

---

Sanja Mihajlović

# Implementacija „Sveta krasuljaka” probabilističkim ćelijskim automatom

---

*U ovom radu je implementiran „Svet krasuljaka” pomoću probabilističkog ćelijskog automata u cilju ispitivanja uticaja biotičkih faktora na nastanjivost planete. Kao biotički faktori su korišćene dve vrste krasuljaka – crni i beli. Model je, za razliku od prethodnih radova koji su proučavali samo planetu modelovanu kao ravnu ploču, ispitivan i za ravnu i planetu modelovanu kao sferu. Rezultati su pokazali da krasuljci teže da održe temperaturu optimalnom, tj. zagrevaju planetu kada je njena temperatura niža od vrednosti pogodne za njihov rast, odnosno hlade planetu kada je njena temperatura viša od te vrednosti. Ponašanje krasuljaka proučavano je u tri slučaja. U jednom do promene temperature planete dolazi samo usled promene sjaja zvezde tokom njenog starenja, u drugom usled uvođenja ekscentričnosti orbite planete, a u trećem naglom promenom sjaja zvezde. Takođe, uveden je i model planete koji podrazumeva da je ona sivo telo, radi ispitivanja uticaja difuzije na regulaciju temperature.*

---

## Uvod

Ekstrasolarne planete (planete van našeg Sunčevog sistema) postaju sve aktuelnija tema istraživanja. U poslednjih dvadesetak godina ih je otkriveno skoro dve hiljade (<http://exoplanet.eu/>), a taj broj iz dana u dan sve više raste, zahvaljujući poboljšavanju metoda njihove detekcije. Na osnovu prikupljenih podataka o ekstrasolarnim planetama, možemo govoriti i o njihovoj potencijalnoj nastanjivosti. Inajući u vidu naše razumevanje Zemljine biosfere, bitan preduslov nastanjivosti je tečna voda na temperaturama do oko 60°C. Mogućnost planete da održava temperaturu u opsegu 0°C–60°C i ublaži nagle ili sekularne promene temperature koje mogu nastati usled promene sjaja zvezde domaćina, parametara orbite planete, udara asteroida i slično, može značajno povećati njen biološki potencijal.

Model regulisanja temperature koji je ispitivan u ovom radu je „naseļavanje“ planete krasuljcima, po tzv. Daisyworld modelu. Ovaj model,

---

*Sanja Mihajlović  
(1995), Kragujevac,  
učenica 4. razreda  
Prve kragujevačke  
gimnazije*

*MENTORI:*

*dr Branislav Vukotić,  
Astronomska  
opservatorija,  
Beograd*

*Boris Majić, student  
Elektrotehničkog  
fakulteta Univerziteta  
u Beogradu*

predstavljen u literaturi (Watson i Lovelock 1983), uveden je kao jednostavan i efektan način modeliranja povratne sprege između planete i njene biosfere, gde krasuljci promenom albeda planete održavaju temperaturu na optimalnim vrednostima za svoj opstanak. U osnovi modela je ravna planeta, koja je naseljena crnim i belim krasuljcima. Njihova jedina karakteristika je albedo (odnos reflektovanog i upijenog zračenja). Crnim krasuljcima je zadat manji albedo od albeda planete, pa će je oni zagrevati, jer upijaju više zračenja. Belim je zadat veći albedo od albeda planete, pa će je hladiti. Crnim krasuljcima odgovaraju niže, a belim više temperature. Proučavajući promene vrednosti globalne temperature, koja se menja usled promene luminoznosti zvezde, dolazi se do zaključka da krasuljci vrše termoregulaciju i dovode planetu do homeostaze u temperturnom pogledu. To je u skladu sa Gaja hipotezom, koja, u osnovi, tvrdi da postoji neraskidiva sprega između abiotičkih i biotičkih faktora, tj. da uzajamno utiču jedni na druge (Pujol *et al.* 2005).

U ovom radu korišćena je prethodno opisana ideja, ali je realizovana na drugačiji način. Naime, u originalnom radu, autori su je realizovali numeričkim rešavanjem parcijalnih diferencijalnih jednačina, koje opisuju sistem globalno, što znači da je temperatura ista u svakoj tački planete. Na osnovu te temperature, određivana je stopa rasta krasuljaka (crnih i belih), koja je zavisi od njihovih optimalnih temperatura.

Metod u našem radu razmatra, ne globalne, već lokalne temperature i lokalnu naseljenost krasuljcima. Zasnovan je na ćelijskim automatima.

Ćelijski automat je model koji opisuje neki sistem posmatrajući njegovo stanje lokalno. Sastoji se od određenog broja ćelija koje međusobno interaguju po unapred zadatim pravilima. Ćelije imaju sposobnost samoorganizovanja, tj. one u međusobnoj interakciji, zadavanjem početnih parametara i uslova stanja i pravila po kojima će delovati jedne na druge, evoluiraju, i od relativno jednostavnih početnih formacija dobijaju se prilično kompleksni rezultati. Zbog toga što imaju takvu vrstu „inteligencije“ često se koriste za rešavanje brojnih složenih matematičkih, fizičkih, bioloških i drugih problema, jer su jako primenjivi na mnoge pojave. Konkretno, ovde su korišćeni jer su promene u temperaturi planete posmatrane lokalno, odnosno, posmatrane su temperature pojedinačnih ćelija. Takođe, metod ćelijskih automata omogućio je uvođenje difuzije, odnosno razmene energije između polja.

