

Geološki dokazi prijašnje nastanjivosti na površini Marsa

Višić, Hrvoje

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:153709>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

**GEOLOŠKI DOKAZI PRIJAŠNJE NASTANJIVOSTI NA POVRŠINI
MARSA**

**GEOLOGICAL EVIDENCES OF PREVIOUS HABITABILITY ON
THE SURFACE OF MARS**

SEMINARSKI RAD

Hrvoje Višić

Preddiplomski studij znanosti o okolišu

Undergraduate Study of Environmental Sciences

Mentor: prof. dr. sc. Dražen Balen

Zagreb, 2015.

SADRŽAJ

1. Uvod	3
2. Fizikalne karakteristike Marsa	4
3. Povijest istraživanja	5
4. Metode istraživanja	7
5. Geološke karakteristike područja	10
4.1. Mineraloške karakteristike	10
4.2. Petrološke karakteristike	12
6. Promjene uzrokovane vodom	14
5.1. Izotopi vodika	16
7. Organski spojevi i biomarkeri	17
7.1. Metan	18
8. Perkloratne soli	20
9. Ostali pokazatelji	22
10. Sažetak	23
11. Summary	24
Literatura	26
Mrežni izvori	27

1. Uvod

Već od samih početaka ljudske povijesti čovječanstvo je težilo za odgovorom da li je Zemlja jedini planet sa životom u svemiru ili postoje drugi planeti na kojima je također moguć život, a s time i druge vrste visoke inteligencije. S razvojem suvremene znanosti čovjek se odvažio u istraživanje dubljeg svemira – stoga, među prvim planetima za znanstvena istraživanja se nametnuo Mars, Crveni planet. Cilj ovoga seminara dati je osnovan osvrt na rezultate tih istraživanja uključujući fizikalne i geološke karakteristike Marsa kao temelje za postanak života. Nadalje, bitno je spomenuti i povijesne misije na Mars koje su donijele glavnu današnjih spoznaja o ovome Zemlji bliskom terestričkom planetu. Među njima se po najvećem broju dokaza o nastanjivim okolišima na Marsu posebno ističe misija *Curiosity*. Upotreba osnovnih metoda istraživanja omogućena je korištenjem mobilnih robotskih laboratorija – rovera. Na taj način moguće je dobiti mineraloške i petrološke pokazatelje promjena uzrokovanih vodom koji mogu ukazati na postojanje okoliša sposobnog za razvoj života. Postavlja se pitanje izvora pronađenih organskih spojeva poput klorbenzena i metana. Oba spoja su u određenim prostorima i vremenskim periodima obilježena vršnim vrijednostima. Konačno, važno je naglasiti i značaj privremenih vodenih tokova bogatih perkloratnim solima, koji se javljaju ovisno o uvjetima u određenim sezonama i dijelu dana, na održivost nastanjivih okoliša.

2. Fizikalne karakteristike Marsa

Mars je terestrički planet s metalnom jezgrom poput svih unutarnjih planeta. Dva njegova satelita, Phobos i Deimos, su asteroidi nepravilnog oblika uhvaćeni gravitacijom Marsa. Mnogo su manji od Mjeseca i otkrio ih je 1877. godine američki astronom Asaph Hall (Shayler i sur., 2005). Kao četvrti planet od Sunca, Mars je jedan od najbližijih nebeskih tijela Zemlji po uvjetima nastanjivosti. Nastanjivost se izražava preko nekoliko indeksa koji pokazuju različite aspekte sličnosti nekog tijela sa Zemljom. Najvažniji je Indeks Zemljine Sličnosti (eng. *Earth Similarity index, ESI*) koji za Mars iznosi 0,64 jedinice od 1 (URL 1.). Po najstarijem pronađenom marsovskom meteoritu, starost Marsa je određena na 4,5 milijarde godina što odgovara starosti Sunčeva sustava (Taylor i McLennan, 2009). Sunčev dan, koji se naziva Sol, na Marsu traje 24 sata, 37 minuta i 22 sekunde (Shayler i sur., 2005). Nagib osi Marsa iznosi 25.19° , a njegov ekvatorijalni polumjer iznosi 3396 kilometara što je pola Zemljinog polumjera i 38 % njene površine. Srednja gustoća Marsa iznosi $3,93 \text{ g/cm}^3$ s 0.107 Zemljine mase. Gravitacijsko ubrzanje iznosi 0.379 ubrzanja sile teže na ekvatoru Zemlje. Mars je udaljen od Sunca 1.5 AJ (1 AJ = udaljenost Zemlje od Sunca). Orbitalni ekscentricitet iznosi 0.0935 što znači da je putanja Marsa blago eliptična. Godina traje 687 dana ili 23 Zemaljska mjeseca. Atmosferu primarno sačinjavaju ugljikov dioksid s udjelom od 96 %, argon 1,93 %, dušik 1,89 % i drugi plinovi 0,18 %. Kisik ukupno čini samo 0,145 % dok voda čini 0,021 %. U odnosu na Zemljin, srednji atmosferski tlak pri površini iznosi 0.636 kPa, dok je srednja temperatura -63°C (Mahaffy i sur., 2013; URL 2.; URL 3.).

3. Povijest istraživanja

Kao jedan od svjetlijih tijela na noćnom nebu, Mars je od davnina privlačio ljudsku pažnju svojom veličinom i crvenom bojom. Prvi zapisi promatranja Marsa sežu od drevnih Egipćana i Kineza u drugo tisućljeće prije nove ere. U Antici je bio od velikog religijskog značaja jer je bio štovan kao božanstvo rata. Modernija istraživanja počinju izumom teleskopa, a prvo promatranje izvršio je Galileo Galilei 1610. godine. Christiaan Huygens pomaže u određivanju trajanja dana na Marsu 1659. godine. Njemački astronom Johann Heinrich Mädler je nacrtao prvu kartu Marsu 1840. godine (Shayler i sur., 2005).

S početkom Hladnog rata, SAD i SSSR postali su predvodnicima tzv. svemirske utrke. Prvih nekoliko misija bilo je neuspješno gdje su se sonde uništile, izgubile kontakt pri slijetanju ili promašile planet. Sveukupno do danas provedeno je 35 misija različitog uspjeha, s ukupno 46 lansiranja. Sovjetska sonda Mars 2 slijetanjem na Mars 1971. godine postala je prvi ljudski objekt na Marsu iako nije preživjela slijetanje. Paralelno sa sovjetskom sondom lansirana je američka Mariner 9. Uslikala je 7300 fotografija te poslala je prve detaljne slike topografije Marsa. Jedan od najvećih kanjona u Sunčevom sustavu, *Valles Marineris*, dobio je ime po ovoj sondi. Prva misija koja se izravno bavila pitanje života na drugim planetima je program Viking. Letjelice Viking 1 i 2 sletjele su na Mars 1976. godine. Nosile su instrumente za mjerenje temperature, tlaka, brzine vjetra, masene spektrometre za analizu atmosferskog sastava, rendgenski fluorescencijski spektrometar za elementarni sastav, plinski kromatograf i seizmometar. Padom Sovjetskog saveza glavninu robotskih misija na Mars preuzima američka svemirska agencija uz pomoć svog laboratorija za mlazne pogone. Letjelice se sastoje od orbitalne jedinice (eng. *orbiter*), jedinice za slijetanje (eng. *lander*) i robotiziranog rover vozila. Dvije vrlo uspješne misije pokrenute su 1997. godine lansiranjem letjelica *Mars Global Surveyor* i *Mars Pathfinder*. Orbitalni dio *Pathfindera* imao je uređaje za istraživanje atmosfere, sustav za daljinsko i blizinsko snimanje dok je rover vozilo *Sojourner* nosio APXS instrument. *Mars Global Surveyor* bila je samo orbitalna sonda čija je svrha bila kartiranje planeta, površinske topografije, raspodjele minerala i magnetskih svojstava (Shayler i sur., 2005).

Misija *2001 Mars Odyssey* obavila je analize minerala koje su pokazale da su neka područja Marsa bila više izložena utjecaju vode od drugih, što se vidi po većem udjelu

hematita i manjem udjelu olivina. Otkrivene su veće zalihe vodika u podzemlju za kojeg se smatralo da predstavlja led. Mjerenjem svemirskog zračenja primijećene su vrijednosti 2 do 3 puta veće od onih u niskoj Zemljinoj orbiti. 2004. godine na Mars je poslana nova generacija rovera, *Spirit* i *Opportunity*, na koje su postavljeni svi instrumenti. *Spirit* je sletio u krater *Gusev* zbog karakteristika koje podsjećaju na drevno jezersko dno, a *Opportunity* je poslan na *Meridiani Planum* zbog velikih naslaga hematita koji se vjerojatno formirao uslijed djelovanja vode (Shayler i sur.,2005). Slijedeća isključivo orbitalna sonda *Mars Reconnaissance Orbiter* dolazi u orbitu Marsa 2006. godine. Vršiti istraživanje topografskih oblika, stratigrafiju, prati vremenske uzorke i led na polovima. Robotička jedinica za slijetanje *Phoenix*, koja stiže na Mars 2008. godine, proučava gostoljubivost i potencijalnu nastanjivost okoliša za mikrobiološku faunu. Također prati izmjenu vodenih okoliša kroz prošlost. Iste godine pokreće se misija *Mars Science Laboratory* čiji su nedavni rezultati raspravljani u ovom radu. U međuvremenu je lansiran *Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission* koji od 2014. godine proučava atmosferu i tijekom klimatskih promjena iz orbite Marsa (Shayler i sur., 2005; URL 5.).

