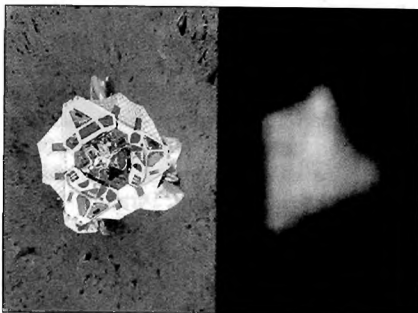


## A golyóbisok bolygója

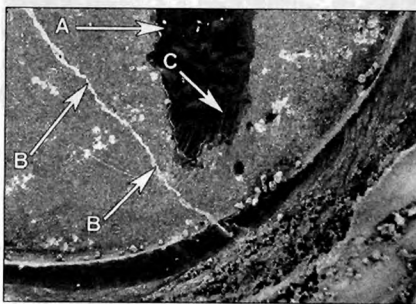
Ahogy egyre jobban megismerjük a Marsot, úgy gyarapszik a bolygó újabb jelzőkkel. Az elmúlt években a „fehér Mars” elmélet lett népszerű, most a MER szondák révén néhányan a „golyóbisok bolygójának” is nevezik a planetát. Az alábbiakban a Meteor 2004/2. számában megjelent összefoglaló óta történt fejleményekről adunk áttekintést. Mivel a két szonda eltérő vidéken landolt, külön-külön mutatjuk be eredményeiket.



Az MGS felvétele a Spiritről 2004.01.19.-én (jobbra) és a leszállóegység mesterségesen rekonstruált felületzeti képe (balra)

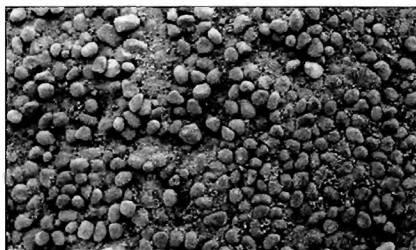
kor folyamatosan nőtt befelé. Míg belső összetétele hasonlít a többi sziklára, külső és fényes borítása különböző volt a többiekétől (kivéve egy Route 66 névre keresztelt darabot). Mindezek együtt arra utalnak, hogy a külső fényes máz a maitól kicsit eltérő éghajlaton keletkezett. A Mazatzal esetében vizes környezetre utalt a rétegzett kéreg és a repedésekben keletkezett ásványok. Ez nem biztos, hogy olyan víz volt, mint ami a Hematit-régióban hullámozott, lehet, hogy csak felszín alatti nedvesség. A külső máz pedig lehet, hogy a légköri hulló porból képződött talán a mainál nedvesebb éghajlaton. A mellékelt képen a fúrás helye látszik: A – a kőzet tisztító működése után visszamaradt külső borítás darabja, C – a kőzet tisztító acélfogainak nyoma, B – a repedés mentén kivált ásvány. Érdekes információ még a bróm és a klór aránya is, amelyek a marsmeteoritokban és a földi tengervízben is jellemző értéket mutatnak. Ez az arány erős párolgástól változhat meg. Hasonló eredményt találtak a Hematit-régióban és a Gusev-kráterben is, de a földinél még erősebb mértékben, tehát az egykori vizes környezet erősen párolgott, és a vízben oldott sók „betöményedtek”.

A Spirit képein a szikladarabok 90%-a sötét, kb. 20%-a likacsos felületű vulkáni kőzet, amelyeket becsapódások repítettek szét. A leszállóhely környékén 200 m-nél kisebb és 15 m-nél sekélyebb kráterek jellemzők. Az elsőként vizsgált, Adirondack névre keresztelt olivinbazalt sziklát (l. Meteor 2004/2 fotómelléklet 9-es kép) kívülről fényes anyag borítja, amely lefelé (a felszínhez közeledve) vastagodni vagy erősödni látszik. Ennek a rétegnek a kén- és klórtartalma kisebb, mint a környező marstalajé. Szintén érdekes külső máz borítja a szél csiszolta, 2 méteres Mazatzal-sziklát. Itt a fúrás alatt először nőtt, majd csökkent a klór és a kén mennyisége. A magnézium-oxid mennyisége ugyanak-