Pomoću ovako definisanog modela planete, ponašanje krasuljaka je ispitivano za sledeće slučajeve:

1. Za ravnu planetu, gde su posmatrani sledeći podslučajevi:
  - uticaj biosfere na efektivnu temperaturu planete dok se luminoznost zvezde menja samo usled njenog starenja
  - nagla promena luminoznosti zvezde
  - ekscentricitet orbite planete različit od nule (podrazumeva se da je orbita kružna u svim slučajevima u kojim nije eksplicitno naglašeno suprotno).

2. Za sfernu planetu, gde je posmatran uticaj biosfere na efektivnu temperaturu planete jedino u slučaju kada se luminoznost zvezde kontinualno menjala.

3. Kontrolni slučaj, u kome je ravna planeta modelovana kao sivo telo.

## Model

### Nenaseljena ravna planeta

Kada je planeta nenaseljena, može se smatrati da se nalazi u termodinamičkoj ravnoteži. Na osnovu toga, iz Štefan-Bolcmanovog zakona direktno je izvedena jednačina (1) na osnovu koje se izračunava globalna temperatura planete:

$$T = \left( \frac{(1-A) \cdot L \cdot L_s}{R^2 \cdot 4 \cdot \sigma \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

gde je  $T$  temperatura planete,  $A$  njen albedo,  $L$  luminoznost matične zvezde u datom vremenskom trenutku izražena u luminoznosti Sunca  $L_s$ ;  $R$  je rastojanje između planete i zvezde, a  $\sigma$  Štefan-Bolcmanova konstanta. Iz jednačine se vidi da su za izračunavanje temperature planete tokom vremena potrebne vrednosti luminoznosti tokom evolucije zvezde.

Iz rada Bahcall *et al.* (2001) preuzete su vrednosti luminoznosti Sunca u određenim vremenskim trenucima evolucije, i iz njih linearnom interpolacijom dobijene vrednosti u trenucima između navedenih. Dobijene vrednosti luminoznosti Sunca su implementirane u program i menjale su se nakon svakog vremenskog koraka simulacije.

### Naseljena ravna planeta

Ravna planeta je prekrivena dvodimenzionalnom mrežom, čime je izdeljena na ćelije. Na početku evolucije sistema, planeta je nenaseljena, temperatura svakog polja je ista i određena je jednačinom (1). U zavisnosti od temperature polja (ćelije), razlikuju se verovatnoće rasta crnih i belih krasuljaka, pošto im odgovaraju različite temperature. Verovatnoće rasta krasuljaka na svakom polju dobijene su iz Gausove raspodele, gde su za matematičko očekivanje svakog gausijana uzete optimalne temperature crnih i belih krasuljaka. Konkretno, u ovom radu je za optimalnu temperaturu belih krasuljaka uzeta vrednost od 313.15 K, a za optimalnu temperaturu crnih 283.15 K. Za albedo belih krasuljaka uzeta je vrednost od 0.75, a belih 0.75. Za albedo zemlje uzeto je 0.5. Širina gausijana je postavljena na 7 K.

Verovatnoći rasta krasuljaka na svakom polju dodeljen je slučajan broj između 0 i 1. Poređenjem ova dva broja, naseljenost polja je određena na sledeći način:

1. Na polju će nići crni krasuljak ukoliko važi:

$$P_C > r_C \wedge P_B > r_B \quad (2)$$

gde  $P$  označava verovatnoću rasta krasuljka,  $r$  generisani slučajni broj a indeksi C i B označavaju da je reč o crnim, odnosno belim krasuljcima, respektivno.

2. Na polju će nići beli krasuljak ukoliko važi:

$$P_B > r_B \wedge P_C < r_C \quad (3)$$

3. Polje će biti nenaseljeno (gola zemlja) ukoliko važi:

$$P_C < r_C \wedge P_B < r_B \quad (4)$$

$$T_p < 278.15 \text{ K} \wedge T_p > 323.15 \text{ K}, \quad (5)$$

gde je  $T_p$  temperatura polja. Navedene vrednosti temperature su zadate kao ekstremi habitabilnog opsega za krasuljke.

Ukoliko dođe do situacije da su i verovatnoće rasta crnog i verovatnoće rasta belog krasuljka na nekom polju veće od slučajnih brojeva sa kojima su poređene, na osnovu izraza (2) i (3) nikla bi oba krasuljka na istom polju, što ovaj model ne dozvoljava. Stoga se uvodi treći slučajni broj,  $r_3$ . On se ne nalazi u intervalu (0, 1), nego se skalira na interval (0,  $P_B + P_C$ ). Pomoću  $r_3$  se na sledeći način određuje čime će biti naseljeno posmatrano polje:

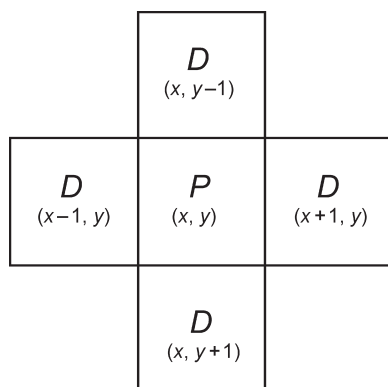
1. Polje će naseliti crni krasuljak ukoliko važi izraz:

$$\frac{P_B}{P_B + P_C} < r_3 \quad (6)$$

2. Polje će naseliti beli krasuljak ukoliko važi izraz (7)

$$\frac{P_C}{P_B + P_C} > r_3 \quad (7)$$

Nakon što je polje naseljeno crnim, odnosno belim krasuljkom (ili je ostalo nenaseljeno), temperatura se transformiše u energiju polja, preko koeficijenta toplotne kapacitivnosti. Zatim se izvršava difuzija toplote između polja, pri čemu se posmatra Fon-Nojmanovo susedstvo (slika 1) U okolinu ćelije spada i sama ćelija, po matematičkoj definiciji okoline za ćelijske automate. Za difuziju je bitna razlika energija ćelije  $P$  i njenih suseda  $D$ .



