

Univerzitet u Beogradu
Matematički fakultet

Rakić Milica

GEOLOŠKA ISTORIJA MARSA

Seminarski rad iz predmeta Opšta astrofizika

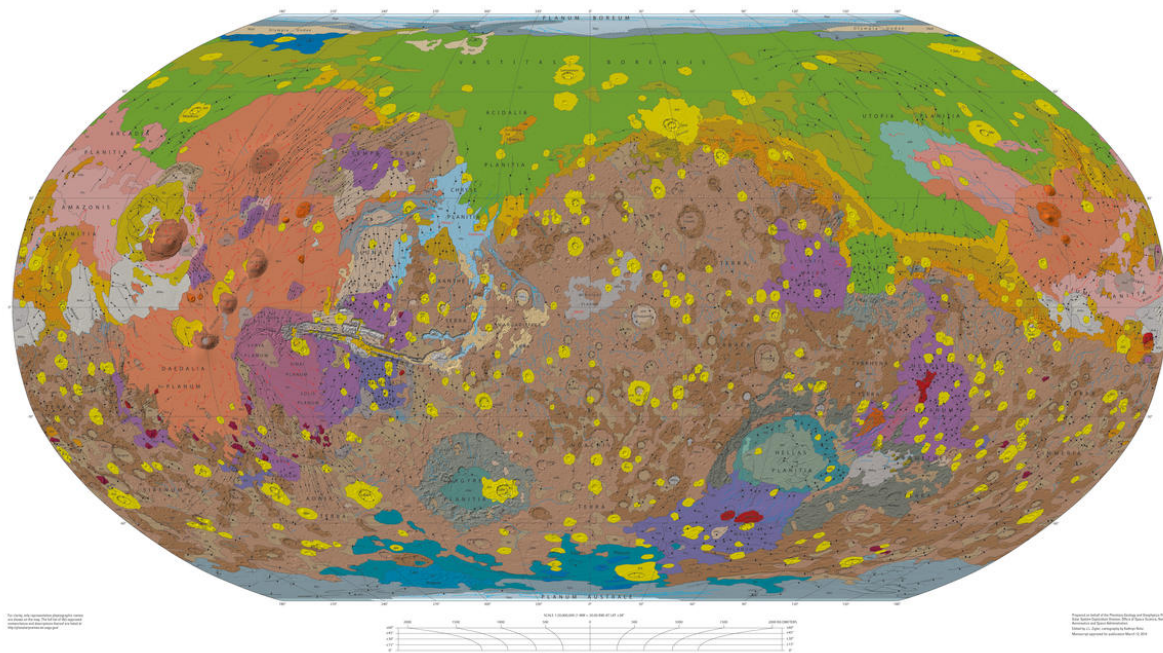
Beograd, 2018.

Sadržaj

1	Uvod	2
2	Geološki periodi	3
2.1	Noakijski period (<i>Pre 4.1 - 3.7 milijardi godina</i>)	3
2.1.1	Erozioni procesi	4
2.1.2	Mreža kanala	5
2.1.3	Klimatski uslovi	6
2.2	Hisperijski period (<i>Pre 3.7 - 2.9 milijardi godina</i>)	7
2.2.1	Uvale i kanali	7
2.2.2	Okeani	8
2.2.3	Sulfati	9
2.3	Amazonski period (<i>Od pre 2.9 milijardi godina do danas</i>)	10
2.3.1	Led	11
2.3.2	Fluvijalni procesi	11
2.3.3	Polovi	12
3	Globalna (hemisferična) dihotomija	13
3.1	Hipoteza o jednom udaru	13
3.2	Hipoteza o endogenom nastanku	14
4	Zaključak	15
	Literatura	16

1 Uvod

Mars je u moderno vreme, sa dobrim razlogom, postao jako aktuelna tema. Zbog svojih najvećih vulkana i dubokih kanjona, slabog magnetnog polja i misterije o postojanju vode i života, kao i potencijala za interplanetarnu kolonizaciju, naša tehnologija se razvijala, a ambicije širile u pravcu Marsa. On je oduvek imao opravdan razlog za svu pažnju. Međutim, iako je aktuelna tema, retko se govori o istoriji Marsa i kako je on postao ovakav kakav je danas. Odakle baš toliki vulkani, zašto više nema vode i ako ona postoji gde bi mogla biti i kako Marsovo orbitalno kretanje utiče na geološke uslove na površini neka su od pitanja na koja tražimo odgovore. U ovom radu ću pokušati da se ukratko osvrnem na sve ove teme.



Slika 1: Globalna geološka mapa Marsa, napravljena kompozicijom raznih slika i merenja.

2 Geološki periodi

Geološka istorija Marsa se deli na tri glavna perioda, gde je svaki dobio ime po jednom regionu na Marsu:

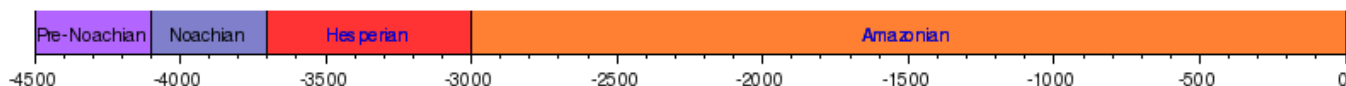
1. Noakijski period (*Noachian*)
2. Hesperijski period (*Hesperian*)
3. Amazonski period (*Amazonian*)

Pored njih, često se spominje još jedan period, *Pre-Noachian*, iako konkretnih dokaza za njegovo postojanje nema. Smatra se da je za vreme ovog perioda pre 4.5 milijardi godina, kad je i nastajala njegova kora, Mars pretrpeo ogromnu količinu udara kometa i asteroida, što je stvorilo danas dve reljefno različite hemisfere (pojava poznata kao *globalna dihotomija*).

Smatra se da je početkom ovog perioda inicijalna atmosfera koja je nastala delom od gasova koji su izbacivani iz Marsovog omotača a delom od udara asteroida i drugog svemirskog kamenja o površinu Marsa počela da se hladi, sve dok se u jednom trenutku vodena para iz te atmosfere nije kondenzovala u tečnu vodu, koja je u vidu okeana prekrivala deo Marsove površine.

Ako je na Marsu ikada postojao život u onom vidu kakvom ga mi poznajemo, pretpostavka je da je u okeanu, koji je nastavio da se hladi, dostignuta temperatura povoljna za razvijanje života i to u periodu od pre 4.4 — 4.3 milijardi godina. Nakon toga, veći deo atmosfere, koja se sastojala od lakih elemenata, je usled sunčevog vetra odnet u međuplanetarni prostor.

Zbog konstantnog prikupljanja novih podataka, ovi vremenski periodi, njihove granice i njihove karakteristike su podložne promenama i adaptacijama.



Slika 2: Vremenski periodi Marsa dati u milionima godina.

2.1 Noakijski period (*Pre 4.1 - 3.7 milijardi godina*)

Ovaj vremenski period je dobio ime po regionu na Marsu, punom kratera, koji je nazvan "Nojeva zemlja" (odnosi se na priču o Nojevoj barci iz Biblije).

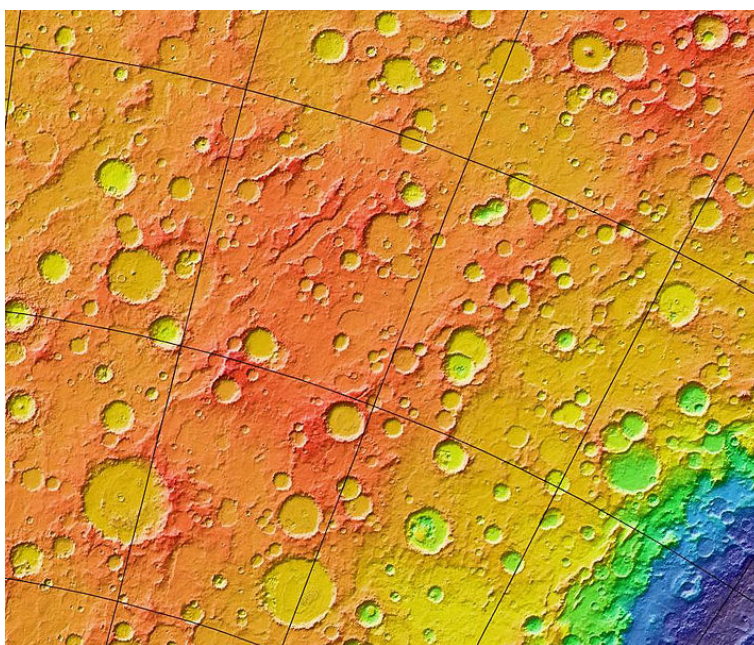
Najizraženije osobine Noakijskog perioda u poređenju sa kasnijim su: velika količina novonastalih kratera, erozija, formiranje dolina i akumulacija većeg dela *Tharsis* visoravni. Za vreme Noakijskog perioda Mars je i dalje bio aktivno bombardovan mnoštvom asteroida, koji su stvorili današnje najveće i dobro poznate kratere i basene. Istovremeno je krenula izuzetna vulkanska aktivnost danas najvećih vulkana u Sunčevom sistemu. Posledica svih ovih aktivnosti je bilo pucanje Marsove kore i stvaranje ogromne uvale *Valles Marineris*.