Közelkép a Mazatzalról

Marstalajnak nevezzük a regolit felső rétegét, ez a Gusev-kráterben olivinben gazdag vulkáni kőzetek mállásával keletkezhetett. Összetétele alapján kialakulása óta nem volt tartós vizes környezet a kráterben. A marstalaj két legjellegzetesebb eleme a szilícium és a vas, emellett fontos a klór és a kén, továbbá elsőként észleltek nyomokban cinket és nikkelt. A marstalaj keményebbnek mutatkozott, mint korábban gondolták, szemcséit valószínűleg szulfátok és kloridok cementálják össze. Legfelül finom, a levegőből hullott por takarja. A kövek többségére „rámászik” ez a por, azaz a sziklák idősebbek a por lerakódásánál, de néhány esetben ennek a fordítottja látszott. A legfiatalabb felszínformák a sziklák mögötti szélzászlók (a szél által lerakott finom porból), és a krátereket kitöltő porrétegek. A 200 méteres Bonneville-kráter melletti, Szerpentin névre keresztelt homokdűnébe kb. fél méteres árkot ásott egyik kerekével. A dűne nagy része 50–60 mikrométeres finom szemcsékből áll, a Földön ennél nagyobbak jellemzőek a homokdombokra. A dűne felszínéhez közel egy rétegben 1–2 mm-es golyók is mutatkoztak, ezek különböztek az Opportunity által talált golyóbisoktól, valószínűleg finomszemcsés anyag összetapadt aggregátumai.



A Spirit által talált „golyóbisok”



A Columbia-hegy elérhető távolságban, balra egy kőzetkibukkanással

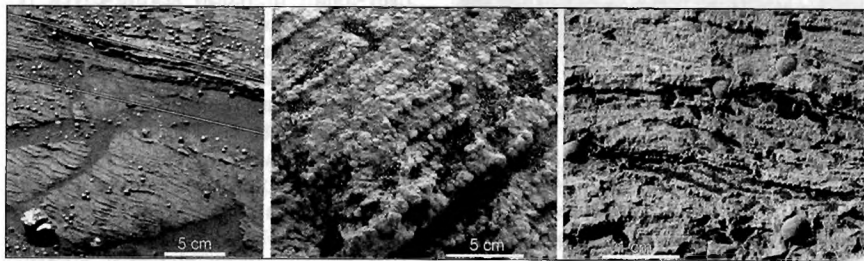
Az eredetileg tervezett háromhónapos munka után a meghosszabbított misszió célpontja a Columbia-hegy. A Spirit e sorok írásáig (üzemelésének 143-dik marsi napja) összesen 2,5 km-t tett meg. Az MGS felvételei alapján az itt kibukkanó üledékes rétegek segíthetnek az ősi Gusev-tóban uralkodó körülmények rekonstruálásában. Az odaúton sem unatkozik a Spirit: az előtérben sok olyan világos szikla látszik, amelyek felülete a Mazatzaléhoz hasonló kinézetű.

Az Opportunity leszállóhelyére több elnevezést is használnak: Sinus Meridiani, Terra Meridiani, Meridiani Planum – de sokan csak Hematit-régióként emlegetik. Ez a bolygó egyedülálló, kb. negyed Dunántúlyi területe, ahol ősi állóvízben, vagy felszín alatti vizes környezetben keletkezett hematit ásvány koncentrálódik. A hematitban lévő vas általában véve is fontos elem: befolyásolja a lávák viszkozitását, a felszíni kémiát, az esetleges élőlények életképességét, viselkedésüket a sugárzással szemben, a mágneses tér generálását a magban stb. A terület így kulcskérdésekre adhat választ a Mars fejlődésével kapcsolatban.

A közel 350x750 km-es vidék a déli felföldek egyenlítői táján lévő (ész. 1°, d.sz. 3°, ny.h. 0°–8°), a földi észlelők által régóta ismert sötét terület (albedója kisebb mint 0,15). A régióra 1998-ban figyeltek fel az MGS hőtérképező spektrométerének megfigyelései alapján. A marsfelszín jellegzetes színét a vastartalmú ásványok főleg 0,4–0,75 mikrométer közötti abszorpciója adja. A spektrum itt „jellegtelen”, ezért gyengén