Slika 1.  
Fon-Nojmanovo susedstvo (gde su  $D$  susedi posmatranog polja  $P$ , a  $x$  i  $y$  koordinate polja  $P$ )

Figure 1.  
Von Neumann's neighborhood ( $D$  are neighbors of observed cell,  $x$  and  $y$  are coordinates of cell  $P$ )

Za izračunavanje difuzije nisu rešavane diferencijalne jednačine. Umesto njih su uvedeni tzv. vremenski podkoraci. Vremenski koraci su birani tako da promena luminoznosti zvezde u okviru jednog koraka bude zanemarljiva. Svaki korak izdvojen je na 100 podkoraka, koji imaju ulogu manjeg vremenskog intervala u okviru koga se razmatra razmena energije polja, računa temperatura polja, računa verovatnoća rasta krasuljaka i na osnovu toga nastanjuje polje.

Energija koju razmeni posmatrano polje  $P$  sa susedima  $D$  se računa po formuli (8):

$$\Delta E_d = (E_L + E_G - 2 \cdot E_P) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{K}} \right) \quad (8)$$

gde  $\Delta E_d$  označava promenu energije usled difuzije,  $L$  označava levog,  $G$  gornjeg suseda, dok  $P$  označava posmatrano polje;  $\Delta t$  je veličina vremenskog podkoraka u toku koga se difuzija vrši, a  $K$  je konstanta difuzije (koja je reda veličine vremenskog podkoraka – u ovom radu, 10000 godina);  $1/2$  je koeficijent koji predstavlja odnos površine posmatranog polja (na ravnoj planeti su sva jedinična) i sume površina suseda koji učestvuju u difuziji.

U ovom delu koda, prolazak kroz matricu se vrši od prve ćelije u gornjem levom uglu, prebrisanjem pojedinačnih vrsta. Na taj način, ćelija razmeni energiju sa zadatim poljima. U radu je za svako polje uzeto njegovo levo i njegovo gornje polje. Ne razmenjuje energiju sa ostatkom susedstva (donje i desno polje) zato što će energija sa tim poljima biti razmenjena u daljem prebrisanju matrice (dakle, ta ćelija će nekoj drugoj ćeliji biti leva, a trećoj gornja). Ako se difuzija ne bi vršila na ovaj način, tada bi ona bila izvršena duplo na poljima, i stoga bi se neka polja previše zagrevala, a neka previše hladila, što u konačnom broju vremenskih koraka dovodi do urušavanja stabilnosti sistema.

Ukupna promena energije polja tokom jednog koraka se računa iz jednačine (9), gde su uzeti u obzir energija koju jedinično polje primi od zvezde (dakle, usled promene luminoznosti u koraku i albeda polja u podkoraku), energija koju svako polje izrači u svemir (koja se menja u zavisnosti od temperature tog polja) i difuzija:

$$\Delta E_u = \frac{(1 - A_p) \cdot L \cdot L_s}{4\pi \cdot R^2} - \sigma \cdot T_p^4 + E_d \quad (9)$$

gde je  $\Delta E_u$  ukupna promena energije polja,  $A_p$  albedo polja,  $L$  luminoznost zvezde u datom vremenskom koraku, izražena u trenutnim luminoznostima Sunca  $L_s$ ,  $R$  rastojanje između zvezde i planete,  $\sigma$  Štefan–Bolcmanova konstanta,  $T_p$  temperatura posmatranog polja a  $E_d$  energija razmenjena difuzijom. Potom se ukupna trenutna energija svakog polja preračunava u temperaturu jednačinom:

$$T = \frac{E}{C}$$

gde je  $E$  dobijena energija,  $T$  nova temperatura polja, a  $C$  koeficijent toplotne kapacitivnosti (u radu je uzeta vrednost od 70 J/K). Iz tako dobijene temperature polja izračunava se verovatnoća rasta svake vrste krasuljaka na polju, proces se ponavlja, i to u svakom vremenskom podkoraku simulacije.

## Ispitivanje stabilnosti sistema (u slučaju ravne planete)

1. Nagle promene luminoznosti. U proizvoljno odabranom trenutku evolucije zvezde, vrednost njene trenutne luminoznosti je naglo promenjena. Zatim je postupno vraćena na vrednost koju bi imala u toj fazi života. Praćena je promena temperature polja i populacija krasuljaka u toku ovog procesa. To je urađeno za različite intenzitete promene luminoznosti i u različitim trenucima života zvezde.

2. Ekscentrična orbita. Posmatrano je ponašanje krasuljaka u toku revolucije planete, pri čemu se menjalo samo rastojanje između zvezde i planete (orbita više nije bila kružna, odnosno zadata joj je konstantna vrednost ekscentriciteta u toku jedne revolucije). Pri tom, luminoznost je smatrana fiksnom, budući da se praktično ne menja u toku jedne revolucije. Ponašanje krasuljaka je ispitivano za različite parametre orbite (menjani su apoastron, periastron, ekscentričnost i parametar elipse).

