

Klimatske promene na Marsu

Numerički je ispitivana površinska temperatura i postojanje i pomeranje polarnih kapa na Marsu u vremenskom intervalu od –21 Myr do 11 Myr. Sfera koja predstavlja Mars je popločana pomoću preko 10 000 ćelija. Svakoj ćeliji je dodeljen tip (zemljište ili led različitih debljina), albedo i toplotni kapacitet. Koristeći podatke za precesiju apsidne linije, promenu ekscentriciteta i precesiju nagiba ose praćena je, na osnovu teorije Milankovićeve ciklusa i računanjem srednje godišnje insolacije, promena srednje godišnje temperature svake ćelije. Temperatura se, u modelu, menjala i zbog toga što je dozvoljena difuzija toplote između svake ćelije i najbližih suseda. Praćena je i promena albeda i toplotnog kapaciteta u zavisnosti od promene tipa ćelije. U svakom koraku je beležena maksimalna (minimalna) latituda na kojoj se javlja led na severnoj (južnoj) hemisferi Marsa. Rezultati su pokazali da se u trenutku oko 5 Myr godina u prošlosti, koji odgovara trenutku naglog pada nagiba Marsove ose rotacije, formiraju stalne polarne kape, kojih do tada nije bilo ili su se pojavljivale u kratkim vremenskim periodima i spuštale tek do 75° po latitudi.

Uvod

Modelovanjem klime, u ovom radu, je izračunata prosečna površinska temperatura Marsa tokom intervala od – 21 Myr do 11 Myr i ispitivano je postojanje polarnih kapa tokom tog intervala. Nalaženje temperature podrazumevalo je poznavanje insolacije (osunčanosti) određene površine. Insolacija predstavlja količinu energije

Sunčevog zračenja koja pada na jedinicu površine, pod određenim uglom.

Ukoliko bi planete bile izolovani objekti, njihove ose rotacije bi zadržale svoje orijentaciju u prostoru konstantnim a u slučaju da nema drugih objekata sem Sunca putanja bi im bila nepromenljiva. Godišnji tok osunčavanja ponavljao bi se, onda, iz godine u godinu. Međutim, to nije slučaj. Orbitalni parametri i nagib ose se menjaju a precesija javlja zbog gravitacione interakcije sa ostalim objektima u Sunčevom sistemu. Milankovićeve ciklusi (Milanković 1941) povezuju klimatske promene na planetama sa promenama njihovih orbitalnih parametara i nagibom i precesijom ose.

Promena u nagibu ose rotacije na planetama uzrokuje promenu u raspodeli Sunčevog zračenja na površini. Osa precesija je uzrok promene gama tačke po ravni ekvatora u retrogradnom smeru, što za posledicu ima različito vreme početka godišnjih doba. Promena ekscentriciteta menja trajanje godišnjih doba. Što više putanja odstupa od kružne, imamo izraženija leta i izraženije zime.

Cilj rada je bio da se modelira klima Marsa na osnovu teorije Milankovićeve ciklusa, da se pomoću toga odredi kako i koliko su se polarne kape menjale u prošlosti i da se da pretpostavka kako će se menjati u budućnosti.

Metod

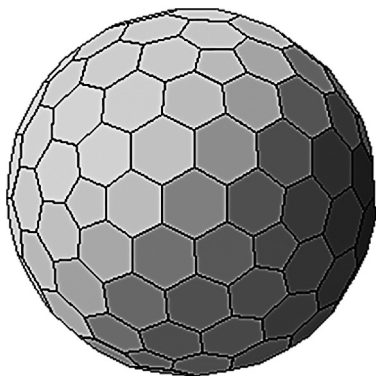
Planeta je popločavana ćelijama petougao-
nog (ukupno 12) i šestougao-
nog (ukupno preko
10 000) oblika (slika 1). Ovaj pristup je adekvatniji od podele sfere po prstenovima po latitudi

Vladimir Došović (1995), Kraljevo, Dositejeva 44, učenik 4. razreda Gimnazije Kraljevo

MENTORI:

Miša Jovanović, student Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Filip Živanović, student Matematičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu



Slika 1. Model sfere podeljen na petouglove i šestouglove

Figure 1. Model of sphere divided into pentagons and hexagonal

(kao u radu Schorghofer 2012) jer na istoj latitudi neće biti ista temperatura u svim tačkama zbog drugačijeg albeda. Proces popločavanja se sastojao u tome što je za prvobitni oblik planete uzet dodekaedar (geometrijsko telo sačinjenog od 12 petougaoonika). Zatim je rekursivno pozivana programska funkcije koja bi svaki put smanjivala površine prethodnih polja na račun ubacivanja dodatnih polja. U prvom koraku od početnog dodekaedra dobijamo geometrijsko telo sastavljeno od 12 petougaoonika i šestougaoonika koji ih okružuju. U svakoj sledećoj iteraciji se broj šestougaoonika povećavao, tako što su novi šestougaoonici ubacivani duž ivica starih, dok je broj petougaoonika do samog kraja ostao isti. Ubacivanje šestougaoonika je vršeno na račun smanjivanja dimenzija petougaoonika i šestougaoonika, pa su ćelije u konačnoj iteraciji, koja reprezentuje sfernu planetu, imale različite površine.

Svaka ćelija ovako podeljene sfere je opisivana tipom, albedom i toplotnim kapacitetom. Postoje tri tipa ćelija: zemljište, jednoslojni led (zaleđeni CO₂) i dvoslojni led. Za početni trenutak stanja Marsa u simulaciji je uzet današnji pa su ćelijama dodeljivani tipovi na osnovu današnjeg stanja. Kako su podaci iz literature (www.mars.asu.edu) davali samo podatke za albedo na latitudama od -60° do 60°, sve ostale vrednosti su smatrane ledom i to tako da na lati-

tudama od 60° do 70° bude jednoslojni led, a latitudama od 70° do 90° bude dvoslojni led. Za albedo jednoslojnog leda je uzeta vrednost 0.5, dok je u slučaju dvoslojnog taj albedo iznosio 0.9 (nsidc.org). Svaki put kada bi se na tim površinama topio led dodeljivan bi im bio srednji Marsov albedo od 0.2 (www.mars.asu.edu). U slučajevima pojave a kasnije i topljenja leda u intervalu latituda od -60° do 60° vrednost albeda bi se vraćala na početnu vrednost zemljišta. Kako je u bazi podataka o albedu (www.mars.asu.edu) vrednost albeda dodeljena ćelijama oblika sfernog kvadrata po longitudi i latitudi Marsa, za albedo neke ćelije sfere, u našem modelu, uziman je albedo najbližeg sfernog kvadrata iz baze podataka.

Preko Štefan-Bolcmanovog zakona računata je površinska temperatura svake ćelije (Milanković 1941):

$$\sigma \cdot \theta^4 = \frac{1}{2}(1-A) \cdot W \cdot \left(1 + \frac{\log p'}{\log p}\right) \cdot \left(1 - \frac{\log p'}{\log p} \cdot p\right)$$

gde θ predstavlja apsolutnu temperaturu površine ćelije, σ Štefan-Bolcmanovu konstantu, W označava usrednjenu insolaciju tokom godine, A albedo ćelije koji je preuzet iz literature (www.mars.asu.edu), p koeficijent ekstinkcije atmosfere a p' koeficijent ekstinkcije atmosfere za infracrveno zračenje. Vrednosti p i p' su preuzeti (Milanković 1941) i ne razlikuju se na različitim longitudama i latitudama. Usrednjena insolacija tokom cele godine je računata pomoću (Milanković 1941):

$$W = \frac{T}{4\pi^2} \cdot \frac{J_0}{\sqrt{1-e^2}} \int_{\lambda'}^{\lambda''} d\lambda \int_{-\psi_0}^{\psi_0} p^{\sec z} \cos z d\psi$$

gde je T period revolucije Marsa, J_0 solarna konstanta za Mars, e ekscentricitet orbite Marsa, λ polarni ugao (definisano tako da je u gama tački jednak nuli a u letnjem solsticiju 90°), ψ longituda Sunca a z zenitni ugao. Ovaj integral je rešavan numerički, metodom trapeza.