rendezett kristályszerkezetű vagy amorf vasoxidot feltételeznek a bolygón. A légkör hatására korrigált adatokat laboratóriumi oxidok, hidroxidok standardjaival összehasonlítva kiderült, hogy a fenti területen nem amorf, hanem kristályos, úgynevezett szürke hematit van. A hematit (alfa- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) egy vasoxid, kristálméretét tekintve három előfordulási formája: nanofázisú (5–10 mikrométernél kisebb röntgenamorfszemcsék), vörös (0,1 nm–5 mikrométeres kristályok), és szürke hematit (10 mikrométernél nagyobb kristályok). Az ásvány a régióban 5–10 mikrométernél nagyobb kristályokban lehet. Vörös hematitot kis mennyiségben máshol is találtak a bolygón (pl. Olympus–Amazonis vidéken maximum 5%-ban), szürke hematit pedig még az Aram Káoszban és a Valles Marinerisben is van – de ezek eltörpülnek a Hematit-régió gazdagsága mellett. A környezetétől élesen elhatárolódó, sima felszínű, 100 ezer  $\text{km}^2$ -es Hematit-régió 10–15%-át boríthatja a megfigyelt kristályos hematit. Az üledékes rétegsor teljes vastagsága 600 m, maga a hematit egy 200 m vastag részében található. A sima rétegek alatt az idős (3,5 milliárd évnél öregebb) kráterezett felszín húzódik. A rétegsort a szél részben lepusztította, eredetileg lényegesen nagyobb volt.

A hematit keletkezésére négy elgondolás van: 1. Kémiai kiválás oxigénben gazdag, oldott vasat tartalmazó állóvízből. Ez a földi ún. BIF-ek (sávos vasérc) analógiája lehet. Utóbbiak savas vízből keletkezettek, amikor az eredetileg oxigénben szegény mélységi víz a felszínről származó oxigéntől dúsult. A BIF-ekben jellemző kvarc azonban nem mutatkozik a Hematit-régióban. 2. Vasban gazdag kőzeteken átáramló vulkánok által fűtött vízből vált ki az anyag. Utóbbi problémája, hogy ehhez forró víz kell, de a térségben nincs vulkáni képződmény. 3. Mállás alacsony hőmérsékletű felszínalatti vizekben, ez a földi ún. lateritesedésre hasonlít, ami szilikátszegény vulkáni kőzetnél savas, redukáló közegben jellemző. Ezzel az a probléma, hogy máshol is lenniük kellene hasonló vidékeknek. 4. Magnetit ásványban gazdag lávák magas hőmérsékletű oxidációjával. Ekkor szintén elterjedtebb lenne a bolygón. Persze utólag (másodlagosan) is keletkezhetett a hematit, amikor a hideg láva érintkezett vízzel. Továbbá elvileg sekély betemetődés során goethitből (alfa- $\text{FeO}(\text{OH})$ ) is átalakulhat a felszín alatt.



A Silkrock (balra és középen) és az Upper Dell (jobbra) rétegei

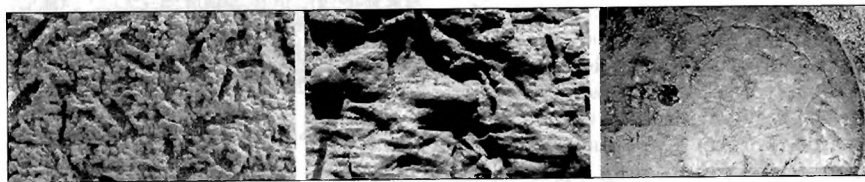
A sok megválaszolatlan kérdés, az érdekes tudományos lehetőségek, valamint a biztonságos leszállás feltételei (20% alatti sziklaboritottság, az ejtőernyős fékezéshez szükséges kis magasság,  $15^\circ$  alatti lejtőszögek) együtt eredményezték, hogy a MER-1 leszállóhelye a Hematit-régió enyhén D–DNY felé lejtő, viszonylag sima, –1400 és –1600 m közötti magasságú része lett. Itt landolt 2004. január 25-én az Opportunity,

21 nappal a Spirit után. Az első Marsot érést követően 26-ot pattant, majd 200 m-t gurult, végül egy apró kráterben kötött ki (d.sz. 1°95 k.h. 354,47). Nem véletlen, hogy hosszú évek óta napirenden volt a Hematit-régió – az első képeken minden korábbtól különböző, egzotikus táj bontakozott ki. A kráterben és környékén durva sziklatörmelék helyett finomszemcsés anyag fed mindent; a vékony, 10–30 cm-es takaró alól pedig világos színű, réteges üledékek bukkanak ki. A szonda a 22x30 méteres Eagle-kráterben landolt, amelynek északnyugati oldalán 120 fok hosszan látszott az első ún. szálkőzet-kibukkanás a Marson, amelyek a közeli vizsgálatok megerősítették réteges szerkezetét. Az Eagle-kráterben talált nyomok közül az alábbiak utalnak egykori víz jelenlétére:

1. A leglátványosabb nyom az ún. keresztarétegzés, ami tipikusan hullámzó vizes környezetben lerakódó anyagokban keletkezik, erre példa az előző oldalon, jobbra, az Upper Dell sziklánál látható. Baloldalt a Silkrock két vonal közötti részén lévő párhuzamos rétegek hullámszástól mentes környezetre, esetleg átmeneti szárazra kerülésre utalnak. Az e felett és alatt lévő részek keresztarétegzett rétegei legalább 5 cm mély, 10–50 cm/s sebességgel áramló vízben keletkeztek. A kis nyílak egy, a lerakódás után bekövetkezett deformációt jeleznek. A középső képen az egyes rétegek eltérő szemcseméretére láthatunk példát.