Najveći deo vulkanske aktivnosti je verovatno bio koncentrisan u *Tharsis* visoravni širine 5000km i visine 9km, koja je do te veličine 'narasla' do kraja Noakijana (Phillips et al., 2001). Skoro na svim ostalim delovima Marsa, količina kore koja izbija na površinu je malim delom bila usled vulkanske aktivnosti i većinom usled udara asteroida. Većina kamenja i stena iz kratera na severnoj polulopti su verovatno primarno vulkansko kamenje (Bandfield et al., 2008) ili

vulkansko kamenje izbačeno nakon udara. Velika količina pomenutog kraterskog stenja prošla je kroz vodene promene, što ukazuje na cirkulaciju tečnosti kroz ta područja. Formacija Tharsisa je kao posledicu ostavila globalnu distorziju Marsove litosfere, pa samim tim i gravitacione anomalije (Phillips et al., 2001). Približno $3 \cdot 10^8 \text{km}^3$ stenja se akumuliralo kako bi nastala Tharsis visoravan, što je ekvivalent globalnom sloju debljine 2km koji bi pokrивao površinu Marsa.

Snažne vulkanske erupcije su izbacivale gasove i pepeo u atmosferu stvarajući tako efekat staklene bašte, usled čega je planeta počela da se zagreva. Verovatno je to dovelo do stvaranja oblaka i čestih i obimnih padavina, kojima bi se mogli objasniti razni putevi vode u stenama koje su otkrivene u novom dobu. Ova činjenica je jedan snažan argument o mogućem postojanju vode na površini Marsa.

Kako je planeta zajedno sa svojom unutrašnjosti nastavila da se hladi, magnetno polje Marsa je slabilo i više nije imalo globalni karakter. Zone pogodne za život su postepeno postajale manje i lokalizovane, sve dok uslovi za njihovo postojanje više nisu bili prisutni.



Slika 3: Region 'Nojeva zemlja'. Primetno je popunjen velikim brojem kratera, što ukazuje na stariji geološki period. Boje ukazuju na elevaciju, gde su crvenom dati najviši a plavom najniži regioni.

2.1.1 Erozioni procesi

Tereni koji datiraju iz Noakijskog perioda pokazuju znatno viši nivo erozije u poređenju sa mlađim terenima iz kasnijih perioda. Dok su Hisperijski krateri do par kilometara u prečniku generalno očuvani, Noakijski krateri prečnika i od par stotina kilometara imaju erodirane obode i parcijalno popunjene unutrašnjosti. Ovaj kontrast ukazuje na osetan pad u erozionoj aktivnosti na kraju Noakijskog perioda (Craddock and Howard, 2002).

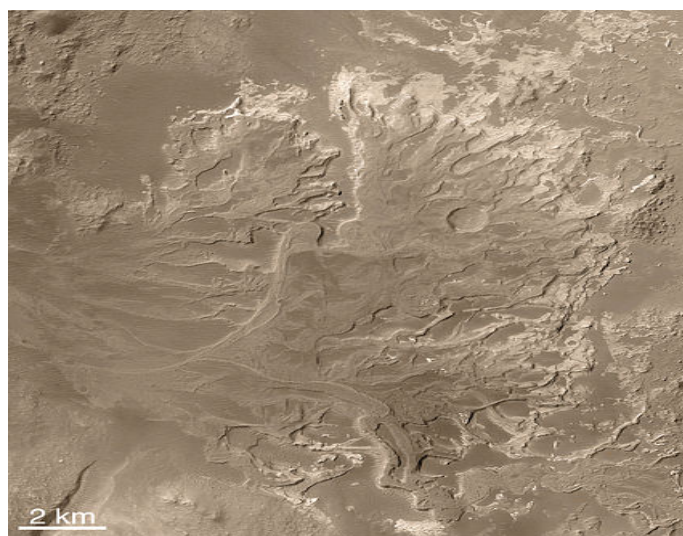
Golombek i Bridges su, sumirajući sve podatke prikupljene o erozionoj aktivnosti Marsa, zaključili da su erozione stope tokom Noakijana 2 do 5 puta veće od svih kasnijih perioda, ali ma-

nje od srednje vrednosti za erozivne procese starog kratona¹ na Zemlji. Međutim, određivanje stopa geoloških procesa na Zemlji, uključujući erozione procese, zavisi od vremenskog intervala u kom se proces meri (Gardner et al., 1987). Što je duži vremenski interval, manja je procenjena stopa. To je posledica činjenice da što se u dužem vremenskom intervalu meri, veća je verovatnoća da se u njemu nađu periodi bez aktivnosti. U tom smislu nije sigurno tvrditi da je ovaj teren mlađi i generalno je nesigurno vršiti ovakvo poređenje sa Zemljinim terenom.

2.1.2 Mreža kanala

Veliki deo Noakijskog terena je ispresecan mnoštvom uvala koje su međusobno povezane. Većina njih se 'uliva' u lokalne niske terene i nisu duže od par stotina kilometara. Postoji malo indikacija da je formiranje ovakvih uvala posledica generalnog spuštanja i sleganja zemljišta. Naučna zajednica je mišljenja da su kanali nastali primarno proticanjem vode, iako ovo nije u potpunosti dokazano. Mnoštvo niskih terena, nalik kraterima, nosi indikacije postojanja jezera u njima. U tim regionima se mogu primetiti formacije na površini koje liče na delte, prevashodno izražajne u kraterima Eberswalde i Holden. Dimenzije kanala koje izlaze iz ovih kratera, za koje se pretpostavlja da su odvodili vodu u te regione, mogu se porediti sa veličinom sličnih basena na Zemlji (Moore et al., 2003).

Jedan indikator postojanja jezera su depoziti hlora u stenama, koji mogu biti posledica isparavanja vode. Takođe, jako značajno otkriće u Eberswalde delti su slojevi gline. Glina se formira u vodama čija je pH vrednost približna neutralnoj (~ 7), što nam ukazuje da bi ovakva vrsta sredine mogla da podrži život i potencijalno se njegovi ostaci (fosili) mogu naći očuvani u glini.



Slika 4: Deo Eberswalde kratera i prikaz njegove delte.

Howard i saradnici su 2005. godine napravili razliku između generalne degradacije terena i formacije mreža kanala. Oni predlažu da je tokom većine Noakijana postojala fluvijalna erozija oboda kratera i drugih visoravni, kao i parcijalno popunjavanje udubljenja kratera. Takođe tvrde da je formacija mreža kanala fundamentalno različita od tih procesa i da, iako se dešavala simultano sa degradacijom okolnog terena, nije imala značajan udeo u tom procesu.

Česta pojava u kraterima, kanjonima i ostalim Noakijskim terenima je slojevitost stenje od različitih materijala i starosti. Pokazalo se da je ova slojevitost periodično nastajala, ponekad čak sa jako preciznom periodom (Lewis et al., 2008). Ona je mogla da nastane iz više razloga:

¹Kraton - stabilni i stari deo čvrstog omotača Zemlje, uglavnom u unutrašnjosti tektonskih ploča.

učestalim udarima i vulkanskim erupcijama ili promenom erozionog režima usled klimatskih promena. Iako su ova tri procesa doprinela pojavi slojevitosti, precizna periodičnost odbacuje mogućnost vulkanskih erupcija i udara kao primarnih uzroka. Sa druge strane, ovu periodičnost lepo mogu da opišu astronomske promene povezane sa periodičnim promenama u orbitalnom i rotacionom kretanju Marsa (Laskar et al., 2004).