Postoji nekoliko budućih istaknutih misija koje će se provoditi, poput američkih misija *InSight* koja će vršiti geofizička istraživanja Marsa 2016. godine, te misije *Mars 2020* kojom bi se poslao rover-nasljednik *Curiosityja*. Europska i ruska svemirska agencija surađuju na misiji *ExoMars* koja će se sastojati od dvije faze. U prvoj fazi, koja će se odvijati 2016. godine, lansirat će se letjelica s orbitalnom jedinicom *Trace Gas* koja će pratiti izvore metana i drugih plinova na Marsu te jedinicom za slijetanje *Schiaparelli EDM* koja će mjeriti brzinu i smjer vjetra, vlažnost, površinsku temperaturu i prozirnost atmosfere. Druga faza kreće 2018. godine, kad se šalje rover *ExoMars* koji će nositi instrumente za pronalazak bioloških molekula i drugih pokazatelja prijašnjeg ili sadašnjeg života te uređaje za mjerenje meteoroloških i geofizičkih karakteristika planeta. U konačnici, postoje planovi za prve ljudske misije na Marsu, ali one su i dalje u povojima te se ne očekuje njihovo skoro ostvarenje (URL 5.).

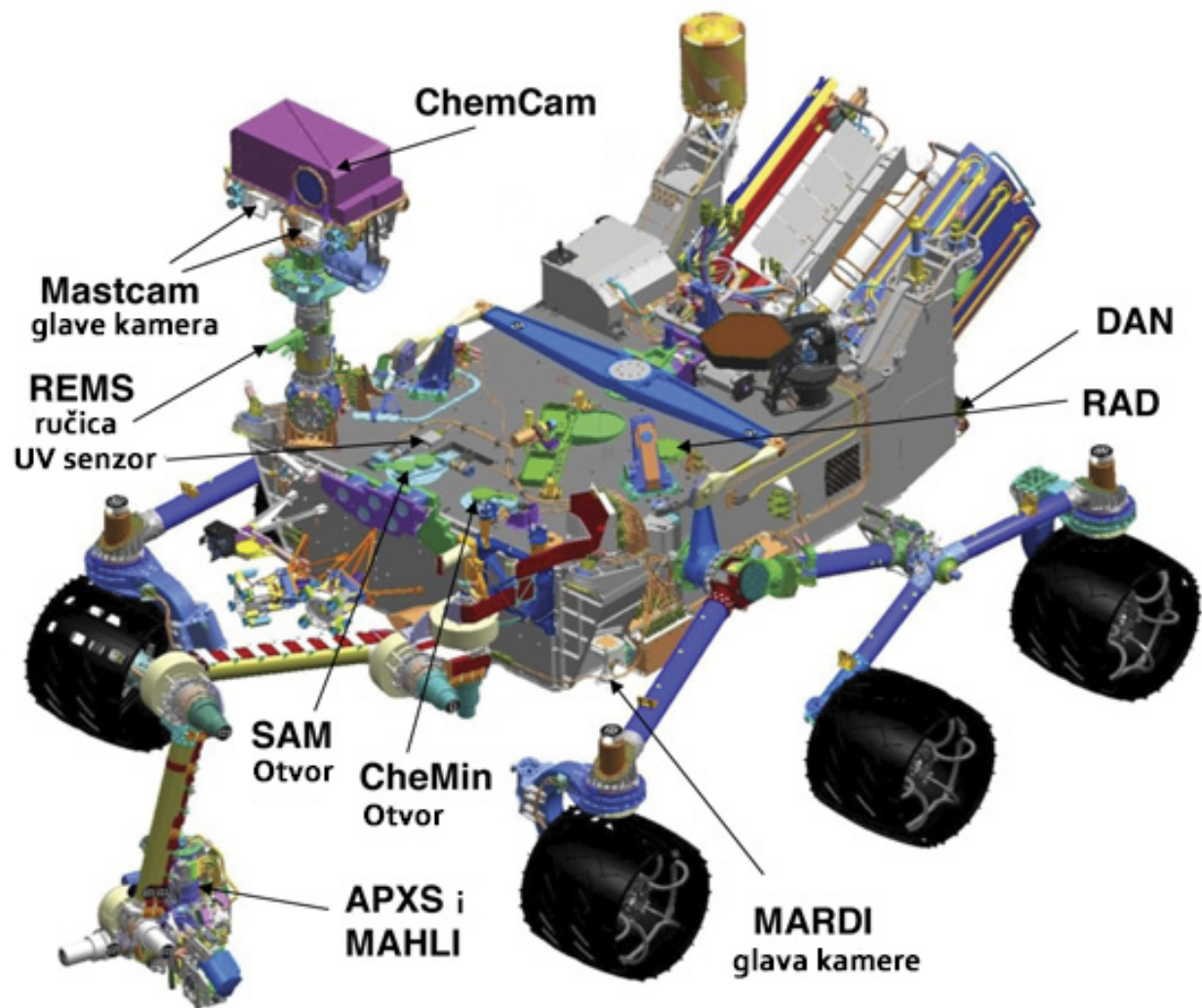
4. Metode istraživanja

Najbolji trenutno poznati način istraživanja izvanzemaljskih okoliša je preko orbitalnih satelita i pokretnih robotskih laboratorija – rovera. Rover *Curiosity* je dosad najnapredniji geokemijski laboratorij dizajniran za misiju znanstvenog laboratorija Marsa (eng. *Mars Science Laboratory, MSL*). Krater *Gale* odabran je kao lokacija za slijetanje koje se ostvarilo 6. kolovoza 2012. godine. Cilj misije je prepoznavanje izotopa, sastava i mineralogije stijena izloženih klimatskim čimbenicima u kojim su primitivni mikroorganizmi mogli obitavati. Također, opremljen visokorezolucijskim kamerama, zabilježio je tisuće fotografija koje su nam prikazale današnje stanje okoliša te pomažu nam u stavljanju uzoraka u geološki kontekst. Spomenuti rover istražuje paleoekološke uvjete i nastanjivost prateći dokaze za promjenama u klimi i geologiji Marsa. Također, prate se potencijalni izvori energije koje bi bakterije i arheje mogle metabolički iskoristiti poput minerala s neravnotežnim redoks parovima (Grotzinger i sur., 2015; Kah, 2015).

Curiosity se opskrbljuje električnom energijom preko multimisijskog radioizotopnog termoelektričnog generatora (eng. *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator, MMRTG*) oslobađanjem topline radioaktivnim raspadom izotopa plutonija-238. Do početka 2015., *Curiosity* je proputovao više od 9 km u pravcu planine *Aeolis Mons*, na koju se uspinje (Wiens i Maurice, 2015). Nadalje, na *Curiosityju* je prisutan velik broj instrumenata, čiji je položaj prikazan na Slici 1., a radi se o slijedećim instrumentima:

1. Analiza uzoraka na Marsu (eng. *Sample Analysis at Mars, SAM*) – služi za analizu molekularne i elementarne kemije, izotopnog sastava, brojnosti volatila i količine organskog ugljika u tlu, stijenama i atmosferi, a sastoji se od:
 - a) plinskog kromatografa (eng. *Gas Chromatograph, GC*),
 - b) četveropolnog masenog spektrometra (eng. *Quadrupole Mass Spectrometer, QMS*),
 - c) podesivog laserskog spektrometra (eng. *Tunable Laser Spectrometer, TLS*).
2. Rendgenski difraktometar (eng. *Chemistry and Mineralogy, CheMin*) – mineraloška analiza rendgenskom difrakcijom uzoraka, utjecaj vode u nastanku i izmjenama stijena.
3. Alfa-čestični rendgenski spektrometar (eng. *Alpha Particle X-ray Spectrometer, APXS*) – ozračivanje uzoraka alfa-česticama, bilježenje spektra rendgenskih zraka, otkrivanje elementarnog sastava i načina nastanka stijena.