2. Egykori vízre utal még a sok kén is, ami szulfátok (valószínűleg magnézium- és vasszulfát) formájában lehet jelen, emellett jelentős mennyiségű klór és bróm is mutatkozott. A kibukkanásnak közel fele valamilyen szulfátos sókőzet, ásványai közül egyelőre a jarositot ( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) sikerült azonosítani, amely tipikusan vizes környezetben keletkezik. A fentiekhez hasonló ún. evaporitok (sókőzetek) a Földön bepárlódó vízű öblökben, sivatagi tavakban, a felszínen vagy annak közelében keletkeznek.

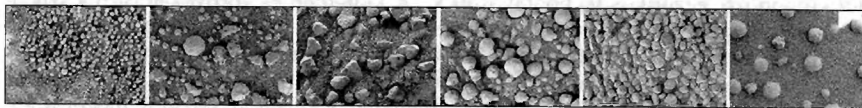
3. A gipszhez hasonló kristályok „helyére” emlékeztető mélyedések akkor keletkezettek, amikor a korábban vízben kivált üledék később ismét vízzel érintkezett, és egyes sókristályai feloldódtak, üreget hagyva maguk után.



Visszaoldódott kristályüregek (balra), a lerakódással egy időben képződött „áfonya” (középen), és egy kettévágott „áfonya” (jobbra). Mindhárom kép 3 cm széles területet ábrázol

4. Az Opportunity egzotikus célpontjai a kerekded, „áfonyáknak” elnevezett gölyöbisek. Ezek változó méretű, közel milliméteres képződmények, környezetüknél sötétebbek, színük szürkés, enyhe kék beütéssel, felszínük egyenetlen, gyakran apró gödröckel barázdált. A rétegsorban szinte mindenhol megtalálhatók. Valószínűleg nem becsapódásos, vagy vulkáni eredetű megolvadt, szétfröccsent és gömb alakban megszilárdult testek – utóbbi esetben egy vagy több rétegben koncentrálnának. Legvalószínűbb, hogy vizes környezetben kivált, összetapadt szemcsék alkotta ún. konkréciók. A Berry Bowl nevű áfonya halom színképet egy áfonyákban szegény

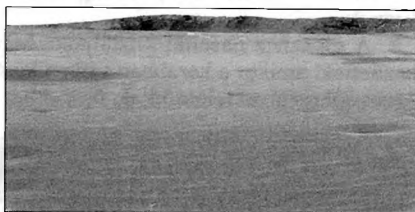
résszel összehasonlítva derült ki, hogy a hematit főleg ezekben a golyóbisokban található. Mivel a rétegek nem deformálódnak mellettük, ezért azokkal egy időben keletkeztek.



Golyóbis-típusok

A magas kéntartalom a karbonát-paradoxon néven ismert problémát is új megvilágításba helyezi. Utóbbi lényege, hogy az egykori vizes környezetben a légköri széndioxidnak a vízben kiválva karbonátos kőzeteket kellett alkotnia a Marson, ezek nyomát azonban nem találjuk. Lehet, hogy a bolygón a fő evaporitok (bepárlódó vizekből képződő kőzetek) nem is karbonátok, hanem szulfátok, utóbbiak kéndioxid kiválásával keletkeznek. Ha feltételezzük, hogy az ősi Mars légkörében sok vulkáni eredetű kéndioxid volt, ez több dolgot is megmagyarázhat. Egyrészt üvegházgázként közreműködik a korai Mars felmelegítésében, másrészt a vizekben savas környezetet okozva megakadályozza a karbonátok kiválását. Még 0,1%-os  $\text{SO}_2$ -tartalom is annyira savassá teszi a vizet, hogy karbonátok nem keletkezhetnek. Ez persze teljesen nem oldja meg a karbonát-paradoxont, de felveti azt a lehetőséget, hogy talán sokáig maradt savas a víz, és ez akadályozta a széndioxid kiválását. Közben a bolygó lassan elvesztette légkörének nagyobb részét, vizei pedig megfagytak.