Promena rastojanja je vršena po formuli (10):

$$R = \frac{p}{1 + e \cdot \cos u} \quad (10)$$

gde je  $R$  rastojanje između planete i zvezde,  $p$  parametar elipse,  $e$  njena ekscentričnost, a  $u$  ugao između periastrona i trenutne pozicije planete, posmatrano sa matične zvezde (fazni ugao).

Parametar elipse je računat po formuli (11):

$$p = \frac{a}{1 - e^2} \quad (11)$$

gde je  $a$  velika poluosa elipse. Ona se izračunava kao aritmetička sredina apoastrona i periastrona.

Apoastron i periastron su zadavani u zavisnosti od toga koliko ekstremne promene smo želeli da proučavamo.

Ekscentričnost je izračunata po formuli (12):

$$e = \frac{a' - p'}{a' + p'} \quad (12)$$

gde su  $a'$  i  $p'$  apoastron i periastron, respektivno.

## Ispitivanje značaja difuzije (planeta kao sivo telo)

U ovom slučaju, planeta je ravna i nenastanjena. Albedo planete je određen na način na koji je određen albedo polja, a koji je opisan u odeljku Ravna planeta. Planeta je „džinovski krasuljak / gola zemlja”, pa samim tim, nema difuzije. Model je osmišljen kako bi se odredilo koliki je uticaj

same difuzije na temperaturnu regulaciju, a koliki promene albeda usled promene temperature.

## Nadogradnja modela – sferna planeta

Ova nadogradnja je izvršena kako bi se ispitaio uticaj geografske širine na temperaturu polja, a samim tim i na globalnu temperaturu planete. Pod modelovanjem planete kao sfere u ovom radu, podrazumeva se:

- uvođenje zavisnosti upadnog ugla zračenja sa zvezde od geografske širine pojasa planete
- uvođenje zavisnosti površine polja od geografske širine.

Ova dva faktora utiču na apsorbovano i reflektovano zračenje sa polja, kao i na difuziju između polja.

Površina polja u funkciji geografske širine izračunava se formulom:

$$P = \cos \left( \frac{(2 \cdot j + 1 - N) \cdot \pi}{2 \cdot N} \right) \quad (13)$$

gde je  $P$  površina polja,  $j$  koordinata pojasa po geografskoj širini, a  $N$  je ukupan broj polja na sferi.

Uticaj površine polja na apsorbovano i reflektovano zračenje implementiran je množenjem izraza (1) i (8) faktorom površine.

Na difuziju na sfernoj planeti utiče i površina polja. Zbog toga se jednačina po kojoj se računa difuzija za sfernu planetu dobija tako što se konstanta  $1/2$  u jednačini (8) zameni korektivnim faktorom  $k$ :

$$k = \frac{P}{S} \quad (14)$$

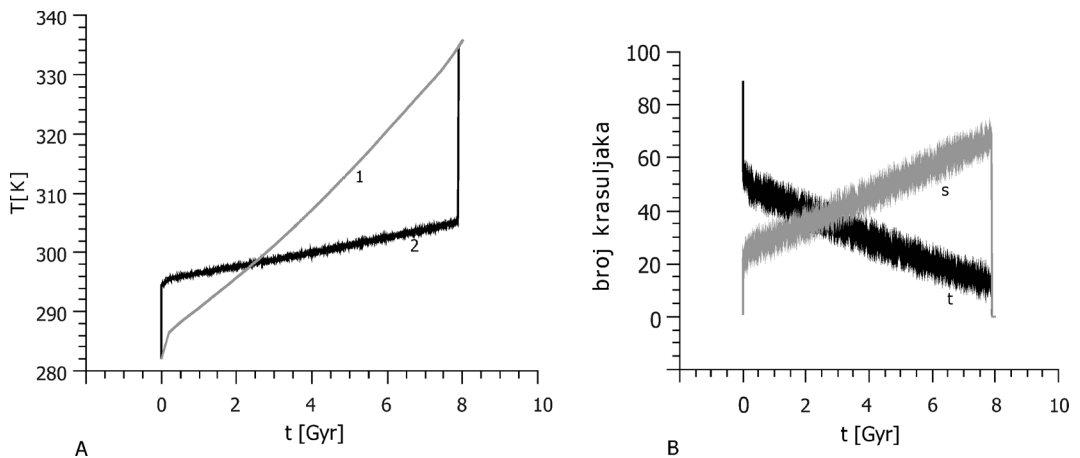
gde je  $P$  površina posmatranog polja, a  $S$  suma površina suseda koji učestvuju u difuziji. To je učinjeno zato što je  $1/2$  zapravo specijalan slučaj izraza (14), koji važi za ravnu planetu ( $P = 1$ , jer je uzeto da su polja jedinična, a  $S = 2$  jer se pri svakom prolasku kroz matricu difuzija vrši sa po dva suseda). Pošto više nije posmatrana ravna planeta, bilo je potrebno zameniti tu konstantu opštim izrazom.

## Rezultati i diskusija

### Ravnomerna promena luminoznosti zvezde

Dobijeni rezultati pokazuju promenu temperature i broja krasuljaka na ravnoj planeti u toku 8 milijardi godina evolucije sistema. Prikazani su slučajevi naseljene i nenaseljene planete.

