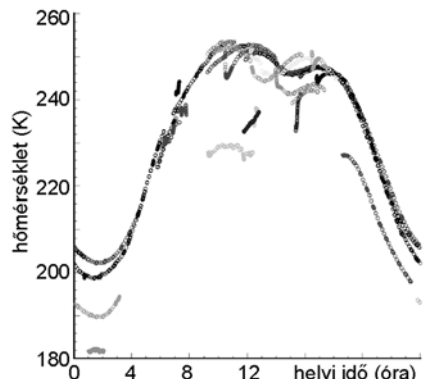
Porördögök helyi időben dél és délután 15 óra között jelentkeztek, a küldetés előrehaladtával egyre nagyobb számban, amint az ősz közeledtével turbulensebbé vált a légkör. A porördögök általában 15–20 másodperc hosszú 0,02–0,03 millibar mértékű nyomáscsökkenéssel, és alkalmanként akár 10 fokok gyors melegedéssel jártak. A 0,15 és 1 m közötti átmérőjű örvényekben kb. 6 m/s volt a maximális szélsősebesség, és naponta közel 10 ilyen járt a Phoenix környékén. A felvételeken 37 porördögöt sikerült biztosan, és 11-et bizonytalanul megörökíteni.

A felhőket 50–120 mikrométeres jégkristályok alkották, és leginkább a földi magasszintű fátyfelhőkre, avagy cirruszokra hasonlítottak. A nyári napforduló környékén alig fordult elő néhány felhő (ezek mintegy

10 km magasan lebegtek). Közel 50 marsi nappal a helyi napforduló után már minden éjszaka annyira lehűlt a légkör, hogy a sötétben állandóak lettek a magasszintű felhők, amelyek reggelig kitartottak. Később a hőmérséklet további csökkenésével párhuzamosan egyre alacsonyabban jelentek meg a felhők, süllyedésüket 4 km-ig sikerült követni, miközben a hűvös éjszakákon közvetlenül a felszín felett, kb. 700 m magasságig feljutó köd is rendszeressé vált.

A felhők az úgynevezett planetáris határreteg tetején keletkeztek. Ez a légkörnek az alsó rétege, amely hőmérséklet és áramlások szempontjából szoros kapcsolatban áll a felszínnel. Amint a Nap délelőtt magasra emelkedik, az éjszaka kifagyott vízjég elszublimált. Ez a küldetés vége felé egyre lassabb lett, és idővel a fagytakaró nappal is megmaradt a területen, a polygonok közötti mélyedésekből tűnt el leglassabban.

A lézeres radar (LIDAR) megfigyelései alapján hópelyhek vagy jégkristályok hullottak a felhőkből éjszaka, amelyek eleinte esés közben elszublimáltak, de a hűlő idővel párhuzamosan egyre mélyebbre jutottak, majd a küldetés 109. napjától már el is érték a felszínt. A felhőkből főleg az éjszaka második felében és a küldetés vége felé hullott csapadék. A lehulló kristályok mellett az éjszakai ködből is csapódott ki H_2O a felszínre.



Napi hőmérsékleti értékek a regolítban a 46. és a 149. marsi nap közötti intervallumról

A nappal felmelegedő felszínről a jég elszublimált, a felerősödő turbulenciák pedig átkeverték az alsó réteget, egyenletesen elosztva benne a vízgőzt és a felkapott port. A határreteg tetején a hőmérséklet lecsökkent, és a vízpára jégkristályokként kivált, felhőket alkotva, amelyekből éjszaka hó hullott. A légkör relatív nedvességtartalma a nap közepén, a legmelegebb időszakban volt a legalacsonyabb, ekkor 5% körül alakult. A planetáris határretegben lévő vízmennyiség pedig összesen kb. 40 mikrométer egyenérték lehetett – azaz ilyen vékony réteget alkotna, ha folyékony formában az egész Mars felszínén egyenletesen kiválna.