4. Aktivni neutronske spektrometar (eng. *Dynamic Albedo of Neutrons, DAN*) – mjerenje gustoće i dubinske distribucije vodika i hidroksilne skupine u tlu i stijenama.
5. Meteorološka postaja (eng. *Rover Environmental Monitoring Station, REMS*) – sastoji se od senzora koji mjere atmosferske čimbenike: tlak, relativnu vlagu, temperature zraka i tla, ultraljubičasto zračenje te brzinu i smjer vjetrova.
6. Detektor za procjenu zračenja (eng. *Radiation Assessment Detector, RAD*) – senzor za praćenje pozadinskog solarnog i kozmičkog zračenja.
7. Skup različitih kamera:
 - a) *ChemCam* (eng. *Chemistry and Camera complex*) – uređaj za daljinsko očitavanje sastava stijena i tla koji se dijeli na:
 - i) laserski inducirani raščlambeni spektrometar (eng. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS*) – elementarni sastav uzorka stijene ili tla,
 - ii) daljinski mikroskenner (eng. *Remote Micro Imager, RMI*) – visoko rezolucijska slika mjesta uzorkovanja, geomorfološki kontekst.
 - b) kamere na jarbolu (eng. *Mast Camera, MastCam*) - uslikavanje krajolika i tekstura tla u prirodnim bojama pri visokoj rezoluciji,
 - c) kamere na robotičkoj ruci (eng. *Mars Hand Lens Imager, MAHLI*) – mikroskopske slike uzoraka u prirodnoj boji i UV-luorescencijsko fotografiranje,
 - d) kamera za izbjegavanje opasnosti (eng. *Hazard avoidance Cameras, HazCams*),
 - e) navigacijskih kamera (eng. *Navigation Cameras, NavCams*),
 - f) kamere za pripomoć slijetanju (eng. *Mars Descent Imager, MARDI*).



Slika 1. Položaj instrumenata na roveru *Curiosity* (Prilagođeno prema Grotzinger i sur., 2015).

5. Geološke karakteristike područja

Krater *Gale* nalazi se blizu ekvatora Marsa areografskih koordinata 4.6° južno i 137.4° istočno (Martín-Torres i sur., 2015). Promjer kratera iznosi 154 km, a najviša točka je planina *Aeolis Mons* ili *Mt. Sharp* visine 5.5 km koja se nalazi u središtu kratera. Starost kratera se procjenjuje između 3.6 i 3.8 milijardi godina. Procesi sedimentacije i denudacije završavaju otprilike prije 3.2 do 3.4 milijarde godina (Grotzinger i sur., 2015).

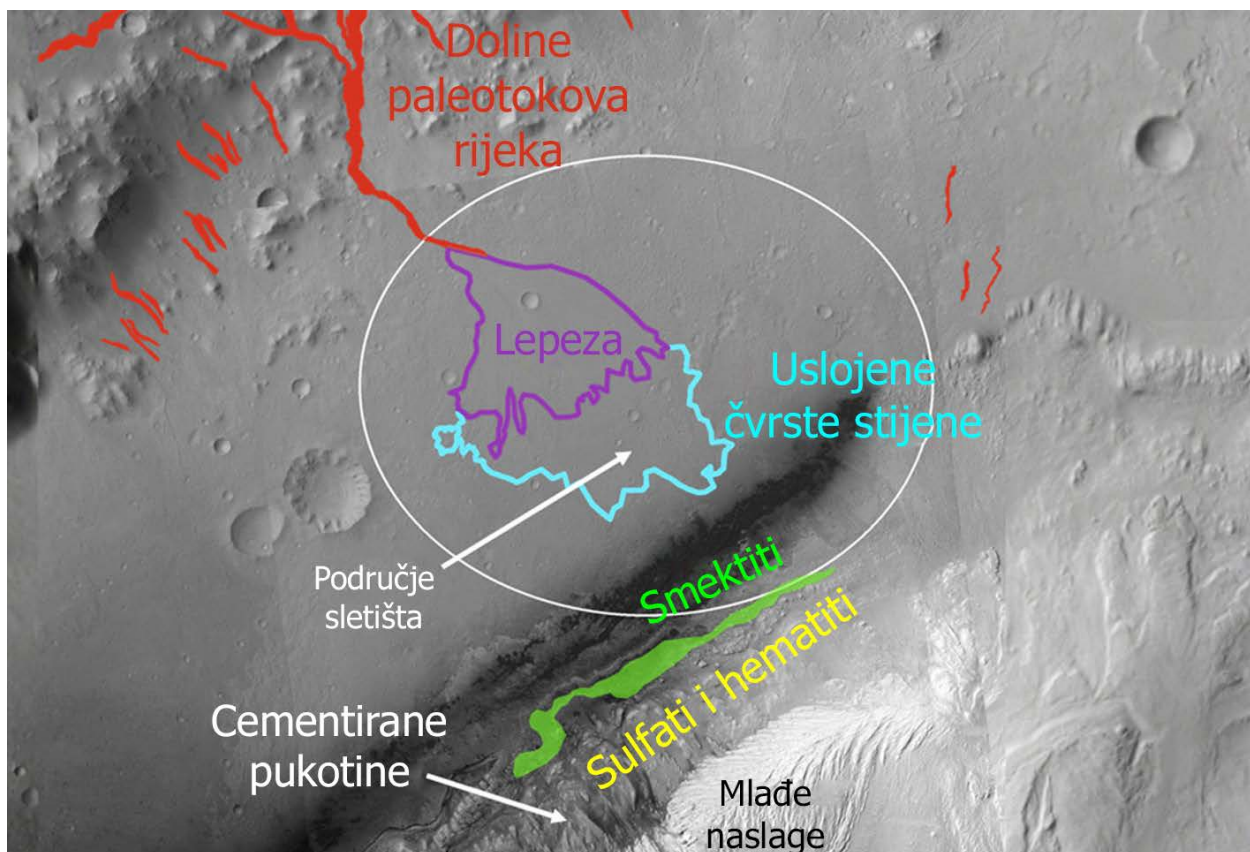
Određivanje mineralogije i kemijskog sastava stijena i tla daje nam informacije o načinu izmjena minerala pod utjecajem klime i okoliša kroz vrijeme. Na ovaj način ukazuje se je li neki primitivni oblik života pri uvjetima njihove formacije i alteracije mogao obitavati na promatranom području. Za opstanak života ključni su fizikalno-kemijski parametri poput temperaturnih oscilacija, količine ionizirajućeg zračenja, redoks stanja i dostupnosti osnovnih elementa (C, H, O, P, N, S). Drugi važni čimbenici su: orbitalne karakteristike poput nagiba osi, precesije i ekscentricitet orbite, veličina planeta i jačina gravitacije te udaljenost od Sunca. Događaji u prošlosti Marsa koji ne idu u korist razvoja života su rani gubitak geomagnetizma i nepostojanje recentne tektonske aktivnosti koja bi se očitovala preko obnavljanja litosfernih ploča. Zbog premale veličine planeta, Mars se brzo ohladio, što je dovelo prestanka tektonske aktivnosti i do gubitka magnetizma koji je stvarao magnetosferu. Magnetosfera je obavijala i štitila planet od visokoenergetskih nabijenih čestica koje su dolazile iz svemira i od Sunca. Na kraju su te čestice otpuhale većinu atmosfere Marsa u svemir, ostavljajući planet izložen kozmičkom i nefiltriranom solarnom zračenju (Mahaffy i Conrad, 2015).

5.1. Mineraloške karakteristike

Krater *Gale* uglavnom sačinjavaju litologije, naspram drugih lokacija, bogatije feldspatima i kvarcom. Doduše, tla su vrlo slična na svim područjima istraživanja. Većina stijena u podlozi su alkalni magmati, primarno bazalti. Glavni primarni minerali koji ih grade određeni su *CheMin* instrumentom kao Mg-Fe olivini, Mg-Fe-Ca pirokseni i Na-Ca-K feldspati, dok manji udio primarnih minerala čine magnetit i ilmenit. Također se mogu pronaći sekundarni minerali nastali alteracijama, poput kalcijeva sulfata anhidrita i basanita, željezovih oksida hematita i akaganeita, minerala glina smektita i montmorilonita te pirotita i kvarca (Sl. 2.). Zbog specifičnih fizikalno-kemijskih uvjeta koji su potrebni da sekundarni minerali

nastanu, oni nam mogu reći više o prijašnjoj nastanjivosti Marsa u smislu temperature, tlaka, vlažnosti i drugih paleoekoloških čimbenika.

Postojanje slabo iskristaliziranih i amorfnih faza poput vulkanskog stakla također može dati korisne informacije o okolišu. Naime, samo postojanje opsidijana govori nam da opsidijan nije došao u kontakt s vodom od vlastitog nastanka jer je u suprotnom podložno izrazitom trošenju (Downs, 2015). Na povećem broju lokacija zabilježena je visoka koncentracija minerala manganovih oksida kao dio površinskog materijala. Nastanak ovakve koncentracije zahtjeva otopinu jakog oksidacijskog potencijala. Opažanja visoke koncentracije mangana uglavnom se ne koreliraju s nekim površinskim posebnostima, a manganska prevlaka je uniformno raspoređena po površini u tankom sloju, što sugerira da je ovaj materijal deponiran od iste tekućine koja je ispunila neke od pukotina. Sam postanak ovih manganskih minerala na Marsu nije poznat. Iako je postotak kisika u atmosferi nizak, na površini Marsa uvjeti su oksidirajući. Baš kao i na ranoj Zemlji prije događaja velike oksigenacije, taj postotak je nedovoljan da stvori minerale bogate manganom (Wiens i Maurice, 2015).