Na slici 2 uočava se skok u temperaturi na samom početku evolucije sistema naseljene planete (u odnosu na temperaturu nenaseljene), do koga je došlo usled nastanka krasuljaka na planeti (pre svega, crnih, jer im pogoduju niže temperature). Oni su podigli prosečnu temperaturu, time je učinivši optimalnijom za svoj opstanak, što je dovelo do umnožavanja i belih krasuljaka. Zajedno nastavljaju da vrše termoregulaciju planete, što dovodi



Slika 2. Ravna planeta pri ravnomernoj promeni luminoznosti zvezde  
 A. Promena temperature nenaseljene (1) i naseljene planete (2) sa vremenom  
 B. Promena broja krasuljaka sa vremenom (t – crni krasuljci, s – beli krasuljci)

Figure 2. Flat planet in case of uniform change of star's luminosity  
 A. Temperature change of uninhabited (1) and populated planet (2) with time  
 B. Change in the number of daisies with time (t – black daisies, s – white daisies)

do toga da se naseljena planeta duže nalazi u temperaturnom opsegu pogodnom za nastanjivanje krasuljcima, u odnosu na nenaseljenu.

Pri kraju evolucije sistema, opstaju samo beli krasuljci, jer su otporniji na više temperature, i hlade planetu dok temperatura ne dostigne ekstremnu vrednost. Tada i oni izumiru.

## Nagle promene luminoznosti zvezde

Dobijeni rezultati pokazuju promenu temperature i broja krasuljaka na ravnoj planeti u toku 8 milijardi godina evolucije sistema, pri naglim promenama luminoznosti. Prikazani su slučajevi naseljene i nenaseljene planete.

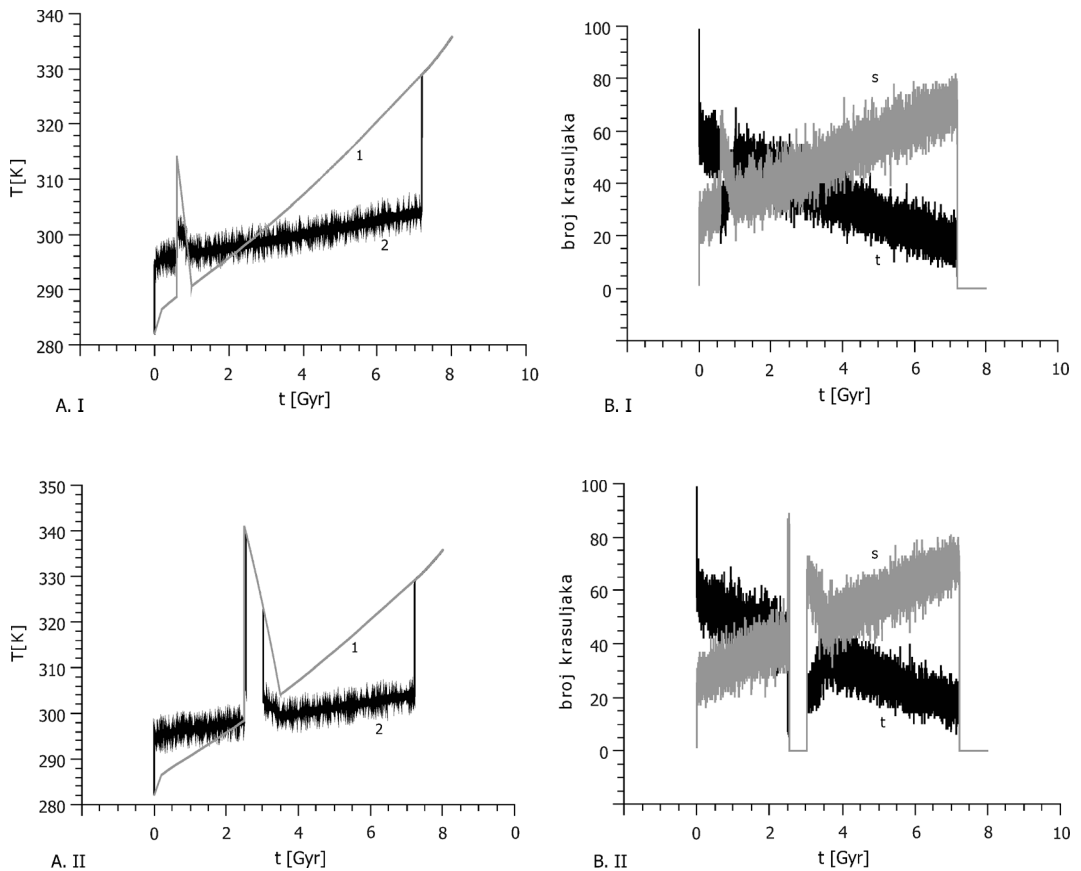
Grafici na slici 3 gore (I) dobijene su tako što je luminoznost promenjena u 600. koraku, za  $+0.3 L_s$ , i u narednih 400 vremenskih koraka vraćana u normalu, za po  $-0.00075 L_s$ .

Grafici na slici 3 dole (II) dobijeni su tako što je luminoznost promenjena u 2500. koraku, za  $+0.6 L_s$ , i u narednih 1000 vremenskih koraka vraćana u normalu, za po  $-0.0006 L_s$ .