Široko rasprostranjeni kanali u Noakijskom terenu i uvale koje deluju kao baseni jezera ukazuju na makar periodično postojanje kiša, reka i toplih površinskih uslova na Marsu. Ipak, nije sigurno koliko su ti uslovi bili stacionarni i da li je ikada postojao globalni hidrološki sistem u kom su tokovi vode bili uravnoteženi sa procesima isparavanja i sublimacije velikih vodenih površina. Uprkos svemu Noakijanski period je onaj za koji imamo najviše dokaza za tople vremenske uslove u kojima bi postojanje okeana bilo moguće. Clifford i Parker (2001) su odredili, procenom brojnosti i zapremine kanala, basena, uvala i ostalih potencijalnih skladišta vode, da je jedna trećina planete bila pokrivena okeanima tokom delova Noakijskog perioda. Problem je što je nalaženje dokaza koji bi podržali ovu teoriju izuzetno teško, jer su oni osetljivi na geološke promene i mogu se izbrisati erozijom i zatrpavanjem zemljišta. Upravo iz svih ovih razloga postojanje okeana na Marsu ostaje do danas sporna tema.

2.1.3 Klimatski uslovi

Geomorfološki dokazi o postojanju jezera i reka, prisustvo silikata (nastaju kao jedan od glavnih produkata eluvijalnih procesa, specifično hemijskih koji se javljaju pod dejstvom promena temperature i količine vode u atmosferi), dokazi postojanja tokova vode na površini i skladišta hlora u stenama (ostaju nakon isparavanja slane vode gde su rastvoreni u vidu soli) ukazuju na makar povremene tople periode tokom i pri kraju Noakijanskog perioda.

Istaživanjem uticaja gasova staklene bašte na temperaturu Marsa, prevashodno uticajem atmosfere bogate CO_2 , Kasting je 1991. utvrdio da je teško podići globalnu temperaturu dovoljno da bi postojale padavine na mladom Marsu sa samo CO_2 i H_2O gasovima u atmosferi, delom zbog Marsove razdaljine od Sunca i očekivane male energije zračenja Sunca u tom periodu. Ako je Mars bio makar povremeno topao i pun vode, morao je postojati još neki mehanizam pored $CO_2 - H_2O$ gasova. Mogući drugi mehanizmi uključuju druge gasove staklene bašte kao što su SO_2 i CH_4 ili efekte velikih klimatskih perturbacija usled spoljnih udara ili vulkanizma. Veliki udari bi zagrejali površinu i doveli do dovoljne količine vode u atmosferu koja bi kasnije izazvala dugotrajne padavine, odgovorne za kreaciju uvala u Marsovom terenu.

Problemi modela nastanka uvala putem udara asteroida su sledeći:

- Kao posledica udara nastaju daleko niže količine padavina od potrebnih za primetnu eroziju terena.
- Svi Noakijski krateri, koji su nastali udarima asteroida dovoljnih veličina za proizvodnju značajnih količina padavina, su daleko stariji od uvala koje treba da se formiraju u približno istom periodu kao i ti krateri. O njihovoj starosti svedoči veliki erozioni raspad kratera.

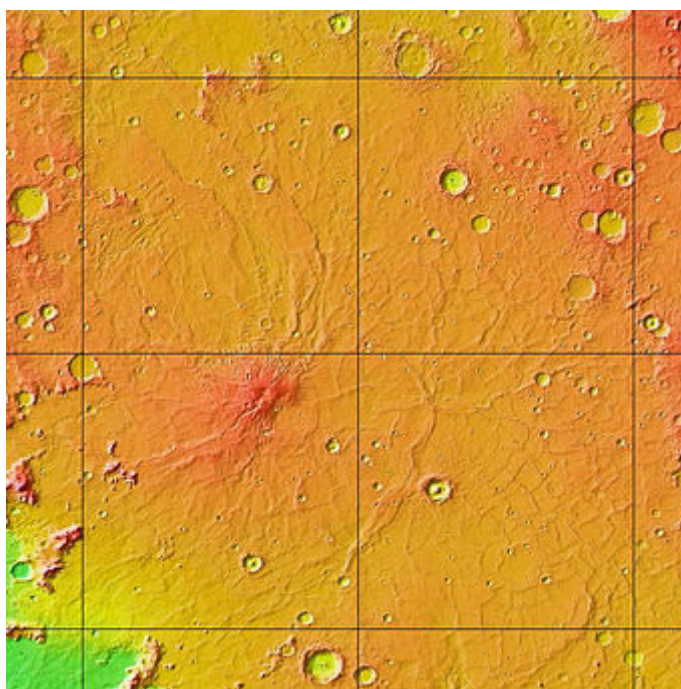
Kao zaključak možemo reći da, iako geomorfološki dokazi za tople uslove za vreme Noakijskog perioda postoje, i dalje nije objašnjeno kako je uopšte došlo do takvih klimatskih uslova.

2.2 Hisperijski period (*Pre 3.7 - 2.9 milijardi godina*)

Ovaj vremenski period je dobio ime po regionu zvanom Hisperijska nizija. Kao i za prethodni period koreni ove reči potiču iz Biblije. *Hisperia* je grčko-latinski izraz za 'zapadne zemlje' (što je za stare Grke i Rimljane uglavnom predstavljalo Italiju).

Tokom ovog perioda, za razliku od Noakijskog, količina udara asteroida o Mars je znatno opala, kao i formacija novih uvala i erozivnih procesa. Ono što karakteriše ovaj period su snažne i učestale vulkanske aktivnosti koje postaju glavni geološki proces na Marsu u ovom periodu. Tada nastaju svi najveći vulkani na Marsu, uključujući *Olympus Mons*, i posledica ovog perioda je 'izronjavanje' oko 30% Marsove površine (Head et al., 2002). Ove vulkanske aktivnosti su izbacile razne gasove u atmosferu među kojima su bili sumpor dioksid (SO_2) i hidrogen sulfid (H_2S). Ovi gasovi su se mešali i reagovali praveći sumpornu kiselinu (H_2SO_4), koja je posle u vidu kiše padala na površinu Marsa i mešala se sa vodom, čineći je kiselijom. Posledice ovoga su sumporni depoziti koji predstavljaju dokaz hemijske promene stena usled kisele površinske vode.

Daljim hlađenjem planete, sva voda na površini se zamrzla i bila je prisutna u vidu leda na površini Marsa i ispod nje. Međutim, prilikom velike vulkanske aktivnosti ili usled pomeranja tektonskih ploča, ovaj led bi se zagrejao i otopio, što je zatim dovodilo do intenzivnog izlivanja vode i stvaranja poplava. Veruje se da su ove periodične poplave bile kratkotrajne i veoma intenzivne. Sva voda bi zatim putem kanala bila sprovedena do severne hemisfere gde bi se grupisala u vidu jezera i ubrzo potom zaledila.



Slika 5: Region Hisperijska nizija. Postojanje malog broja kratera ukazuje na mlađu geološku istoriju terena. Boje ukazuju na elevaciju, gde su crvenom dati najviši a plavom najniži regioni.