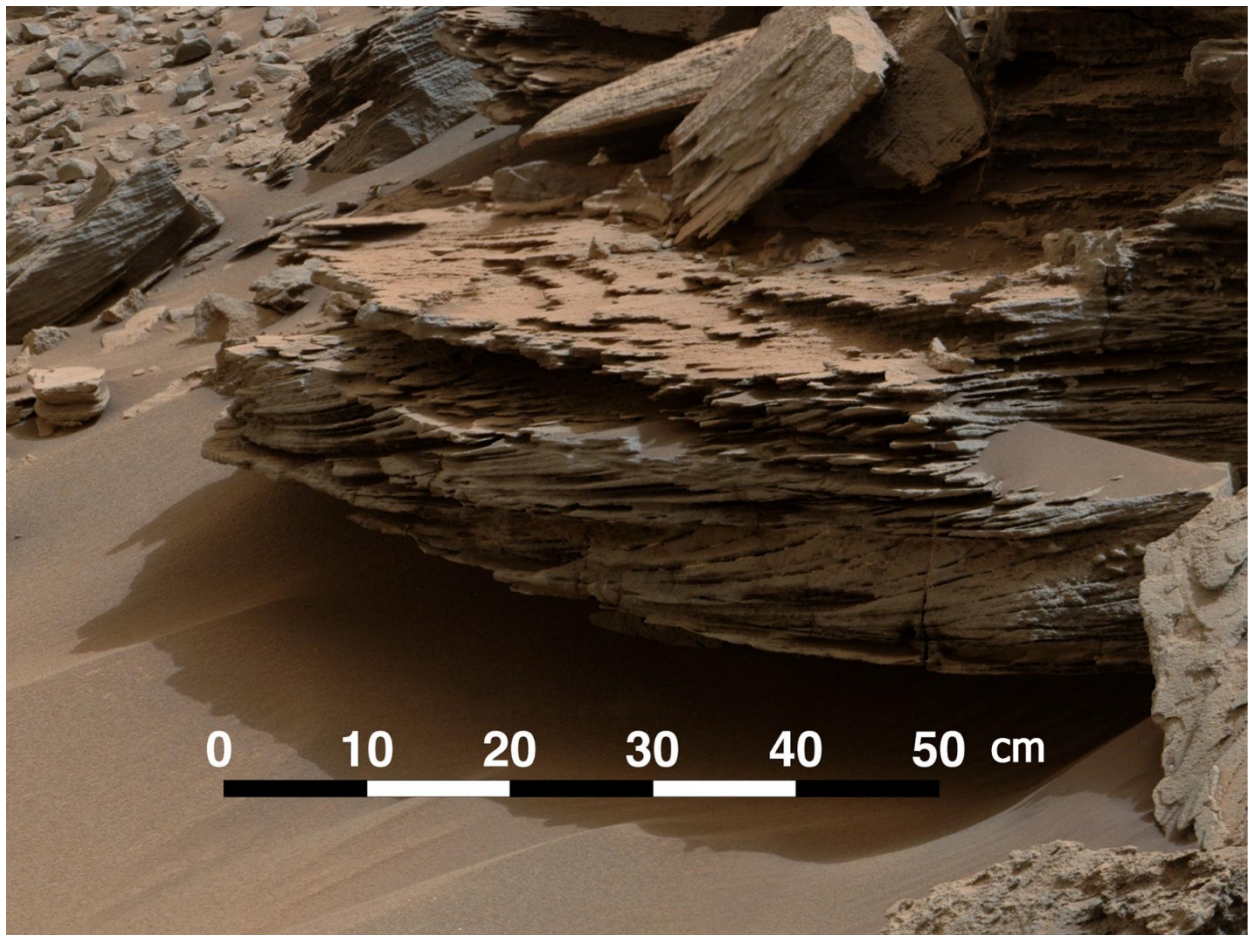
Slika 2. Aluvijalna lepeza u krateru *Gale* s geološkim karakteristikama (Prilagođeno prema URL 6.)

5.2. Petrološke karakteristike

Lokacija slijetanja, nazvana *Bradbury Landing*, odabrana je jer se u blizini nalazi aluvijalna lepeza sa stratificiranim naslagama i drugim fluvijalnim geomorfološkim oblicima poput dovodnog paleokanala *Peace Vallis* (Sl. 2.). Prilikom slijetanja *Curiosityja*, rakete za spuštanje raskopale su i otkrile fluvijalni konglomerat ispod površinskog erodiranog materijala. Planina *Aeolis Mons* građena je od neporemećenih slojeva koji su na boku izloženi atmosferi. Donje slojeve čine filosilikatne i sulfatne komponente odijeljene nekonformnom granicom od anhidritnih slojeva. U ravnici kratera *Gale*, *Aeolis Palus*, većina izdanaka je prekrivena prašinom, različitim eolskim sedimentima i erozijskim teksturama poput tragova tečenja i vučenja, ventifaktima, fasetiranim i drugim klastima. U istom području ima izbačaja nastalog udarom meteorita i drugih egzotičnih komponenti povezanih s udarima poput impaktnih breča i sferula (Grotzinger i sur., 2015; Wiens i Maurice, 2015; Gellert i Clark, 2015).

Sedimente uglavnom čine željezovi oksidi koji daju Marsu specifičnu hrđavu boju te minerali nastali dijagenetskom izmijenjenom bazalta. Uobičajenog su sastava za koru Marsa, iako postoje varijacije u količini željeza, magnezija i soli alkalijskih metala. Iznenadujuća tvrdoća sedimentnih stijena može se objasniti navedenim varijacijama minerala koji cementiraju cijelu stijenu. Drugo objašnjenje nadovezuje se na kasniju dijagenezu gdje su minerali glina i magnetit mogli poslužiti kao cementirajući materijal kojeg ima relativno mnogo u uzorcima pješčenjaka *Windjana* i muljnjaka *Sheepbed* (Grotzinger i sur., 2015).

Curiosity je unutar prvih 100 metara nakon slijetanja našao dobro litificirane oblutke na nekoliko izoliranih izdanaka s teksturama koje su tipične za fluvijalne konglomerate. Na izdanku *Shaler* nalazi se pješčenjak koji je tako stratificiran da se izmjenjuju proslojci većih oblutaka i finijih granula. Dobro je razvijena relativno velika koritna kosa slojevitost, što je još jedan dokaz prijašnjeg vodotoka (Sl. 3.). Facijesi su većinom klastpotporni, iako postoje lošije sortirani, grubozrnati facijesi koji ukazuju na naglo taloženje tijekom poplave. Izmjena različitih slojeva s *interfinger* klinovima koji se međusobno isprepleću također ukazuju na postojanje jezerskog okoliša (Kah, 2015).



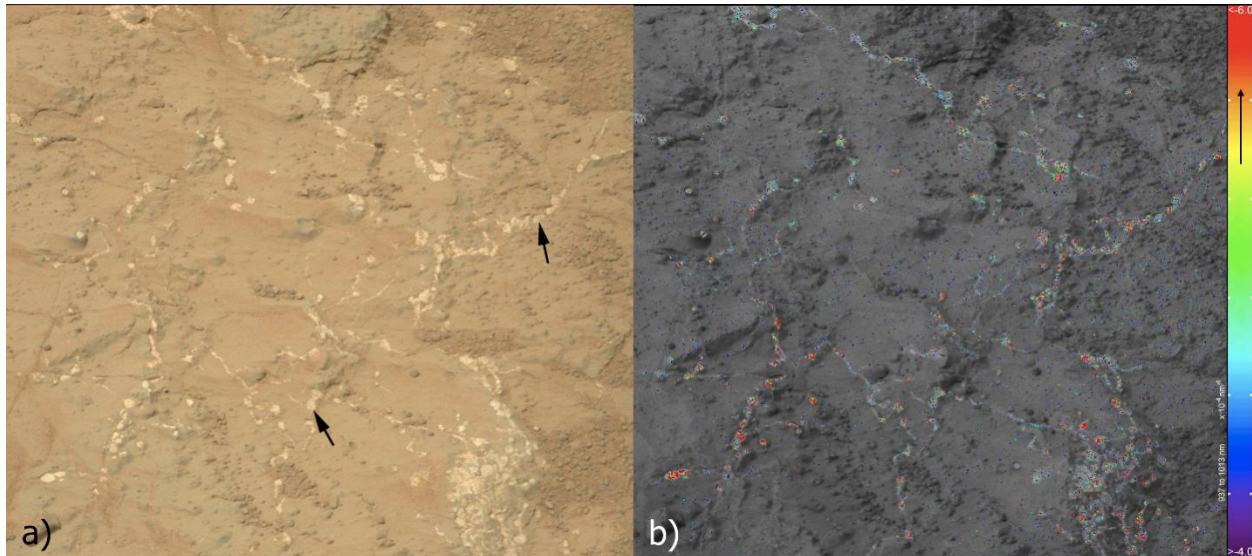
Slika 3. Facijes koritne kose slojevitosti ukazuje na tečenje vode. Stijena *Whale Rock*, izdanak *Pahrump Hills* (Preuzeto iz URL 7.)