Na gornjim graficima se vidi da su krasuljci preživeli naglu promenu luminoznosti, prilagodivši se povećanjem broja belih krasuljaka, koji su tada znatno spustili temperaturu planete i uspeali su da nastave da vrše termoregulaciju do povratka luminoznosti u normalan tok (A. I).

Na donjim graficima se vidi da je druga promena luminoznosti bila previše drastična, usled čega su krasuljci izumrli, ali, u toku vraćanja





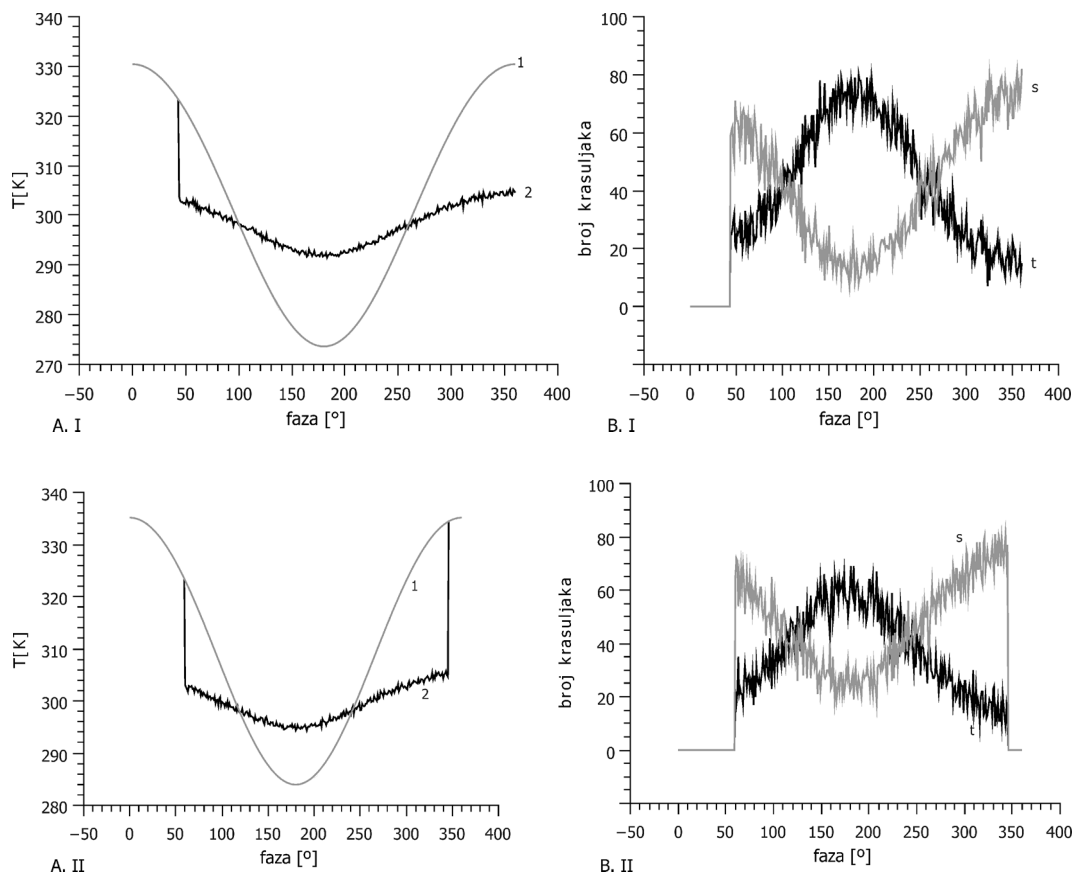
Slika 3. Ravna planeta u dva slučaja nagle promene luminoznosti zvezde  
 A. Promena temperature nenaseљjene (1) i naseљjene ravne planete (2) sa vremenom  
 B. Odgovarajuće promene broja krasuljaka (t – crni krasuljci, s – beli krasuljci)

Figure 3. Flat planet in two cases of sudden change of star's luminosity  
 A. Temperature change of uninhabited (1) and populated planet (2) with time  
 B. Matching changes in the number of daisies with time (t – black daisies, s – white daisies)

luminoznosti u normalu, temperatura je ponovo ušla u opseg temperatura na kojima mogu da prežive, ponovo su počeli da nastanjuju planetu i da vrše termoregulaciju. Rezultat toga je znatno brže vraćanje temperature na optimalnu, u odnosu na slučaj kada je planeta nenastanjena (A. II).

## Revolucija planete

Rezultati prikazani slici 4 pokazuju promenu temperature i broja krasuljaka na ravnoj planeti u toku jedne revolucije, pri različitim parametrima orbite. Prikazani su slučajevi naseљjene i nenaseљjene planete.