Az Eagle-kráterből kimászott Opportunity hasonlóan egzotikus, tükörsima vidéken gurult tovább. Meglátogatta a 130 m átmérőjű és 22 m mély Endurance-krátert, ahol az első vizsgálatok alapján kevés bazaltos anyag is van a feltehetőleg szintén üledékes kőzetekből álló falban. Az Endurance peremén is akadtak hematit golyók. A réteges üledékekben lévő kevés bazalt valószínűleg vulkáni porból származik. Az Opportunity a földi marsmeteoritokhoz eddig legjobban hasonlító kőzetre is ráakadt, amelynek összetétele az Antarktiszon 1979-ben talált EETA 79001-B jelű meteoritéra emlékeztetett. A kérdéses sziklát Bounce-nak nevezték el, mivel a szonda már találkozott vele a leszállás pattogó fázisában. Ez az ún. Shergottit-meteoritokhoz hasonló bazaltos kőzet, és az 50 km-rel DNy-ra lévő 25 km-es kráterből származhat. Hematit csak a felületére rakódott porban volt.



Jellegzetes tájkép a Hematit-régióban

A Hematit-régió komoly probléma elé állítja a szakembereket: a megörökített felszín elképesztően fiatalnak tűnik, korát egyelőre nem sikerült megbecsülni. A felszíni sötét törmeléktakaró a közelmúltban jöhetett létre – esetleg még ma is keletkezik. A légszákok becsapódásainak nyoma világos foltok formájában rajzolódott ki, valószínűleg a légszákok a felszíni sötét anyagot a mélyebben fekvő világosabb anyagba nyomták be. A marstalaj kis méretskálán is változatosnak bizonyult, mint az a fenti

hat felvételen látható. A hematitos áfonyák mellett más „gumók” is megfigyelhetők, valamint a marstalaj egyéb változásai, néhány cm-es távolságokon.

Az Opportunity kerekeivel 22 perc alatt egy 50 cm hosszú, 10 cm mély gödröt ásott. Utóbbi vizsgálatával kiderült, hogy a marstalaj annyira finom szemcsésű, hogy legkisebb alkotóelemei még a mikroszkóppal sem különíthetők el. Az áfonyákhoz hasonló, feltűnően fényes felszínű golyók a felszín alatti is mutatkoztak, és a Spiritnél tapasztaltakhoz hasonlóan a marstalaj szemcséi itt is erősen összetapadnak (l. a középső és jobb oldali felvételt egy-egy 3 cm-es területről).



Az Opportunity gödre

A terület további érdekessége a nagyságrendileg méteres kráterek vagy gödrök sorozata, melyek mentén e sorok írásakor halad a rover. A légkörben vagy még az űrben széttört meteorikus testek becsapódásakor keletkező kráterláncok nagyobb kráterekből állnak, azaz feltehetőleg nem „hagyományos” kráterláncsal van dolgunk. A kráterek (vagy gödrök) sora egy időnként elkanyarodó vonal mentén több 100 m hosszan követhető. Nem zárható ki, hogy egy közeli kráterből egy irányba kidobott törmelék visszahullása hozta létre őket – hosszanti elrendeződésük talán a szintén másodlagos becsapódásokkal magyarázható sugársávokéval rokon. Ugyanakkor olyan egzotikus eredet is szóba került, mint amit Bérczi Szaniszló magyar kutató javasolt: az Opportunity eszerint „karszt felszínen” halad, ahol az egykori víz a tektonikus törések mentén szivárgott a mélybe, a Bükkben is látható dolinákhoz hasonló oldásos üregeket kialakítva.

Mindkét marsjárón hét mágnes kapott helyet, amelyek feladata a légkörből hulló, mágnesezhető szemcsék gyűjtése. Ezek vizsgálata még korai fázisban tart, de annyi egyértelmű, hogy szokatlanul nagy szemcsék is rátapadtak a mágnesre. A légköri por kb. 0,001 mm-es szemcséket tartalmaz, a mágnesen lévő, ennél nagyobbak, kis szemcsékből összeállt aggregátumok lehetnek. A roverkéről érkező információk „lassú szivárgása” ellenére az események várhatóan felgyorsulnak. A két marsjáró ugyanis közeledik (pontosan nem ismert élettartama) végéhez. A télbe hajló marsi időjárás alatt csökken a teljesítőképességük, ugyanakkor az Opportunity egy érdekes nagy kráternél, a Spirit pedig egy hegy lábánál jár. A felderítés ezért valószínűleg izgalmasabb, „merészebb” formában folytatódik. A kutatók egyre több kockázatot vállalnak, az expedíció pedig egyre inkább hasonlít egy vadregényes geológiai felfedezőúthoz.

KERESZTURI ÁKOS