6. Promjene uzrokovane vodom

Paleosustav tokova vode i jezera te mreža podzemne vode otkriveni su već u prvoj godini *Curiosityjevog* istraživanja. Primijećeno je više sukcesija vodenog okoliša od kojih su u jednom pronađeni tragovi organskog ugljika, što ukazuje na prijašnju nastanjivost. Uvjeti pri kojim se dijageneza odvijala su bili reduktivni s umjerenim pH vrijednostima i niskim salinitetom (Grotzinger i sur., 2015). Iz dva uzorka uzeta iz muljnjaka formacije *Sheepbed*, *CheMin* analizom je zapaženo 30 % izmjene primarne magmatske komponente s produktima alteracije. Od tog udjela, 20 % predstavlja alteracija olivinskih zrna u magnetit i saponit. Teoriju postojanja slatkovodnog jezera neutralnog pH učvršćuje sama prisutnost saponita kao minerala iz grupe smektita i odsutnost sulfatnih minerala koji nastaju u kiselim okolišima.

Dokazi za postojanje promjenjivog redoks potencijala okoliša je više oksidacijskih stanja željeza i sumpora. Time nam sama mineralogija ukazuje da je okoliš nastanka muljnjaka bio gostoljubiv za život kakav poznajemo. S bioenergetskoj stajališta, gline i olivini mogli su podržavati metabolizam primitivnih kemolitoautotrofa preko svojih reakcijskih puteva oksidacijom anorganskih spojeva željeza, dušika i sumpora (Wiens i Maurice, 2015; Downs, 2015). Nadalje, 500 metara od sletišta na formaciji *Yellowknife Bay* pronađeni su hidratizirani minerali glina. Pronađene su dobro sačuvane dijagenetske značajke poput konkreција, sinerezijskih pukotina te rezistentnijih nodula i sferula koje dolaze u šupljem i cjelovitom obliku. Postanak šupljih nodula se može objasniti cementacijom oko mineralne faze koja je u međuvremenu nestala ili širenjem mjehurića plinova. Nodule su se sačuvale zbog dovoljne količine gline u sedimentu koja je poboljšala koheziju i spriječila otpuštanje plinova. Iako glavnina plina u terestričkim okolišima nastaje raspadom organske tvari, nodule su mogle nastati otapanjem i eksolucijom atmosferskih plinova uz određene temperaturno-tlačne uvjete. Ovi nalazi nam ukazuju na dijagenezu koja se odvijala u okolišu na dnu jezera. Postojali su periodi visokog saliniteta i tekućina bogatih sulfatima, što se vidi iz kasnodijagenetskih pukotina koje su ispunjene sa hidratiziranim i bezvodnim mineralima kalcijevog sulfata (Grotzinger i sur., 2015; Kah, 2015). Žile su nastale pri relativno blagim temperaturnim uvjetima ispod 50 °C. Takva tekućina je hidrauličkim frakturiranjem proširila pukotine koje je nakon cementacije sedimenata u ranoj dijagenezi ispunila kalcijevim sulfatom. Različite razine hidratacije u venama i nodulama ukazuju na postojanje dvije forme kalcijeva sulfata – gipsa i

basanita (Sl. 4.; Wiens i Maurice, 2015). Procjenjuje se da je tako nastanjiva vodena masa postojala od nekoliko stotina tisuća do nekoliko milijuna godina. Također je postojao period podzemnih voda obogaćenih željezom (Grotzinger i sur., 2015). Slične pojave zabilježene su i na drugim lokacijama, što nam govori da su potencijalno nastanjivi krajolici na Marsu bili šire rasprostranjeni, barem u ekvatorijalnom pojasu.



Slika 4. Širina oba odsječka iznosi 25 cm: a) Svjetlije žile i nodule ispunjene kalcijevim sulfatom označene strelicama, uzorak *Knorr*. b) Isti odsječak analiziran *MastCam* prikazuje stupnjeve hidratizacije gdje crvena boja označava jaču hidratizaciju (Prilagođena prema URL 8.).

Rover *Spirit* na lokaciji *Dead sea* u potpovršinskom svijetlom sloju otkrio je željezovito tlo bogato sulfatima koje sadrži 20% vezane vode. Kasnije su ovako hidratizirana tla pronađena i na drugim lokacijama u području *Home Platea*. Većina zabilježenih alteracija odgovara promjenama nastalim u vodenom okolišu koji je mogao biti nastanjiv. Rover *Opportunity* sletio je 2 tjedna poslije *Spirita* na *Meridiani Planum*. U uzrocima kratera *Endurance* zabilježio je naglo osiromašenje tla magnezijevim sulfatom i porast faze klor. Procjeđivanjem podzemne vode kroz podlogu došlo je do otapanja i odnošenja sulfatne faze koja nadomještena taloženjem alumosilikatne komponente. Isti rezultati su dobiveni na 8 kilometara udaljenom krateru *Victoria*. Na rubu kratera *Endeavour* pronađene su formacije gline u kojima se vidi sukcesija okoliša promjenom s neutralnog na kisele uvjete. Kao i u krateru *Gale*, ovdje su također pronađene žile kalcijeva sulfata i stijene izmijenjene hidrotermalnom aktivnosti (Gellert i Clark, 2015). Alteracije uzrokovane vodom mogu se

primijetiti u pješčenjaku *Windjana* po prisutnosti sitnozrnatih minerala gline koji se nalaze u krupnijem sedimentu. Na lokacijama *Valles Marineris*, *Nilli Fossae* i zapadnom dijelu *Hellas Basina* nalaze se nanosi hidratiziranih silikata koji ukazuju na izmjenu kristalinskih i amorfni faza uslijed djelovanja vode (Downs, 2015).

6.1. Izotopi vodika

Prilikom prvog uzorkovanja svake stijene laserom došlo je do izrazitog otpuštanja vodika, ali svako naknadno okidanje ne bi zabilježilo maksimum. Obrazloženje leži u tome da se prilikom prvog uzorkovanja ujedno vaporizira prašina koja prekriva površinu stijene, a poslije početnog pogotka laserom prašina nestaje. To nas dovodi do zaključka da je prašina na Marsu izrazito hidratizirana. Sve slijedeće opservacije preko *ChemCham* sustava pokazale su da je ta pojava sveprisutna u promatranom području. Također, krupnija zrna u tlu su manje hidratizirana nego ona finija koja su ujedno siromašnija silikatnom komponentom naspram prosječnog tla na Marsu (Wiens i Maurice, 2015).

Procjenjuje se da tlo sadrži od 1.5 % do 3 % udjela vode. Po omjeru deuterija i vodika, voda je vjerojatno recentna jer omjer odgovara sastavu današnje atmosfere Marsa, što nam ukazuje na interakciju između sustava atmosfere i tla. Nadalje, pirolizom je iz smektitne gline oslobođena voda s drugačijim omjerom vodikovih izotopa. Po bečkim specifikacijama standardne prosječne oceanske vode, omjer izotopa vodika u vodi iz gline je 3 puta veći od standarda dok je omjer same atmosfere Marsa 6 puta veći. Iako je ova voda starija od vode vezane u tlu, možemo zaključiti da se već dogodio veliki gubitak atmosfere tijekom formacije gline. Bez obzira na izraziti gubitak atmosfere, relativno velika vodena masa mogla je postojati. Naime, ako bi se izravnala površina Marsa na srednju morsku razinu, pri tadašnjim atmosferskim uvjetima sva voda bi činila globalni sloj dubine od 100 do 150 metara. Ondašnji omjer izotopa vodika time omogućava ujezerenje rezervoara vode u topografskim depresijama poput *Yellowknife Bayja* (Grotzinger i sur., 2015).

7. Organski spojevi i biomarkeri

Najizravniji dokaz postojanja života bio bi pronalazak molekularnih i kemijskih fosila nastalih biološkom aktivnošću. To mogu biti pravilni uzorci u dugim lancima ugljikovodika ili određeni skup aminokiselina. Trebalo bi obratiti pažnju na omjer izotopa $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ i $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ u okolišu jer ih biološki sustavi koriste u metabolizmu zbog veće energetske efikasnosti. Problem predstavlja izvor organskih spojeva jer oni mogu nastati preko lokalnih geokemijskih procesa ili egzogeno pasti na Mars preko meteorita i međuzvezdane prašine. Godišnje na planet egzogeno stigne preko 240 tona organske tvari, što bi značilo akumulaciju od nekoliko desetaka dijelova na milijun na površini. Stvarna situacija nije takva zbog raspada organskih spojeva koji ne dopiru dublje u regolit gdje bi se sačuvali. Velika je prisutnost relativno jakih oksidansa u tlu što uz solarno i kozmičko zračenje nije okoliš pogodan za očuvanje. Zbog toga treba istraživanje fokusirati na područja gdje se organska tvar mogla sačuvati sedimentacijskim procesima, a da je u isto vrijeme tek nedavno izložena vanjskim utjecajima erozijom (Mahaffy i Conrad, 2015).