2.2.1 Uvale i kanali

Brzina nastajanja mreža kanala i uvala je opala do početka Hisperijskog perioda (Fassett and Head, 2008). Međutim, uprkos tom padu, postoje primeri kanala koji su se formirali tokom Hisperijskog pa čak i Amazonskog perioda, iz čega možemo da zaključimo da, iako je došlo do eksponencijalnog pada formiranja na kraju Noakijana, uslovi su periodično dozvoljavali eroziju i

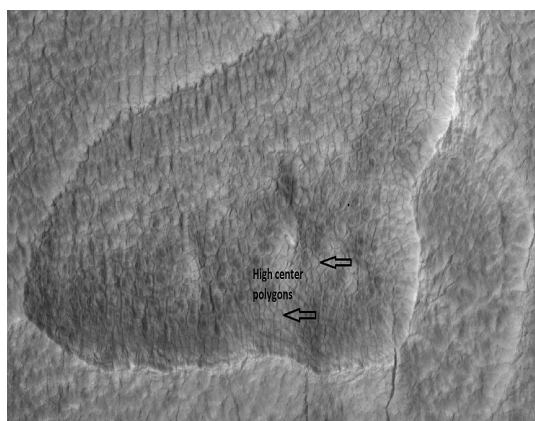
formiranje kanala, bar lokalno. Postojala je sumnja da uslovi koji su omogućavali ove formacije tokom Hisperijskog perioda nisu istog porekla kao i oni za vreme Noakijskog perioda. Fasset i Head su uporedili mlađe i starije mreže kanala i zaključili da su neki mlađi kanali nastali usled zagrevanja utabanog snega na vulkanima, a ne zbog klimatskih promena. Pored toga, mnogi od najvećih kanala su nastali upravo za vreme Hisperijskog perioda. Važno pitanje je da li su ovi kanali nastali oticanjem vode ili usled proticanja lave koja je za sobom ostavila ovakve oblike u reljefu.

Činjenica koja podržava teoriju da je tuda tekla voda su ostaci bogati sulfatnim depozitima. Ako pretpostavimo da je ona i tačna, to znači da su morale postojati velike vodene površine na Marsu u kojima bi se skupljala voda nakon prestanka poplava. Sa druge strane, činjenica da su svi kanali naglo nastali ukazuje da oni nisu oformljeni proticanjem vode nakon padavina, već brzim izlivanjem velike količine vode. Mesta na kojima je ta voda mogla da se akumulira pre izlivanja su mogli biti izdani (prirodna akumulacija podzemne vode iznad vodonepropusnog sloja stena koja se formira infiltracijom površinskih voda ili voda nastalih od atmosferskih taloga), okeani, led ili, što je i najverovatnije, kombinacija sva tri.

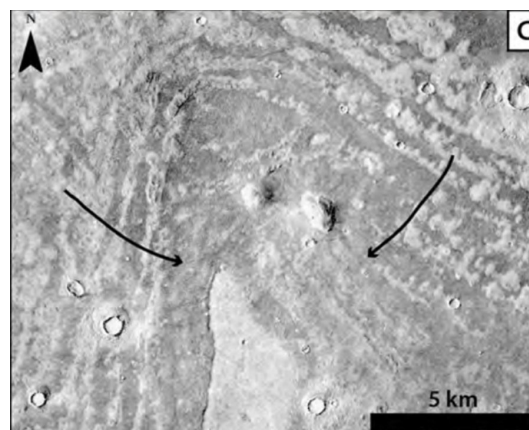
Napravljene su brojne procene koliki bi bio protok vode i njena zapremina prilikom maksimuma padavina i poplava. Da bi se dobio odgovor na ovo pitanje potrebno je znati koliko dugo su poplave trajale i koliko su bile intenzivne. Ono što se u datom trenutku može izmeriti je dubina i širina određenih kanala, pomoću čega možemo proceniti njihovu zapreminu, međutim, to nam samo daje maksimalnu moguću zapreminu poplave, ne i njenu realnu vrednost. Većina procena daje da je za najveće kanale brzina protoka vode bila od 10^7 do $10^8 \frac{m^3}{s}$ (Carr and Head, 2009; Leask et al., 2007; Ghatan et al., 2005). Ipak, i sa ovim procenama je i dalje neodređeno koliko je vode ostajalo nakon poplava u vidu jezera ili okeana.

2.2.2 Okeani

Ako su već pomenuti kanali nastali poplavama, što je verovatno, onda su morale postojati velike vodene površine, pre svega u severnim delovima (Parker et al., 1989, 1993), gde bi se ta voda mogla akumulirati i odakle je dalje isticala. Međutim, dokazi za njihovo postojanje i dalje ostaju nepotpuni, iako je do sad detektovano par potencijalnih obala ovakvih površina (misli se na obale okeana i/ili jezera) u severnim nizijama i *Hellas* basenu. Dokaz ove teorije predstavljaju delimično zakopani krateri, pokopani sedimentima nošenim poplavama, koji bi se na kraju sakupljali u ovim kraterima (Kreslavsky and Head, 2002). Takođe, postoje i određene formacije (teren nalik na otisak prsta i poligonalni oblici) koje ukazuju na postojanje leda koji je nastao nakon zaleđivanja vodenih površina.



(a) Slika poligonalnih oblika u Kasius četvorouglu.



(b) Slika terena nalik otisku prsta.

Dokaz protiv postojanja velikih vodenih površina na Marsu je odsustvo (tj. za sad odsustvo detekcije) evaporita² i postojanje velikog stenja, veličine do dva metra u prečniku, u niskim terenima gde bi sitni i uglančani sedimenti trebalo da postoje po hipotezi o poplavama (McEwen et al., 2007). Međutim, i pored ovih nejasnoća, najveći problem ove teorije ostaje u pitanju gde su ove velike količine vode otišle.

2.2.3 Sulfati

Velike količine sulfata³ su dosad otkrivene sletanjem MER⁴ misija na površinu Marsa, a i iz orbite, sa najvećom koncentracijom u *Meridiani* niziji i oko severnog pola. Većina područja koja ih sadrže potiču iz Noakijanskog perioda, međutim, ustanovljeno je da su depoziti sulfata koji se nalaze u depresijama znatno mlađi, dok su oni oko severnog pola skoro sigurno iz Amazonskog doba (Milliken et al., 2009).

Uzorci depozita sumpora, koje je rover Opportunity istražio u *Meridiani* niziji, predstavljaju deo strukture jednog sloja depozita koji se proteže radijalno u svim pravcima dužinom oko 600 km i debljinom od par stotina metara. Eksperimenti koje je sproveo rover nad uzrocima depozita ukazuju da se oni sastoje u podjednakim udelima od sulfata i izmenjenog bazalta koji je osiromašen za 50% od originalne količine Fe, Mg i Ca (Squyres et al., 2006).

Minerali sulfata mogu nastati direktno eluvijalnim procesom raspada bazalta usled kiselih tečnosti bogatih sulfatima ili isparivanjem istih tih tečnosti. Što se više bazalt raspada, to je bogatija tečnost sulfatom i sredina je sve kiselija. Krajnja promena minerala i kiselost tečnosti zavise od trenutka kada je ovaj raspad prekinut (Carr and Head, 2010). Stanje svakog gasa koji ispari će takođe zavisiti od stanja tečnosti pre isparavanja i nivoa do kog je raspadanje prethodnih minerala dospelo. Zbog ovih uslova tj. zavisnosti finalnog produkta od trenutka prekida raspada, posledice eluvijalnih procesa su raznovrsne.

Generalno govoreći, postoji doba prelaska između kraja Noakijanskog perioda, kada su prevažno nastajali filosilikati (SiO_4^{-4}), i početka Hisperijskog perioda, kada kreće produkcija sulfata. Bibring i saradnici su 2006. u svom istraživanju došli do zaključka da je do ovog prelaznog perioda došlo usled masivne erupcije sumpora prilikom formiranja *Tharsis* vulkanskog platoa. Postoji i druga mogućnost, da je do povećanog nivoa sumpura došlo usled erupcije koja je formirala Hisperijske vulkane (Head et al., 2002).

²Evaporit je mineralni sediment koji nastaje kristalizacijom nakon isparavanja vode.

³Sulfati su jedinjenja koja u sebi sadrže SO_4^{-2} .