Podaci o promeni ekscentriciteta, precesije ose rotacije i precesija apsidne linije Marsa za relevantan vremenski interval preuzeti su iz literature (Laskar *et al.* 2004). Ti podaci su dobijeni iz perturbativne teorije, razmatranjem gravitacione interakcije Sunca i planeta sa Marsom.

Milankovićeve ciklusi se mogu razložiti na harmonike, čiji periodi, za Mars, variraju, u slučaju nagiba ose, od 20 000 godina pa do 2 miliona godina, u slučaju ekscentriciteta, od 25 000, 40 000 do preko 3 miliona godina a u slučaju perioda precesije oko 40 000 godina. Imajući ove podatke u vidu, dovoljno je razmatrati promene insolacije na vremenskim skalama većim od 1000 godina, pa je za vremenski korak u simulaciji uzeta vrednost od 1000 godina.

Bilo je neophodno napraviti model razmene energije među susednim poljima sfere, odnosno model difuzije. Pretpostavljeno je da do difuzije dolazi u slučaju različite temperature ili površine ili toplotnog kapaciteta najbližih suseda. U svakom vremenskom koraku simulacije, popravka temperature svakog polja je računata prema formuli:

$$\Delta T = N \cdot T - \sum_{i=1}^N T_i \cdot \left(\frac{C_p}{\sum_{j=1}^N C_{p_j}} + \frac{P}{\sum_{l=1}^N P_l} \right)$$

gde je ΔT difuziona promena temperature posmatranog polja, N broj suseda, T temperatura polja, T_i temperatura i -tog suseda, C_p toplotni kapacitet polja, C_{p_j} toplotni kapacitet j -tog suseda, P površina polja, i P_l površina l -tog suseda. Ideja za ovakvu formulu je da se ukupan „temperaturni budžet”, koji predstavlja sumu razlika između temperatura posmatranog polja i susednih polja, ravnomerno raspoređuje na razmatrano polje i najbliže susede ali tako da svaka dva polja istih površina i toplotnih kapaciteta dobiju identičnu količinu promene temperature iz temperaturnog budžeta.

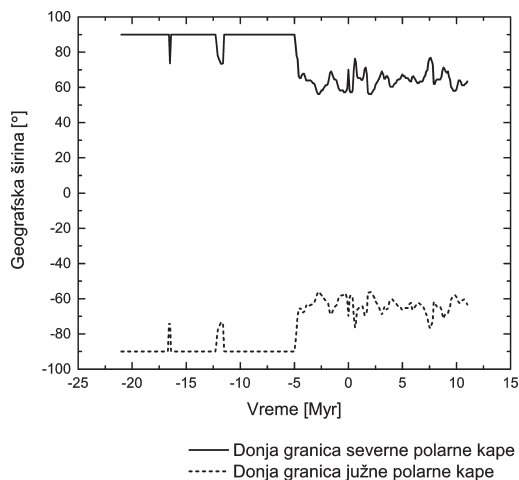
Kao kriterijum postojanja i stalnosti (prisustva tokom cele godine) polarnih kapa uzeto je da je srednja temperatura manja od tačke mržnjenja u toj ćeliji na površini Marsa. U svakom koraku simulacije beležena je minimalna odn. maksimalna latituda na kojoj se javlja led na severnoj, odnosno južnoj hemisferi Marsa.

Simulacija je vršena u dva vremenska smera - od današnjeg trenutka do 21 Myr u prošlost i od današnjeg trenutka do 11 Myr u budućnost, jer su za taj vremenski opseg bile poznate vrednosti orbitalnih parametara iz rada Laskara i saradnika (2004). Sa korakom od 100 000 godina u periodu od -21 Myr do 11 Myr, pravljen je 3D plot temperature.