U svim dosad analiziranim uzorcima su pronađeni klorirani ugljikovodici. Moguće je da su neki ugljikovi spojevi izvorno s Marsa, ali također ne možemo isključiti kontaminaciju sa Zemlje. Od kompleksnijih spojeva pronađena je relativno veća količina klorbenzena sačuvanog u stijenama. Ako izuzmemo mogućnost da je klorbenzen izvorno sa Marsa, također je mogao nastati tijekom pirolize katalizirane magnetitom. Prilikom zagrijavanja bi došlo do raspada aromata, klorovodične kiseline i pare te sinteze klorbenzena. Nadalje, moglo je doći do reakcije organskih spojeva s anorganskim klorom uslijed udara čestica kozmičkog zračenja (Glavin i dr., 2014). Za uspješan pronalazak organskih spojeva je potrebna pojačana akumulacija istih, minimalna alteracija tijekom litifikacije i dijageneze te što manji stupanj toplinskog raspada prilikom zakopavanja. Zbog izostanka tektonike ploča i veće debljine kore Mars ima smanjenu toplinsku provodnost stoga je bolji za očuvanje organskih spojeva od toplinskog raspada nego Zemlja. Međutim, Mars ima mnogo rjeđu atmosferu od Zemlje što povećava utjecaj zračenja na stijene izložene površini te dovodi do radiolize spojeva (Grotzinger i sur., 2015).

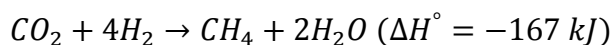
Curiosity je na lokacijama *Rocknest* i *Yellowknife bay* prvi put otkrio dušik na površini Marsa u obliku dušikovog monoksida. Dušik je mogao nastati raspadom iz nitrata prilikom

zagrijavanja sedimenata SAM instrumentom. Ovaj pronalazak odgovara lokacijama na Zemlji gdje uz perklorate često dolaze i nitrati. Iako na Zemlji dio fiksnog dušika stvaraju organizmi, na Marsu je najvjerojatnije nastao abiotičkim putem, pomoću energije oslobođene udarom meteorita ili munje. Živi organizmi mogu koristiti dušik u takvom fiksnom obliku za proizvodnju nukleinskih kiselina. Fiksirani dušik je još jedan pokazatelj prijašnje nastanjivosti drevnog Marsa jer predstavlja prvu fazu razvoja primitivnog ciklusa dušika koji je mogao pružiti biokemijski pristupačan izvor dušika (Stern i sur., 2015).

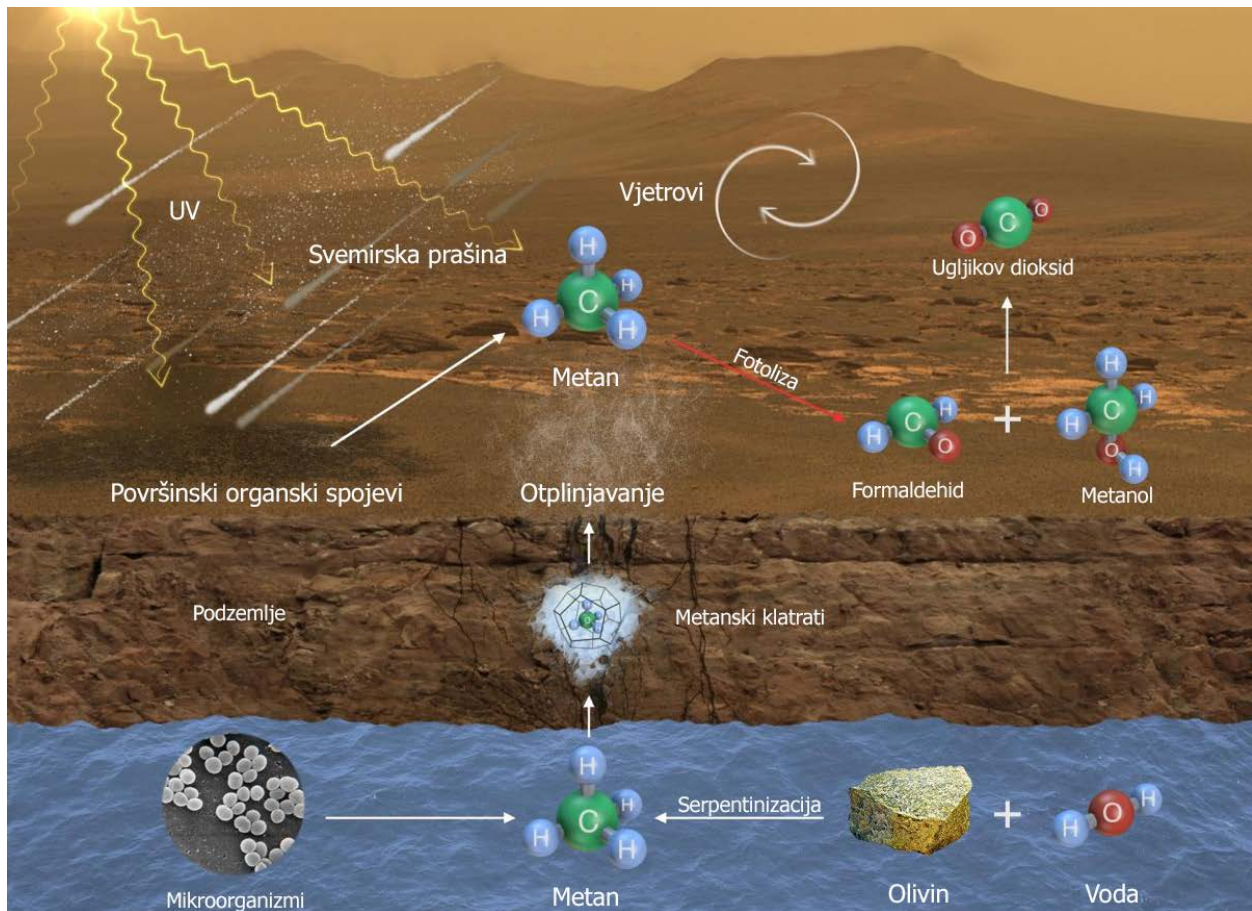
7.1. Metan

U 2004. godini *Mars Express* zabilježio je volumni udio metana u atmosferi od 10 dijelova na milijardu (ppb), a naknadna mjerenja do čak 60 ppb što ukazuje na nedavnu emisiju metana. Izvor metana na Zemlji većim je postotkom produkt biološke aktivnosti i raspada organske tvari, dok ostalih nekoliko posto je abiotičkog podrijetla povezano s hidrotermalnom aktivnošću i serpentinizacijom. Doduše, to ne znači da treba odbaciti abiotički izvor jer bi hidrotermalni izvori mogli opskrbljivati primitivne metanogene i sulfat-reducirajuće bakterijske i arhejske kemolitoautotrofe s izvorom energije te pripomoći u katalizi.

Predviđeni životni vijek metana u atmosferi Marsa je 300 godina nakon čega se raspada uslijed djelovanja oksidansa i UV zračenja. Taj period je mnogo duži u usporedbi s globalnim vremenom miješanja atmosfere koje iznosi mjesec dana. Prema tome bi metan trebao biti uniformno rasprostranjen u atmosferi. Yung i Chen (2014) po Lefèvre i Forget (2009) ističu da se taj fenomen ne može objasniti s poznatim fizikalno-kemijskim procesima u atmosferi. Tek nakon slijetanja *Curiosityja*, pomoću *TLS* instrumenta zabilježen je pozadinski omjer miješanja metana na 0,7 ppb i puls od 7 ppb tijekom dvomjesečnog promatranja. Ovi rezultati upućuju na barem dvije vrste izvora otpuštanja metana – izvor konstante emisije i pulsirajućeg otpuštanja. Međutim, potrebna su dodatna istraživanja jer ništa u vezi tih izvora još uvijek nije poznato. Moguć je neki proces analogan otapanju permafrosta i otpuštanju metana što bi opet ukazivalo na biološku aktivnost (Sl. 5.). Metanogene arheje mogle bi dobivati energiju koristeći vodik i ugljikov dioksid preko redoks reakcije stvaranja metana u dubokomorskim uvjetima:



Pomoću ugljikovog dioksida i vodika koji su nastali serpentinizacijom stvaraju metan. Paralelno s tim, željezov(II) ion reducira vodu nazad do vodika. Na Zemlji su takvi okoliši uglavnom vezani za hidrotermalne izvore. Same arheje su pronađene u kiselim uvjetima unutar ledenjaka na 3 kilometra dubine koji odgovaraju ledenim okolišima na Marsu. Mars, koji obiluje željezom i ima dovoljno sulfata, mogao je omogućiti prvotnom životu osnovne preduvjete za katalitička svojstva bez relativno velike potrebe za energijom pomoću željezovog(II) sulfida. Mnogi esencijalni enzimi su metaloproteini koji sadrže kofaktore iona metala i koriste se u procesu fiksacije CO₂ za dobivanje energije. Također, željezov(II) sulfidima veliki kemijski afinitet prema organofosfatima, cijanidima, aminima i formaldehidu (Martin i Russell, 2002, 2007). Jedan od glavnih načina nastanka metana na Zemlji abiotičkim putem je preko Fischer-Tropschove reakcije. Kemijska reakcija više-manje odgovara reakciji koju provode metanogene arheje, osim što katalizu vrše prijelazni metali: nikla, željeza, kobalta, kroma i rutenija, zajedno s njihovim oksidima. Također, ovi procesi odvijaju se u područjima s hidrotermalnom aktivnošću, što bi ukazivalo na recentni vulkanizam. Takvi hidrotermalni okoliši bi mogli osigurati toplinsku energiju i tekuću vodu za provedbu Fischer-Tropschove reakcije ili održavanje metanogene mikrobiološke zajednice. Drugi načini su egzogeni donos, otpuštanje metanskih klatrata ili magmatsko otplinjavanje. Istraživanja bi trebalo usmjeriti na potragu za reliktnim