⁴MER-Mars Exploration Rover

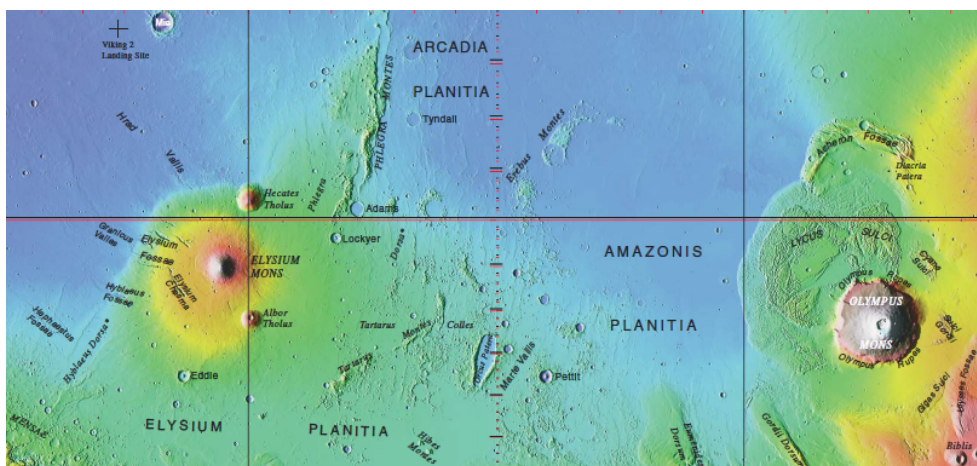
2.3 Amazonski period (*Od pre 2.9 milijardi godina do danas*)

Ovaj period je dobio ime po regionu 'Amazonska nizija' lociranom na Marsovoj severnoj hemisferi. Pojam Amazonke potiče iz grčke mitologije. Smatra se da su one bile pripadnice drevnog naroda žena ratnika. Sam koren reči Amazonke nije poznat, međutim najverovatnije je proistekao iz iranskog etnonima⁵ *ha-mazan*, što znači 'ratnici'.

Prelaz sa Hisperijskog na Amazonski period je veoma neodređen i neprecizno definisan. Uzeto je da je on počeo pre približno 2.9 milijardi godina i do sada obuhvata dve trećine sveukupne istorije Marsa. Međutim, treba uzeti u obzir da su greške određivanja starosti ovog perioda reda 500 miliona godina i (kako nisu uopšte male) one su jedan od razloga njegove loše određenosti. Ovaj period karakteriše odsustvo znatnih geoloških i klimatskih promena. Površina planete je suva i oblikovana, atmosfera je razređena. Primetnije promene nastaju jedino tokom kratkotrajnih toplijih i vlažnijih perioda. Najvažnije odlike ovog perioda čine kretanje i promena leda i vetra.

Iako retka, vulkanska aktivnost i dalje postoji i to pretežno oko i u *Tharsis* regionu. Hartmann i Neukum (2001) su procenili da je vulkanska aktivnost od vremena Hisperijana opala za 10% i ostala periodična. Vulkanizacija tokom Amazonijana su vidno različiti od Hisperijskih po terenu koji je retko naboran ali je zato bogat kanalima kojim je tekla lava. Mars je vulkanski aktivan i dan danas, doduše periodično i sa malim brojem erupcija u poređenju sa prethodnih stotina hiljada godina.

Uticaj vetra je u poslednjem dobu sveprisutan, uzimajući da se na svakom delu Marsove površine mogu naći dine. Međutim, stepen očuvanosti originalne teksture vulkanskih tokova i izbačenih materijala od udara ukazuju da je erozija stena vetrom jako mala i zanemarljiva. Među mnogobrojnim dokazima prisustva vetra su: izbrazdane površine, krateri sa materijalom koji pokriva centralni deo, dine, slojevi depozita itd.



Slika 7: Region Amazonska nizija. Odsustvo kratera ukazuje na geološki veoma mlad teren. Boje ukazuju na elevaciju, gde su crvenom dati najviši a plavom najniži regioni.

⁵Etnonim - imenica kojom se označavaju pripadnici etničkih grupa, naroda i plemena.

2.3.1 Led

Led je verovatno imao bitnu ulogu u oblikovanju terena kroz veliki deo Marsove istorije a pogotovo za vreme Amazonskog perioda. Od srednjih ka višim latitudama led je u nestabilnom stanju na površini tokom leta, jer dolazi do znatnih promena temperature, dovoljnih da se led topi. Međutim, uticaj fluktuacija između noćnih i dnevnih temperatura opada sa dubinom od površine. Modeliranjem je ustanovljeno da led može biti stabilan u čvrstom stanju par desetina centimetara ispod površine, gde ta dubina zavisi od geografske latituda i provodnosti materijala koji prekriva led (Mellon and Jakosky, 1995).

Na geografskim latitudama koje su mnogo manje od 60° , spektrometrima koji se nalaze u orbiti oko Marsa, nisu uočene veće strukture leda iako postoje geološki indikatori za njihovo postojanje do čak 30° latituda (Mustard et al., 2001). Posmatranja ukazuju da postoje velike količine leda na latitudama od $25^\circ - 30^\circ$ na dubinama prevelikim za detekciju spektrometrima.

Takođe, na stabilnost leda na površini Marsa utiče nagib Marsove ose rotacije u odnosu na ekliptiku. Za razliku od ugla Zemljine ose rotacije, koji se malo menja kroz epohe, promene nagiba za Mars su krajnje drastične. Tokom perioda velikog nagiba, led se preraspoređuje i prelazi sa polova na regione manje latituda (Mellon and Jakosky, 1995), dok tokom perioda manjih nagiba važi suprotno. Tokom trenutne epohe ovaj nagib osciluje između 15° i 35° sa nekom srednjom vrednošću od 24° . Međutim, Laskar et al. (2004) su procenili da srednja vrednost nagiba tokom cele istorije Marsa iznosi 40° i da postoji šansa od 63% da je nagib dostigao vrednost od 60° u zadnjih milijardu godina. Pri nagibima većim od 54° srednja osunčanost polova je veća nego na ekvatoru. Štaviše, najveća osunčanost koja se dobija tokom letnjih meseci kada su polovi i delovi oko njih konstantno obasjani, dovodi do zagrevanja terena do većih dubina (Costard et al., 2002) što znači da dolazi do premeštanja leda sa polova na ekvator.

Tokom Amazonskog perioda dolazi i do formacije glečera u pojasu od $30^\circ - 55^\circ$ latituda. Jaki dokazi njihovog postojanja su pretežno nađeni na vulkanima *Tharsis* regiona u vidu morena⁶. Pretpostavka je da su glečeri promenili vulkanske površine i za sobom ostavili morene (Kadish et al., 2008). Takođe, njihovo postojanje potvrđuje modeliranje cirkulacije atmosfere, koje ukazuje da su severozapadni obodi vulkana najčešća mesta gde dolazi do snežnih padavina tokom perioda većeg nagiba ose rotacije, što predstavlja podoban teren za formiranje glečera (Forget et al., 2006).

Glavno pitanje ostaje gde i kako se led prvobitno pojavio. Postoji mogućnost da prvobitna pojava leda datira još od poznog Hisperijskog perioda, kao posledica velikih poplava, ili čak i ranije, od doba Noakijana, kao posledica eluvijalnih procesa i smanjene formacije kanala. Kao druga opcija ostaje da je formiran prvobitno u doba Amazonijana, međutim odgovor na ovo pitanje još uvek nije nađen.

2.3.2 Fluvijalni procesi

Iako je glavna era u kojoj su se formirali svi kanali prošla do kraja Hisperijana, posle njega su nastali još neki mlađi kanali, ali u mnogo manjem broju. Najupečatljivije vodene strukture u ovom periodu su vododerine koje kreću od jednog kanala i onda se granaju i dele na manje kanale. Ove vododerine su široke od par metara do par desetina metara, par stotina metara dugačke i javljaju se na strmim nagibima u pojasu latituda $30^\circ - 60^\circ$ sa većom učestanošću na jugu (Dickson et al., 2009). Iako postoje razne pretpostavke za njihov nastanak, konsenzus je

⁶Morene - odlomci leda koje lednik nosi sa sobom.

da su one posledica vodene erozije, mada i dalje ostaje neodređeno koliko je vode bilo potrebno za njihovu formaciju.

U južnim visoravnima, na srednjim latitudama, gde se i najveći broj vododerina javlja, srednja dnevna vrednost temperature tokom leta varira između 220 K i 230 K, dok je površinski pritisak ispod nivoa trojne tačke vode. Ovo znači da može doći do kratkotrajne pojave tečne vode, mada ne i u dovoljnoj količini da bi izazvala eroziju vododerina (Malin et al., 2006). Kao što je već spomenuto, vododerine su najverovatnije nastale usled kratkotrajnog prisustva vode koja je nastala topljenjem leda i snega iz pojasa srednjih latituda tokom perioda velikog nagiba Marsove ose rotacije (Head et al., 2003). Ovakvo poreklo se poklapa sa rezultatima kompjuterskih modela (Williams et al., 2009) koji su povezali formaciju vododerina sa jako mladim glečerima.