A légköri szén-dioxid izotópos vizsgálata alapján a nehezebb ^{13}C izotóp nem dúsul olyan erősen a légkörben, mint a marsmeteoritokban. A Phoenix által meghatározott koncentrációk $^{13/12}\text{C}=0,0110$ és $^{18/16}\text{O}=0,00205$ voltak. Ez megerősíti a Viking-űrszondák korábbi eredményeit, amely szerint a légköri szén-dioxid cserélődik a felszín alatti kötött formában tárolt gázzal, ezért nem mutat izotópdúsulást.

Jég egy arasznyi mélyen

A robotkarral végzett ásások során a felszín alatt 1,6–16 cm-rel (átlagosan 6–7 cm-rel) jég cementálta a szemcséket. A kiemelt mintákban lévő jég egy részét a robotkar néhol (pl. Dodo–Goldilock ásásnyom) szétkenete a mélyedés falán, ami onnan jórészt elszublimált, és utána alig maradt valami vissza. A keményebb és mélyebben lévő anyagból származó mintákban sikerült a H_2O -t kimutatni. A becslések alapján az ásásnyomok és a szonda alatt kibukkanó jégből a két hónap során kb. milliméter vastag réteg szublimált el. A leszállóhajtómű anyagsugara által a Phoenix alatt „kihantolt” jégfelületen 23 marsi nappal annak felfedezése után hőtágulásos repedések jelentek meg, majd a H_2O vesztes nyomán a küldetés kb. 73. napjára a környező regolithoz hasonlóra sötétedett.

A TEGA detektorban hevített mintából H_2O -molekulák két szakaszban szabadultak fel: 295 és 735 °C között oxihidroxidok-

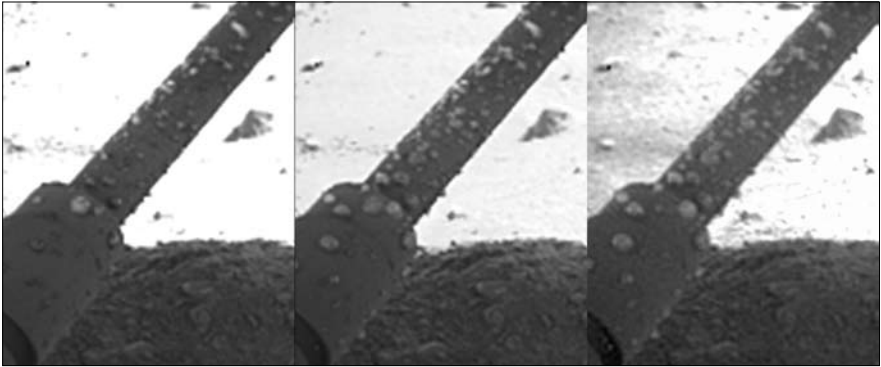
ból (pl. goethit), szmektitból, kaolinitból, vas- és magnézium szulfátokból (pl. jarosit, kieserit), ezek vizes környezetben lezajlott mállással keletkezhetnek. A 735 °C felett felszabadult H_2O -molekulák szmektit-, talk-, klorit-, szerpentin- és amfibol ásványokból származhattak, amelyek már főleg a lávából történő megszilárdulás utolsó fázisában jöttek létre, és később alig változtak.

Már alacsony hőmérsékleten is kellett volna felszabadulnia H_2O -nak a felszínhez közeli mintákból, de a vizsgált szemcsék felületén nem volt gyengén megkötött H_2O -réteg. Ilyen gyengén kötött H_2O jelenlétére csak az ásásnyom aljáról származó, keményebb minta utalt, amelyből a vízgőz mínusz 2 °C-on kezdett felszabadulni, és a legtöbb belőle plusz 6 °C-on távozott el.

Vízcseppek a lábakon

A perklorátok egészen –68 °C-ig csökkentetik a víz fagyáspontját. Egy magnézium-perklorát molekulához maximálisan 8 vízmolekula kapcsolódhat, az így keletkező sóoldat sűrűsége 1,7 g/cm³. A leszállólábakon néhány világos folt jellegű, milliméteres illetve centiméteres alakzat mutatkozott. Egyesek kerekded alakúak voltak, és a „bennük” látható sötét vonalas szerkezet a szonda alsó részének és lábainak a tükröződése is lehet – de sajnos a képek felbontása nem volt elegendő ennek megállapításához. Idővel egyes cseppek növekedni látszóttak, összeolvadtak, talán egyre több H_2O -t kötöttek magukhoz a légkörből. De sok szakember nem lát elég bizonyítékot arra, hogy folyékony víz alkotta őket, és szerintük a rájuk kifagyó újabb jégrétegek miatt növekedtek.