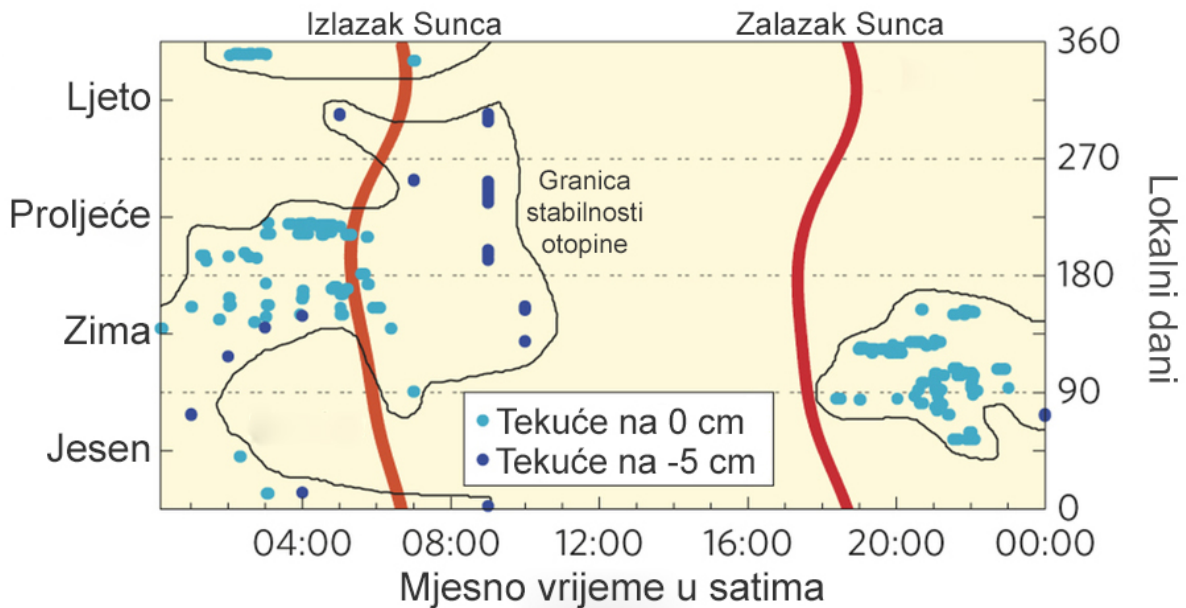


Slika 5. Shema mogućih izvora postanka i raspada metana na Marsu (Prilagođeno prema URL 9.)

8. Perkloratne soli

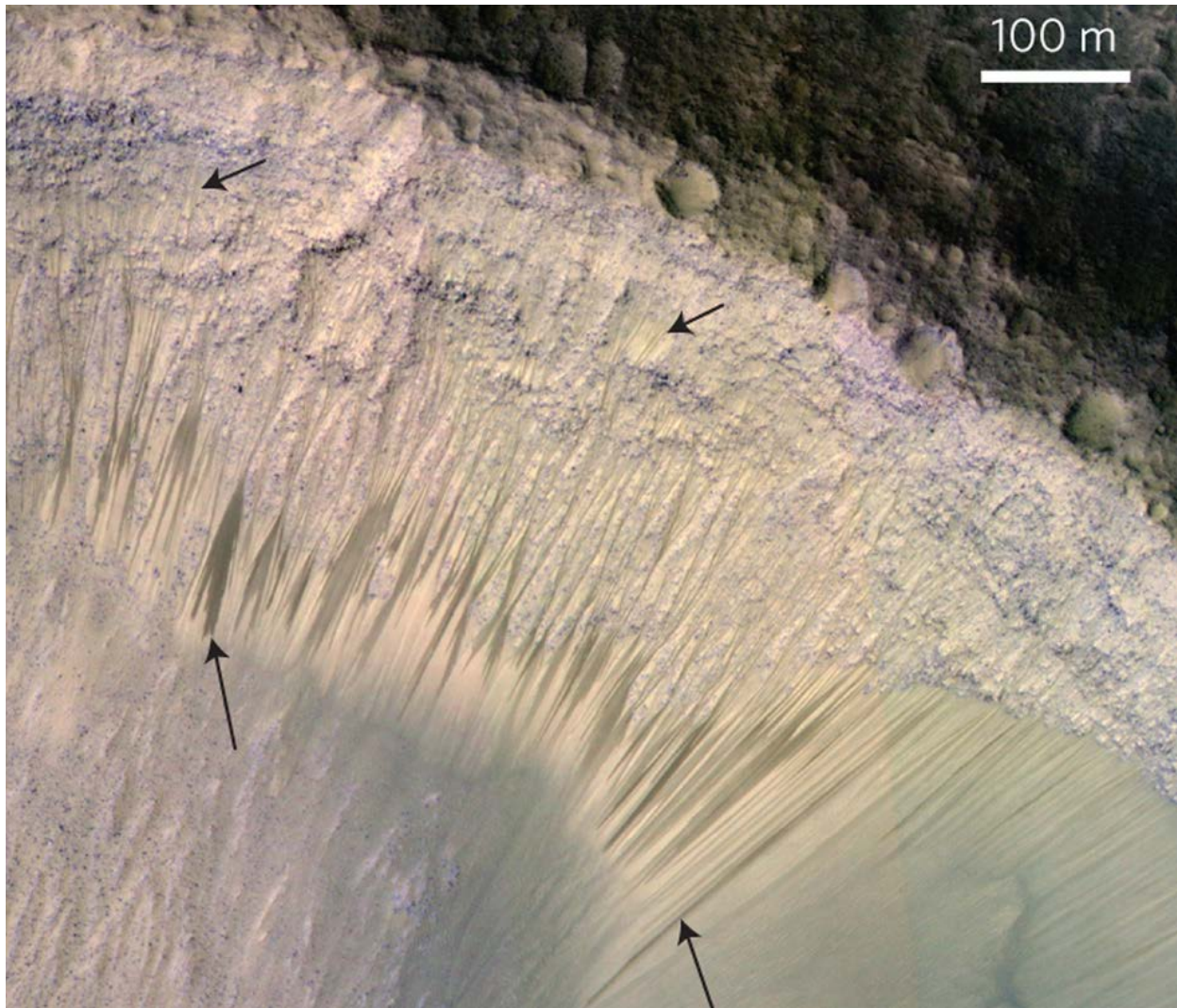
Mars Reconnaissance Orbiter je daljinski zabilježio privremenu tekuću vodu u području ekvatora i polova Marsa. Tek je direktno promatranje učinio *Curiosity* koji je u krateru *Gale* otkrio perkloratne soli. Instrumentom *REMS* prvi put su utvrđeni dnevni i sezonski okolišni uvjeti koji omogućuju stvaranje perkloratnih soli tijekom cijele Marsove godine. Uvjeti variraju ovisno o planetarnoj cirkulaciji atmosfere s minimumom vlage ljeti i maksimumom zimi. Temperatura je obrnuto proporcionalna vlazi. Soli snižavaju ledište vode te formiraju stabilne vodene otopine i hidratizirane spojeve preko procesa delikvescencije. Apsorbirajući atmosfersku vodenu paru, hidratne soli se istovremeno u njoj otapaju jer je parcijalni tlak vodene pare u zraku veći od tlaka u hidratnoj soli. Konačno, da bi otopina soli

postala tekuća, temperatura okoline mora biti viša od eutektičke temperature smjese. Led bogat perkloratnim solima postaje tekuć u gornjih 5 cm tla tijekom zimskih noći zbog povećane vlažnosti i niže temperature. Izlaskom Sunca nastala tekućina počne isparavati. Unutar prvih 15 cm tla, stupnjevi hidratacije soli su različiti, stoga je prisutna stalna izmjena vode između tla i površine. Ispod 15 cm, stalno hidratizirani perklorati su stabilni zbog niske srednje temperature i malih dnevnih i sezonskih termalnih varijacija tijekom čitave godine (Sl. 7.).



Slika 6. Godišnji tijek agregatnih faza podzemnih kalcijevih perklorata. Točke označavaju uvjete temperature i relativne vlage za stvaranje rasola (Prilagođeno prema Martín-Torres i sur., 2015).