Određivanje starosti vododerina nije jednostavno zbog njihovih malih dimenzija, međutim, 'skorija' istraživanja (Reiss et al., 2004; Schon et al., 2009) ukazuju da su one formirane u jako bliskoj geološkoj istoriji. Tako je fluvijalna aktivnost za zadnjih 3 milijardi godina na Marsu bila mala i javljala se usled retkih erupcija podzemnih voda, jako retkih formacija kanala i stvaranja vododerina na strmim terenima na određenim latitudama, verovatno usled topljenja leda koji je dospeo tu tokom perioda velikih nagiba ose rotacije.

2.3.3 Polovi

Najpotpuniji pregled skorašnje geološke istorije Marsa dobijamo iz tankih depozita lociranih na polovima planete. Ovi depoziti formiraju nasip centriran oko pola koji je debljine 3 km u odnosu na okolni teren. Broj kratera ukazuje da starost ove površine nije veća od 10^5 godina (Herkenhoff and Plaut, 2000). Depoziti se mogu podeliti u dve grupe: bazaltne, malog albeda i debljine do 1 km i finije, slojevite depozite debljine do 3 km (Tanaka et al., 2005). Oni se prostiru do 80° latituda i okruženi su velikim dinama bogatim gipsom (Langevin et al., 2005).

Sa druge strane, depoziti na južnom polu su komplikovaniji. Ovde se centralni nasip debljine 3 km prostire do 5° od pola, dok se nadalje nalaze tanji i stariji depoziti. Broj kratera ukazuje da starost ove površine nije veća od 10^7 godina. Razlike u starostima terena južnog i severnog pola su najverovatnije posledica razlike u njihovoj elevaciji od 6.4 km (Herkenhoff and Plaut, 2000)

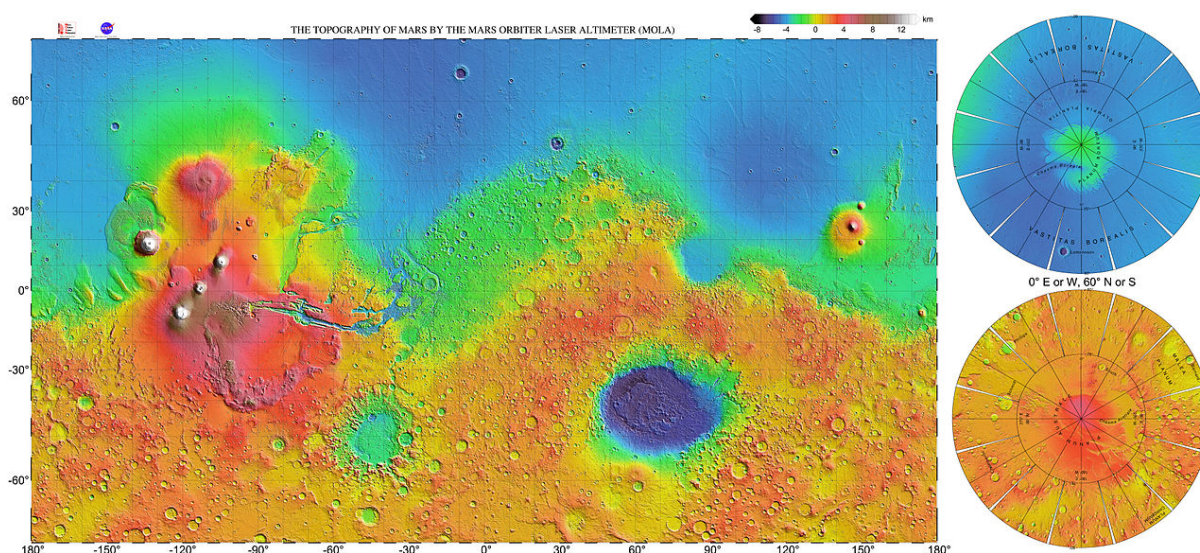
Pomenuta slojevitost se pridružuje akumulaciji prašine i leda, koji su pod uticajem orbitalnog i rotacionog kretanja Marsa. Takođe, promena nagiba orbite može uticati na stvaranje i gubljenje leda sa polova, promenu frekvencije peščanih oluja i usled toga, premeštanje depozita prašine (Toon et al., 1980). Uprkos pokušajima da se povežu slojevitost depozita i skorije promene ose rotacije, nije se došlo do konkretnih zaključaka, međutim, nema sumnje da je ova slojevitost posledica skorašnje geološke promene. Ono što nije sigurno je da li se celokupni depoziti leda na severnom polu izgube tokom perioda većeg nagiba i da li ispod njih postoje geološki stariji depoziti koji su zaštićeni od temperaturnih promena na površini.

Zvanično je mišljenje da mnoge odlike terena koje se mogu naći na srednjim latitudama predstavljaju posledice premeštanja leda sa velikih latituda i njegovog formiranja na manjim tokom perioda velikog nagiba ose rotacije, dok je skupljanje i premeštanje slojevitih depozita na polovima pojava koja se verovatno periodično odigrava kroz istoriju planete.

3 Globalna (hemisferična) dihotomija

Ova osobina je jedinstvena za Mars u celom Sunčevom sistemu i zato je dovoljno bitna da se izdvoji kao posebna tema. Gledajući mapu Marsa, ono što na prvi pogled može biti primetno je da se najstarije oblasti na Marsu koje potiču pretežno iz Noakijskog perioda nalaze na južnoj hemisferi, dok se oblasti iz Hisperijske i Amazonske epohe nalaze pretežno na severnoj hemisferi. Globalna dihotomija se odražava u razlikama u elevaciji, debljini kore i broju udarnih kratera. Njom je Mars podeljen na dve veoma različite hemisfere, južnu koja ima pozitivnu elevaciju, debelu koru i veliki broj udarnih kratera i severnu, koja ima negativnu elevaciju, tanku koru i veoma mali broj udarnih kratera (Marčeta, 2015).

Da bi se moglo pričati o topografiji i elevaciji neophodno je definisati referentnu površinu odakle ćemo meriti visine, kao što je to nivo mora na Zemlji. Pošto Mars danas nema vodenu površinu koja bi služila kao referenca, definisana je ekvipotencijalna gravitaciona površ nazvana *referentni areoid*. Na toj referentnoj površi je gravitacionalni potencijal jednak onom gravitacionom potencijalu na ekvatoru sa srednjim ekvatorskim radijusom od 3396 km (Smith et al. 1999). Oduzimanjem ove površi od modela oblika Marsa, dobija se topografski profil prikazan na slici 7.



Slika 8: Topografska karta Marsa. Prikaz globalne dihotomije niskog terena severne hemisfere i visokog terena južne hemisfere.

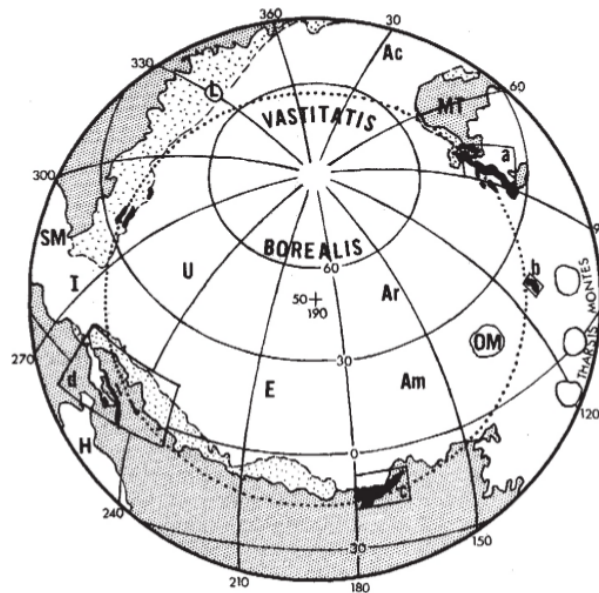
Postoje tri različite hipoteze o tome kako je došlo do globalne dihotomije: endogena (kao posledica pomeranja mantije), egzogena pomoću jednog udara i egzogena pomoću više snažnih udara. Iako se i dalje tačan način nastanka ne zna, sigurno je da je ova karakteristika nastala u ranim fazama evolucije Marsa.