Rezultati i diskusija

Podaci za temperature po latitudama upoređeni su sa podacima iz literature (Schorghofer 2008). Razlika u njihovom pristupu ovog rada je u tome što su razmatrali insolaciju na određenim latitudama, bez podele površine na polja. Takođe, u navedenom radu radi se sa insolacijom kada je planeta u letnjem solsticiju, dok je u ovom radu posmatrana srednja godišnja insolacija. Ukoliko se iz ovog rada isključi usrednjavanje insolacije i prati temperatura na jednom polju određene latitute moguće je uporediti ova dva modela, koji u takvom slučaju jako dobro odgovaraju jedan drugom. Prednosti našeg pristupa su u tome što se ne uzima da je na jednoj latitudi toplotni kapacitet i albedo svuda isti i što ne posmatramo insolaciju samo u određenom trenutku već njenu usrednjenu reprezentaciju za celu godinu.

Rezultati za pomeranje polarnih kapa na Marsu tokom perioda od -21 Myr do 11 Myr su prikazani na slici 2. Ako je u nekom trenutku vrednost donje granice polarne kape 90° ili -90° to znači da u tom trenutku na Marsu nije bilo polarne kape na severnoj odnosno južnoj hemisferi.



Slika 2. Donje granice latituda do koje se spusti led u određenom vremenskom trenutku

Figure 2. Lower limits of the latitude which ice reaches in a specific time (full line – northern polar cap; dotted line – southern polar cap)

Naši rezultati pokazuju da vremenski trenutak, oko 5 Myr godina u prošlosti, kada se dogodio nagli pad nagiba ose rotacije Marsa (Laskar *et al.* 2004) poklapa sa trenutkom formiranja stalnih polarnih kapa na Marsu. Ovakav rezultat je očekivan. U slučaju nagiba ose rotacije od 45°, što je bila njena vrednost pre pada ose, dolazi do ravnomerne raspodele insolacije tokom godine, tako da istu energiju zračenja dobijaju polja na ekvatoru kao ona na polovima. Kada osa rotacije doživi nagli pad na nekih dvadesetak stepeni onda imamo izraženu razliku u primanju energije na polovima i na ekvatoru, što uzrokuje pojavu stalnih polarnih kapa. Iako intuitivan, ovaj rezultat nije nađen u prethodnoj literaturi koja se bavila proučavanjem klime Marsa.

Ovo istraživanje može biti dalje poboljšavano korišćenjem simulacije N tela za dobijanje vrednosti orbitalnih elemenata.

Zahvalnost. Autor rada želi da se pre svega zahvali mentorima Miši Jovanoviću i Filipu Živanoviću bez čijih smernica i pomoći ovaj rad ne bi bio završen. Rukovodiocu seminaru astronomije Obuljen Andreju na korisnom savetima. Bukva Aleksandru na pomoći oko vizuelizacije. Martinović Nemanji na pomoći oko modeliranja.

Literatura

Laskar J., Robulet P., Joutel F., Gastineau M., Correia A. C. M., Lévrad B. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, **428** (1): 261.

Milanković M. 1941. *Kanon osunčavanja Zemlje i njegova primena na problem ledenih doba*. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva

Schorghofer N. 2008. Temperature response of Mars to Milankovitch cycles. *Geophysical research letters*, **35** (18): L18201

<http://www.mars.asu.edu/data>

<https://nsidc.org/cryosphere/seaice/processes/albedo.html>

Vladimir Djošović

Climate Changes on Mars

The surface temperature and the presence and movement of polar ice caps on Mars, in the time interval of –21 Myr to 11 Myr, have been numerically examined. The sphere which represents Mars has been tessellated with 10 000 cells of different dimensions. Each cell was parameterized with a type (soil or ice of varying thickness), albedo and thermal capacity. The variation of the annual average temperature of each cell has been calculated by using data for apsidal precession, the change of the eccentricity and the axial precession. Calculations were based on Milankovich's cycles theory. The temperature in the model also varied, due to the allowed diffusion of heat between the cells and its nearest neighbors. If change of the cell type occurred, albedo and thermal capacity were accordingly modified. The maximum (minimum) latitude where ice occurs, in the northern (southern) hemisphere of Mars, was recorded at every step. The results have shown that about 5 Myr ago, at the moment which coincides with a sudden drop of Martian rotational axis, permanent polar ice caps were formed. These caps previously did not exist or they appeared in short periods of time and only to the north from 75° latitude. 