Slika 4. A. Promene temperature ravne planete sa fazom za dva različita slučaja orbitalnih parametara (1 – nenaseljena planeta, 2 – naseljena planeta)  
 B. Odgovarajuće promene broja krasuljaka (s – beli krasuljci, t – crni krasuljci)

Parametri orbite:	I slučaj (gore)	II slučaj (dole)
Apoastron	$210 \times 10^9$ km	$195 \times 10^9$ km
Periastron	$144 \times 10^9$ km	$140 \times 10^9$ km
Ekscentričnost	0.18644	0.16418
Parametar elipse	$170 \times 10^9$ km	$162.985 \times 10^9$ km

Figure 4. A. Temperature changes of flat planet with phase for two different cases of orbital parameters (1 – uninhabited planet, 2 – populated planet)  
 B. Matching changes in the number of daisies (s – white daisies, t – black daisies)

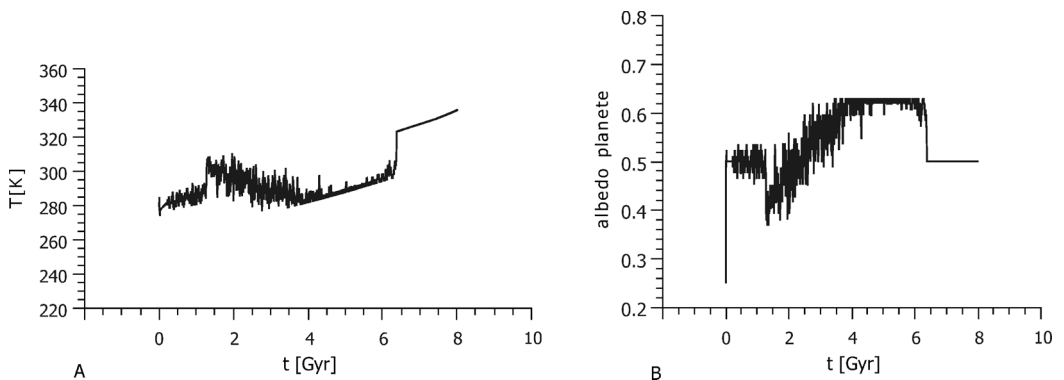
Orbit parameters:	I case (above)	II case (below)
Apoastron	$210 \times 10^9$ km	$195 \times 10^9$ km
Periastron	$144 \times 10^9$ km	$140 \times 10^9$ km
Eccentricity	0.18644	0.16418
Parameter of the ellipse	$170 \times 10^9$ km	$162.985 \times 10^9$ km

Posmatrajući razliku između grafikona I i II, može se primetiti da u slučaju manje ekstremne ekscentričnosti (A. I) krasuljci uspevaju da održe temperaturu optimalnom tokom cele godine, što nije slučaj u A. II.

## Planeta kao sivo telo

Na slici 7A prikazana je promena temperature sa vremenom ravne nenaseljene planete modelovane kao sivo telo, a na slici 7B zavisnost albeda planete od vremena. Krive su dobijene usrednjavanjem rezultata metodom klizeće srednje vrednosti.

Uočava se da nakon određenog vremena (približno nakon 2 milijarde godina) planeta uspeva da približi svoju temperaturu optimalnoj (zahvaljujući tome što se ponaša kao crni krasuljak – slika 5B). Sa porastom luminoznosti matične zvezde, na osnovu izraza (1), raste i temperatura planete. Kako bi izvršila termoregulaciju, planeta počinje da se ponaša kao beli krasuljak, čime snižava sopstvenu temperaturu. Na oko 7 milijardi godina, temperatura prelazi ekstremnu vrednost na kojoj je moguć opstanak krasuljaka, i planeta je nenaseljena. Poredeći sa mrežnim modelom, bilo ravnom, bilo sfernom planetom (slika 2A i slika 6, respektivno) čija je glavna razlika u odnosu na ovaj postojanje difuzije, uočavaju se znatno veće temperaturne oscilacije sivog tela u odnosu na naseljenu planetu, zbog toga što ne postoji razmena energije koja bi ublažila skokove temperature usled promene albeda. Samim tim, ovaj sistem je nestabilniji. Takođe, duži je period opstanka krasuljaka u modelu u kome je planeta izdelfjena na polja (za približno milijardu godina). To je posledica bolje termoregulacije u tom modelu, nego u modelu planete kao sivo telo. Uzrok bolje temperaturne regulacije je difuzija između polja.



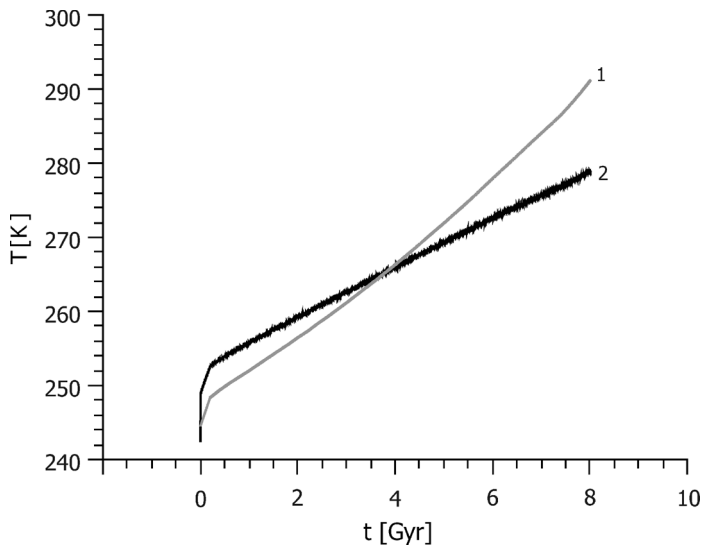
Slika 5. Ravna planeta kao sivo telo: promena temperature planete (A) i promena albeda (B) sa vremenom

Figure 5. Flat planet as a gray body: temperature change (A) and albedo change (B) with time

## Sferna planeta

Dobijeni rezultati pokazuju promenu prosečne temperature sferne planete u toku 8 milijardi godina evolucije sistema. Prikazani su slučajevi naseljene i nenaseљene planete.