3.1 Hipoteza o jednom udaru

Jedna pretpostavka je da je dihotomija nastala jednim snažnim udarom. Ovakav udar bi ostavio jednu ogromnu kružnu depresiju u Marsovom terenu i za primer se uzima basen *Borealis*. Energija koja je bila potrebna da se formira basen ovakve veličine se može odrediti iz relacije dijametar-energija: $D = KE^a h(g)$, gde je D prečnik kratera, E kinetička energija udara, K i a konstante i $h(g)$ zavisnost veličine kratera od površinske gravitacije. Uzimajući da je prečnik nastalog kratera 7700 km lako se iz prethodne relacije dobija potrebna energija udara. Dalje se uz pretpostavku o srednjoj gustini tela koje je udarilo (uzeto $3 \frac{g}{cm^3}$) i varijaciji udarne brzine

od $12 \frac{km}{s}$ do $24 \frac{km}{s}$ dobija da je prečnik udarnog tela iznosio između 600 km i 950 km (Wilhems and Squyres, 1984). Ovo je i očekivana veličina rezidualnih tela u okolini orbite Marsa nakon akrecije, i ovaj rezultat podržava teoriju o jednom udaru.

Iako bi ova teorija lepo objasnila pojavu dihotomije, postoje i činjenice koje ne idu njoj u prilog. Jedan dokaz protiv ove teorije je to što se od udara ove snage očekuje da će generisati dovoljno toplote za stvaranje vulkana na mestu udara. Međutim, gledajući teren Marsa u samom basenu *Borealis* ne postoji ni jedan vulkan. Dalji dokaz je nedovoljno tanka kora na severnoj hemisferi u odnosu na koru ispod *Helas* i *Isidis* basena, koji su nesumnjivo udarnog karaktera, ali daleko manjeg intenziteta od onog koji bi bio potreban za formiranje globalne dihotomije.



Slika 9: Slika basena Borealis kao posledice snažnog udara koji je proizveo globalnu dihotomiju.

3.2 Hipoteza o endogenom nastanku

Ova hipoteza pretpostavlja da su postojali tektonski procesi u ranoj istoriji Marsa i smatra da je dihotomija nastala kao posledica globalne konvekcije u omotaču jezgra. Konvektivno strujanje materijala u astenosferi jedan je od osnovnih metoda pomeranja tektonskih ploča. Istopljeni stenski materijal se penje u više i hladnije delove, gde se hladi, predajući energiju okolini i (postajući gušći) tone i vraća se ka unutrašnjim slojevima.

Kontra argument ovoj teoriji je globalno odsustvo tektonskog pomeranja na Marsu. Međutim, proučavanje endogenih procesa na Marsu je jako teško, pogotovo zato što ni slični procesi na Zemlji nisu u potpunosti razjašnjeni. Jedino dodatnim istraživanjem o pomeranju Marsove kore za vreme Noakijskog perioda se može doći do konkretnijih dokaza ove teorije. Jedan od glavnih ciljeva misije *InSight*, koja će biti lansirana ove godine, je upravo da prouči unutrašnjost Marsa i mogućnost postojanja zemljotresa na njemu koji mogu biti posledica pomeranja tektonskih ploča.

4 Zaključak

Mars je kompletno formirao svoje jezgro, omotač i koru kroz par desetina miliona godina od formacije Sunčevog sistema i većina geoloških promena se desila u prvih 1.5 milijardi godina njegove istorije. Formacija *Hellas* basena, što je najupečatljiviji deo Noakijskog perioda, se odigrala pre 4.1 - 3.8 milijardi godina. Iako se malo zna o pre-Noakijskom periodu, veruje se da njega karakterišu prisutnost jačeg magnetnog polja i intenzivno bombardovanje asteroidima, koje je dovelo do globalne dihotomije.

Noakijski period se završio pre 3.7 milijardi godina i okarakterisan je formacijom kratera, erozijom terena i formacijom uvala. Najupečatljivija reljefna promena je *Tharsis* visoravan, koja je formirana u ovo doba. Takođe, usled jakih udara asteroida, vulkanskih erupcija ili promene orbitalnih parametra Marsa postojali su uslovi za periodične, tople i kišovite periode. Prisustvo silikata i skladišta hlora u stenama ukazuju da su ove padavine bile dovoljno obimne da formiraju rečne tokove i jezera.

Velika promena nastaje pri kraju Noakijskog perioda i na početku Hisperijskog, kada je stepen udara asteroida, formacije uvala, eluvijalnih procesa i erozije eksponencijalno opao. Sa druge strane, stepen vulkanske aktivnosti je ostao visok, pa i najveći za celu Marsovu istoriju, i on je proizveo 'izronjavanje' oko 30% Marsove kore. Periodično je dolazilo do velikih poplava, uglavnom pri kraju Hisperijana, koje su verovatno za sobom ostavile velike vodene površine u severnim nizijama. Pored ovih poplava nije bilo znatne vodene aktivnosti na Marsovoj površini.

Nakon kraja Hisperijana, pre 3 milijardi godina, sve geološke promene su utihnule i danas su retke. Vulkanska aktivnost, koja je za vreme Hisperijana bila najizraženija, u Amazonskom dobu je 10 puta manja i uglavnom ograničena na *Tharsis* i *Elysim* regione. Pošto se glavna era poplava završila, i one ostaju retke, iako su se manje i periodične poplave dešavale u bliskoj istoriji. Formacija kanala je opala, erozija i eluvijalni procesi su ekstremno retki. Jedine promene koje se u ovo doba dešavaju su stvaranje vododerina i glečera usled promene, skupljanja i pokretanja leda.

Na kraju, sa svim ovim saznanjima, i dalje ostaje mnoštvo pitanja o njegovoj istoriji na koje trenutno nije moguće dati odgovor. Pitanja poput: Kakva je istorija Marsovog magnetnog polja? Kakvi su bili klimatski uslovi za vreme Noakijana? Šta je dovelo do pojave globalne dihotomije? Kakav je uticaj promene Marsove ose rotacije na geološke uslove i kako se ona menjala? Zašto se severni i južni polarni depoziti toliko razlikuju? Ako je ikad postojala tečna voda na njegovoj površini, da li je postojao i život? itd. Odgovori na ova pitanja se mogu nalaziti jedino novim misijama na Mars i daljim istraživanjem njegove geološke istorije.