A földi labormérések alapján a Phoenix leszállóhajtóműve a felszín legfelső 1–2 milliméter vékony rétegét olvaszthatta meg. A landoláskor szétrepülő nedves csomók egy része pedig rátapadhatott a leszállólábra. Ha ezekben sok perklorát volt, azok olvadt állapotban tarthatták a H_2O molekulákat. A szonda fémfelületei másként viselkedtek a Marson, mint az elszórt szikladarabok. A landolás után viszonylag melegek voltak,



A csepp alakú képződmény változott az idő előre haladtával. A három felvétel a küldetés 8., 31. és 44. marsi napján (sol) készült (NASA/JPL-Caltech/UA/Max Planck)

és hőmérsékletüket később a belső fűtés, valamint az önárnyékolás is befolyásolta. Ha ilyen perklorátok a közeli pólussapka alatt is előfordulnak, a sapka alján folyékony réteget alkotnak, segítve a jég deformációját.

Összefoglalás

A küldetés igazolta a marsi vízjég jelenlétét, a területen a várakozásoknak megfelelően 6–8 centiméter mélyen nyáron is megmarad a vízjég. Bebizonyosodott, hogy a Mars északi sarkvidékén az elmúlt néhány millió évben aktív felszínalakító folyamatok zajlottak a forgástengely változó ferdeségétől előálló besugárzás változásoktól. A térség geológiai időskálán aktív zóna, ahol a változások nyoma a mikroszkopikus ásványátalakulások, és a néhány méteres friss fagyopoligonok képében egyaránt megjelenik.

A szonda öthónapos üzemelése alatt kiderült, hogy a H_2O a légkörből havazás, illetve a ködből kiváló dér formájában tér vissza a felszínre. Itt a hideg évszakban nappal is megmarad, és az évszakos pólussapka alsó, vízjég rétegét alkotja. A felszín alatt, néhány cm mélyen lévő jég szintén a légkörből fagyott ki, az elmúlt néhány millió évben. A mainál melegebb éghajlaton talán meg is olvadhatott, vékony folyadék réteget alkotva, noha sóoldatok létezése ma is elképzelhető.

A mintákban lévő karbonátok és perklorátok vizes közegből válhattak ki, a folya-

dék elszökése és az oldatok betöményedése során, a mainál melegebb időszakokban. Ekkor a szemcséket befedő vékony vízréteg az alacsony hőmérsékleten lassú mállást okozott, és az így oldatba lépett ionokat elszállította, ettől pedig a kőzetszemcsék összetétele változott. A karbonát ilyen melegebb időszakokban keletkezett, a szemcséket övező vékony vízrétegben, ahol a légköri szén-dioxid feloldódott, majd kivált. Egykor tehát folyékony víz is lehetett a sarkvidéken a felszín alatt. A Phoenix leszállóhelye ezért a közelmúltban jobb körülményeket biztosíthatott az esetleges élet számára, mint napjainkban.

A küldetés során mért maximális -40 C° H_2O nem kedvez az aktív életfolyamatoknak. A szonda az élőlényeknek kedvezőtlen agresszív oxidánsokat is talált, de az ide sorolt perklorátok nem minden földi élőlénynek ártalmasak. A mai élet lehetőségével kapcsolatban kedvezőtlenek a kilátások, de a Phoenix nem is zárta ki annak lehetőségét. Elméletileg a most mértéknél lehetnek melegebb helyek is a sarkvidéken, és a szemcsék közötti védett zugokban talán átmenetileg enyhe hőmérsékleten is megmarad egy ideig a sóoldat. A leszállóegységek által eddig meglátogatott helyszínek között a Phoenix landolási helye lehet ma, és lehetett a közelmúltban leginkább kedvező az élet számára.

Kereszturi Ákos