Na slici 11 se uoćava da, za razliku od slućaja ravne planete, krasuljci odrćavaju termoregulaciju do samog kraja evolucije sistema, odnosno, uspeavaju da prećive. Glavni razlog je ćinjenica da su kod ravne planete sva polja podjednako izloćena zraćenju koje dolazi sa zvezde, dok kod sferne, kako se povećava geografska širina, opada i upadni ugao zraćenja i površina polja, tako da temperatura znaćajno opada ka polovima. Rezultat toga je da će, zahvaljujući difuziji kojom polja sa viših geografskih širina rashlaćuju polja na nićim, sferna planeta biti nastanjiva i pri luminoznostima zvezde na kojima ravna planeta nije.



Slika 6.  
Sferna planeta:  
promena temperature  
nenaseљene (1) i  
naseљene planete (2) sa  
vremenom

Figure 6.  
Spherical planet:  
temperature change of  
uninhabited (1) and  
populated planet (2)  
with time

Iz toga sledi da je prosećna temperatura sferne planete nića od prosećne temperature ravne planete.

## Zakljućak

U ovom radu porećena je globalna temperatura planete u slućaju kada je nenastanjena i kada je nastanjena dvema vrstama krasuljaka, predstavnicima biotićkih faktora. To je ućinjeno za slućaj ravne i za slućaj sferne planete. Takoćde, izbacivanjem sistema iz ravnoteće naglom promenom luminoznosti i uvoćenjem ekscentrićnosti orbite ispitivana je otpornost sistema na perturbacije u slućaju ravne planete.

Dobijeni rezultati su pokazali da krasuljci uspešno vrše termoregulaciju i odrćavaju temperaturu planete optimalnom za ćivot duće nego u slućaju kada je ona nenastanjena. Zatim, uspeavaju da odrće stabilnost sistema

pri blažim poremećajima (npr. naglo povećanje luminoznosti zvezde za  $< 0.5$  luminoznosti Sunca). Pri drastičnijim (povećanje za  $> 0.5$  luminoznosti Sunca) umiru. Pokazano je i da se sistem brže vraća u stanje ravnoteže kada je planeta naseljena, nego kada nije.

Dobijeni rezultati su u skladu sa početnom hipotezom koja glasi – krasuljci se prilagođavaju sredini u kojoj se nalaze, ali i nju prilagođavaju sebi, čineći je time optimalnijom za život. Takođe, pokazano je i da sferna planeta omogućava opstanak krasuljaka duže nego što je to moguće na ravnoj, zahvaljujući različitosti temperature po pojasevima geografskih širina, koju ravna planeta nema.

Značaj difuzije se uviđa poređenjem mrežnog modela i modela sivog tela, gde difuzija obezbeđuje stabilniji sistem i duži opstanak krasuljaka u mrežnom modelu, u odnosu na model sivog tela.

Sličan model se može primeniti i na kraće vremenske skale, ali uz precizniji opis mehanike planete (tada bi bilo potrebno uvesti rotaciju i realističniju revoluciju). Takođe, moguće je nadograditi planetu – uvođenjem atmosfere i vazdušnih strujanja (drugačije bi izgledala razmena toplote između polja), različitih tipova tla i vode (zbog različite verovatnoće nastajanja određenih tipova krasuljaka), itd. U biološkom smislu, nadogradnja bi podrazumevala uvođenje novih vrsta krasuljaka i drugih oblika života (biljojedi, mesojedi – pomoću njih se uvode migrirajući biotički faktori).

**Zahvalnost.** Autor ovog rada želi da zahvali svojim komentorima na projektu, Borisu Majiću i Stefanu Anđelkoviću, na pomoći u realizaciji projekta, kao i Dimitriju Radojeviću i Miši Jovanoviću na pomoći pri izradi i sređivanju koda.

---

## Literatura

- Bahcall J. N., Pinsonneault M. H., Basu S. 2001. Solar models: current epoch and time dependences, neutrinos, and helioseismological properties. *The astrophysical journal*, **555**: 990.
- Pujol T., Fort J., Mendez V. 2005. Consequences of inter-specific competition among multiple adaptive species in Daisyworld. *Theoretical and Applied Climatology*, **81** (3): 137.
- Von Bloh W., Block A., Schellnhuber H. J. 1997. Self-stabilization of the biosphere under global change: a tutorial geophysiological approach. *Tellus*, **49B**: 249.
- Watson A. J., Lovelock J. E. 1983. Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. *Tellus*, **35B**: 284.

---

*Sanja Mihajlović*

## “Daisyworld” Model Implementation Using Probabilistic Cellular Automata

In this project, the “Daisyworld” model has been implemented with probabilistic cellular automata, in order to examine the influence of biotic factors on the habitability of a planet. Biotic factors are represented with two types of daisies: black and white. The model has been tested for a flat and for a planet modeled as a sphere (unlike previous papers, which have been studying only the flat-planet model). The results have shown that daisies tend to maintain the planet’s temperature close to a value which enables them maximal growth. That is, they raise the temperature when lower than optimal, and lower when higher.

These results were obtained in three cases. In one, the change of the temperature of the planet is caused by the change of luminosity of the star over time, in the second by the eccentric orbit of the planet, and in the third by sudden change of luminosity. Also, in this project a model of a planet as a gray body has been studied, in order to examine the influence of diffusion on temperature regulation.