Literatura

- [1] Carr, M.H., Head, J.W., 2009. Geologic history of Mars. *Earth and Planetary Science Letters* 294, 185–203.
- [2] Clifford, S.M., Parker, T.J., 2001. The evolution of the martian hydrosphere: implications for the fate of a primordial ocean and the current state of the northern plains. *Icarus* 154, 40–79.
- [3] Costard, F., Forget, F., Mangold, N., Peulvast, J.P., 2002. Formation of recent martian debris flows by melting of near-surface ground ice at high obliquity. *Science* 295, 110–113.
- [4] Craddock, R.A., Howard, A.D., 2002. The case for rainfall on a warm, wet early Mars. *J.Geophys. Res.* 107.
- [5] Dickson, J.L., Fassett, C.I., Head, J.W., 2009. Amazonian-aged fluvial valley systems in a climate microenvironment on Mars: melting of ice deposits on the interior of Lyot crater. *Geophys. Res. Lett.* 36.
- [6] Fassett, C.I., Head, J.W., 2008a. Valley network-fed, open-basin lakes on Mars: distribution and implications for Noachian surface and subsurface hydrology. *Icarus* 198, 37–56.
- [7] Fassett, C.I., Head, J.W., 2008b. The timing of martian valley network activity: constraints from buffered crater counting. *Icarus* 195, 61–89.
- [8] Forget, F., Haberle, R.M., Montmessin, F., Levrard, B., Head, J.W., 2006. Formation of glaciers on Mars by atmospheric precipitation at high obliquity. *Science* 311, 368–371.
- [9] Gardner, T.W., Jorgensen, D.W., Shuman, C., Lemieux, C.R., 1987. Geomorphic and tectonic process rates: effect of measured time interval. *Geology* 15, 259–261.
- [10] Golombek, M.P., Bridges, N.T., 2000. Erosion rates on Mars and implications for climate change: constraints from the Pathfinder landing site. *J. Geophys. Res.* 105, 1841–1853.
- [11] Hartmann, W.K., Neukum, G., 2001. Cratering chronology and the evolution of Mars. *Space Sci. Rev.* 96, 165–194.
- [12] Head, J.W., Kreslavsky, M.A., Pratt, S., 2002. Northern lowlands of Mars: evidence for widespread volcanic flooding and tectonic deformation in the Hesperian period. *J. Geophys. Res.* 107, 5003.
- [13] Head, J.W., Marchant, D.R., Dickson, J.L., Kress, A.M. and Baker, D.M., 2009. Northern mid-latitude glaciation in the Amazonian Period of Mars: Criteria for the recognition of debris-covered glacier and valley glacier landsystem deposits in the 30°–50° N latitude band. *Earth Planet. Sci. Lett.*, in review.
- [14] Herkenhoff, K.E., Plaut, J.J., 2000. Surface ages and resurfacing rates on the polar layered deposits on Mars. *Icarus* 243–253.
- [15] Howard, A.D., Moore, J.M., Irwin III, R.P., 2005a. An intense terminal epoch of widespread fluvial activity on Mars: 1. valley network incision and associated deposits. *J. Geophys. Res.* 110, E12S14.
- [16] Kadish, S.J., Head, J.W., Parsons, R.L., Marchant, D.R., 2008. The Ascræus Mons fan-shaped deposit: Volcano–ice interactions and the climatic implications of cold-based tropical mountain glaciation. *Icarus* 197, 84–109.
- [17] Kasting, J.F., 1991. CO₂ condensation and the climate of early Mars. *Icarus* 94, 1–13.
- [18] Kreslavsky, M.A., Head, J.W., 2002. Fate of outflow channel effluents in the northern lowlands of Mars: the Vastitas Borealis Formation as a sublimation residue from frozen ponded bodies of water. *J. Geophys. Res.* 107, 5121.
- [19] Langevin, Y., Poulet, F., Bibring, J.-P., Gondet, B., 2005. Sulfates in the north polar region of Mars by OMEGA Mars Express. *Science* 307, 1584–1585.
- [20] Laskar, J., Correia, A.C.M., Gastineau, M., Joutel, F., Levrard, B., Robutel, P., 2004. Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars. *Icarus* 170, 343–364.
- [21] Lewis, K.W., Aharonson, O., Grotzinger, J.P., Kirk, R.L., McEwen, A.S., Suer, T., 2008. Quasi-periodic bedding in the sedimentary rock record of Mars. *Science* 322, 1532–1535
- [22] Malin, M.C., Edgett, K.S., Posiolova, L.V., McColley, S.M., Noe-Dobrea, E.Z., 2006. Present-day impact cratering rate and contemporary gully activity on Mars. *Science* 314, 1573–1577.
- [23] Marčeta, D., 2015. Mogućnosti i optimizacija sletanja na južnu hemisferu Marsa. PhD teza, Univerzitet u Beogradu.
- [24] McEwen, A.S., Hansen, C.J., Delamere, W.A., Eliason, E.M., Herkenhoff, K.E., Keszthelyi, L., Gulick, V.C., Kirk, R.L., Mellon, M.T., Grant, J.A., Thomas, N., Weitz, C.M., Squyres, S.W., Bridges, N.T., Murchie, S.L., Seelos, F., Seelos, K., Okubo, C.H., Milazzo, M.P., Tornabene, L.L., Jaeger, W.L., Byrne, S., Russell, P.S., Griffes, J.L., Martínez-Alonso, S., Davatzes, A., Chuang, F.C., Thomson, B.J., Fishbaugh, K.E., Dundas, C.M., Kolb, K.J., Banks, M.E., Wray, J.J., 2007. A closer look at water-related geologic activity on Mars. *Science* 317, 1706–1709.
- [25] Mellon, M.T., Boynton, W.V., Feldman, W.C., Bandfield, J.L., et al., 2008. A prelanding assessment of the ice-table depth and ground ice characteristics in martian permafrost at the Phoenix landing site. *J. Geophys. Res.* 114, E3.

- [26] Mellon, M.T., Jakosky, B.M., 1995. The distribution and behavior of martian ground ice during past and present epochs. *J. Geophys. Res.* 100, 11781–11799.
- [27] Milliken, R.E., Edgett, K.S., Swayze, G.A., Clark, R.N., Thomson, B.J., Anderson, R., Bell III, J.F., 2009. Clay and sulfate-bearing rocks in a stratigraphic sequence in Gale crater. *Lunar Planet. Sci.* 40, 1479 abstract.
- [28] Moore, J.M., Howard, A.D., Dietrich, W.E., Schenk, P.M., 2003. Martian layered fluvial deposits: implications for Noachian climate scenarios. *Geophys. Res. Lett.* 30, 2292.
- [29] Mustard, J.F., Cooper, C.D., Rifkin, M.K., 2001. Evidence for recent climate change on Mars from the identification of youthful near-surface ground ice. *Nature* 412, 411–414.
- [30] Parker, T.J., Gorsline, D.S., Saunders, R.S., Pieri, D.C., Schneeberger, D.M., 1993. Coastal geomorphology of the Martian northern plains. *J. Geophys. Res.* 98, 11,061–011,078.
- [31] Parker, T.J., Saunders, R.S., Schneeberger, D.M., 1989. Transitional morphology in West Deuteronilus Mensae, Mars: implications for modification of the Lowland/Upland boundary. *Icarus* 82, 111–145.
- [32] Phillips, R.J., Zuber, M.T., Solomon, S.C., Golombek, M.P., Jakosky, B.M., Banerdt, W.B., Smith, D.E., Williams, R.M., Hynek, B.M., Aharonson, O., Hauck II, S.A., 2001. Ancient geodynamics and global-scale hydrology on Mars. *Science* 291, 2587–2591
- [33] Reiss, D., van Gasslet, S., Neukum, G., Jaumann, R., 2004. Absolute dune ages and implications for the time of formation of gullies in Nirgal Vallis, Mars. *J. Geophys. Res.* 109, E06007.
- [34] Schon, S.C., Head, J.W., Fassett, C.I., 2009. Unique chronostratigraphic marker in depositional fan stratigraphy on Mars: evidence for ca. 1.25 Ma gully activity and surficial meltwater origin. *Geology* 37, 207–210.
- [35] Smith, D. E., Sjogren, W. L., Tyler, G. L., Balmino, G., Lemoine, F. G., Konopliv, A. S., 1999. The gravity field of Mars: results from Mars Global Surveyor. *Science* 286, 94–97.
- [36] Squyres, S.W., Knoll, A.H., Arvidson, R.E., Clark, B.C., Clark, B.C., Grotzinger, J.P., Jolliff, B.L., McLennan, S.M., Tosca, N.J., Bell III, J.F., Calvin, W.M., Farrand, W.H., Glotch, T.D., Golombek, M.P., Herkenhoff, K.E., Johnson, J.R., Klingelhöfer, G., McSween Jr., H.Y., Yen, A.S., 2006. Two years at Meridiani Planum: results from the Opportunity Rover. *Science* 313, 1403–1407.
- [37] Tanaka, K.L., Skinner, J.A., Hare, T.M., 2005. Geologic map of the northern plains of Mars. *U. S. Geol. Surv., Sci. Inv. Map* 2888.
- [38] Toon, O.B., Pollack, J.B., Ward, W., Burns, J.A., Bilski, K., 1980. The astronomical theory of climate change on Mars. *Icarus* 44, 552–607.
- [39] Wilhelms, D.E., Squyres, S.W., 1984. The martian hemispheric dichotomy may be due to a giant impact. *Nature* 309, 138–140.
- [40] Williams, K.E., Toon, O.B., Heldmann, J.L., Mellon, M.T., 2009. Ancient melting of mid-latitude snowpacks on Mars as a water source for gullies. *Icarus* 200, 418–425.
- [41] en.wikipedia.org/wiki/Geological_history_of_Mars
- [42] <http://sci.esa.int/mars-express/55481-the-ages-of-mars/>