Na nagnutim plohama se često mogu primijetiti sezonski tragovi tečenja vode (Sl. 7.). Mjerenja provedena instrumentom *DAN* pokazala su da se regolit može po stratifikaciji vode podijeliti na dva sloja: gornji, suši sloj od par centimetara i vlažniji sloj ispod. Količina vode i toplina nisu dovoljni za održavanje metabolizma i replikacije poznatih terestričkih mikroorganizama. Iako su perkloratni rasoli indirektno promatrani u cirkumpolarnim područjima, njihovo otkriće u ekvatorijalnom području bilo je neočekivano. Ovakve slane otopine trebale bi biti mnogo rasprostranjenije u višim širinama gdje je veća vlažnost zraka i temperature su niže. Rover *Spirit* je pronašao soli željezovih sulfata koje su bile istaložene u plitkom potpovršinskom sloju tla. Najvjerojatnije su bile otopljene u tekućini koja ih je prenijela silaznom putanjom te usput taložila (Martín-Torres i sur., 2015).



Slika 7. Tokovi tečenja slanih otopina označeni strelicama, padina kratera *Melas Chasma* (Preuzeto iz McEwen i sur., 2014)

9. Ostali pokazatelji

U potrazi za nekadašnjim životom trebalo bi obratiti pozornost na karbonate. *ChemCham* sustav uzorkovanja može detektirati čiste karbonate, ali treba biti oprezan jer dolazi do smetnji pri mjerenju zbog atmosferskog ugljika. U tom smislu važno je spomenuti rover *Spirit* koji je sletio u krater *Gusev* 2004. gdje je kod strukture *Home Plate* zabilježio prvu *in situ* detekciju karbonata na Marsu (Gellert i Clark, 2015).

Analizirajući kratere spektrometrom na *Mars Reconnaissance Orbiteru* otkrivene su naslage impaktita, stakla nastalog udarom meteorita. Analogna stakla na Zemlji su znala sačuvati dokaze prijašnjeg života, stoga bi trebalo iste stijene na Marsu dodatno istražiti u

slučaju da se pronađu neki biomarkeri. Takve naslage se mogu pronaći na nekoliko lokacija različitih kratera po Marsu, poput kratera *Alga* i *Hargraves*. Potrebna je detaljna strategija potrage za biomarkerima u prijašnjim dobima u slučaju da je život postojao (URL 4.).

Stijene planeta koevoluiraju zajedno sa životom pa se često za dokaz prvotnog primitivnog života na Zemlji ističu trakaste željezovite formacije. Shodno tome, trebalo bi potražiti slične formacije na Marsu jer zasad nisu otkrivene stijene čiji bi postanak bio izravno vezan za prisutnost života.

10. Sažetak

Zbog svoje blizine i sličnosti Zemlji, Mars je jedan od najboljih kandidata za istraživanje mogućnosti života izvan Zemlje i potencijalne planetarne nastanjivosti. Moderna istraživanja Marsa započela su 1971. godine. U posljednjih 15 godina sonde Opportunity, Spirit, Phoenix i druge donijele su mnoštvo informacija o biogeokemijskom sastavu i fizikalnim karakteristikama Marsa temeljnih za postanak života. U narednim godinama nove misije nastavit će istraživati prijašnje i trenutne okoliše. Najveći broj dokaza o nastanjivim okolišima doprinijela je misija znanstvenog laboratorija Marsa s roverom *Curiosity*. Opremljen s različitim instrumentima, otkrili smo mineraloške i petrološke pokazatelje okoliša sposobnog za razvoj života poput sekundarnih minerala nastalih alteracijama uzrokovanih vodom te

sedimentoloških tekstura. Najvažnije su pukotine ispunjene kalcijev sulfatom jer daju mnogo informacija o vodenom okolišu tijekom njihovog nastanka. Po omjeru vodikovih izotopa, shvatilo se da je došlo do velikog gubitka atmosfere i vodene mase na Marsu. Raspravlja se o potencijalnom biogenom izvoru pronađenih organskih spojeva klorbenzena, nitrata i metana. Nadalje, privremeni vodeni tokovi bogati perkloratnim solima, zabilježeni samo u specifičnim uvjetima, nagovještavaju nam nekadašnju nastanjivost okoliša na Marsu. Doduše, ovakve slane otopine ne mogu podržati život pri današnjim uvjetima. U konačnici, najvažniji kriterij je vrijeme – uvjeti su mogli biti bolji nego na prvobitnoj Zemlji, ali ako nisu ustrajali dovoljno dugo život se nije mogao razviti.

11. Summary

Because of its proximity and similarity to Earth, Mars is one of the best candidates for exploration of extraterrestrial life and potential planetary habitability. Modern exploration of Mars began in 1971. In the last 15 years probes Opportunity, Spirit, Phoenix and others have brought a wealth of information on the biogeochemical composition and physical characteristics of Mars fundamental for the genesis of life. In the coming years the new mission will continue to investigate former and current environments. The mission Mars Science Laboratory with its Curiosity rover contributed the most evidences for habitable environments. Equipped with a variety of instruments, it found mineralogical and petrological indicators for environment capable of developing life like secondary minerals formed by hydrous alterations and sedimentological textures. The most important evidence are fractures

filled with calcium sulphate because they give a lot of information on the aquatic environment during their genesis. By the ratio of hydrogen isotopes it was realized that there was a large loss of atmosphere and body of water on Mars. We discuss the potential source of biogenic organic compounds found like chlorobenzene, nitrates and methane. Finally, a transient water flows rich in perchlorate salts, observed only under specific conditions, suggest a former habitable environment on Mars. Although, these liquid brines cannot support life in today's conditions. In the end, the most important criterion is time – conditions could have been better than on primordial Earth but if they hadn't persisted long enough life couldn't have developed.

Literatura

- Downs R.T., 2015. Determining Mineralogy on Mars with the CheMin X-Ray Diffractometer. *Elements* **11(1)**, 45–50.
- Freissinet C. i sur., 2015. Organic molecules in the Sheepbed Mudstone, Gale Crater, Mars. *Journal of Geophysical Research Planets* **120**, 495–514
- Gellert R., Clark B.C., 2015. In Situ Compositional Measurements of Rocks and Soils with the Alpha Particle X-ray Spectrometer on NASA's Mars Rovers. *Elements* **11(1)**, 39–44.
- Glavin D.P. i sur., 2014. Origin of Chlorobenzene Detected by the Curiosity Rover in Yellowknife Bay: Evidence for Martian Organics in the Sheepbed Mudstone?. *45th Lunar and Planetary Science Conference*
- Grotzinger J.P. i sur., 2015. Curiosity's Mission of Exploration at Gale Crater, Mars. *Elements* **11(1)**, 19–26.
- De Haas T. i sur., 2015. Earth-like aqueous debris-flow activity on Mars at high orbital obliquity in the last million years. *Nature Communications* **6**, 7543
- Kah L.C., 2015. Images from Curiosity: A New Look at Mars. *Elements* **11(1)**, 27–32.
- Mahaffy P.R., Conrad P.G., 2015. Volatile and Isotopic Imprints of Ancient Mars. *Elements* **11(1)**, 51–56.
- Mahaffy P.R. i sur., 2013. Abundance and Isotopic Composition of Gases in the Martian Atmosphere from the Curiosity Rover. *Science* **341(6143)**, 263–266.
- Martin, W., Russell M.J., 2007. On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **362(1486)**, 1887–1925.
- Martin W., Russell M.J., 2002. On the origins of cells: a hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic prokaryotes, and from prokaryotes to nucleated cells. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* **358(1429)**, 59–85.
- Martín-Torres F.J. i sur., 2015. Transient liquid water and water activity at Gale crater on Mars. *Nature Geoscience* **8**, 357–361.
- McEwen A.S. i sur., 2014. Recurring slope lineae in equatorial regions of Mars. *Nature Geoscience* **7(1)**, 53–58.
- Shayler D. i sur., 2005. Marswalk One: First steps on a new planet, Springer, u suradnji s Praxis Publishing, Berlin

- Stern J.C. i sur., 2015. Evidence for indigenous nitrogen in sedimentary and aeolian deposits from the Curiosity rover investigations at Gale crater, Mars. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **112(14)**, 4245–4250.
- Taylor S.R., McLennan S.M., 2009. Planetary Crusts, Cambridge University Press, New York.
- Wiens R.C., Maurice S., 2015. ChemCam: Chemostratigraphy by the First Mars Microprobe. *Elements* **11(1)**, 33–38.
- Yung Y., Chen P., 2015. Methane on Mars. *Journal of Astrobiology & Outreach* **03(01)**, 3–5.

Mrežni izvori

- URL 1.: <http://phl.upr.edu/home>
- URL 2.: http://ssd.jpl.nasa.gov/?planet_phys_par
- URL 3.: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html>
- URL 4.: <http://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=4615>
- URL 5.: https://en.wikipedia.org/wiki/Exploration_of_Mars
- URL 6.: http://www.nasa.gov/mission_pages/msl/multimedia/gallery/pia14305.html
- URL 7.: <http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=pia19076>
- URL 8.: <http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA16794>
- URL 9.: <http://www.nasa.gov/jpl/msl/pia19088/>