

Ispitivanje strukture u raspodeli Zemaljskih sudarnih kratera

U ovom radu ispitano je da li postoji vremensko grupisanje i periodičnost u nastajanju sudarnih kratera na Zemlji, kao i efekat erozije na kraterne. Pri analizi uticaja erozije korišćen je rezultat modela Neukuma i Ivanova (1994. U Hazards Due to Comets and Asteroids (ed. T. Gehrels)), koji govori da je frekventnost udara u prethodnih 2 milijarde godina bila približno konstantna. Periodi u kojima erozija ima isti ili zanemarljiv učinak utvrđeni na osnovu odstupanja od pretpostavljene raspodele konstantnog fluksa na grafiku. Izračunati periodi su 0-110 i 110-550 miliona godina. Ustanovljeno je da grupisanja kratera na većim vremenskim skalama nije bilo, već se ono javlja u mikro-grupama. Značajne periodičnosti nisu primećene. Posmatranjem razlika u raspodeli prečnika kratera sa raspodelom prečnika najčešćih impaktora, NEA (Near Earth Asteroids) asteroida, uočava se da svi krateri prečnika većeg od 2 km erodiraju jednakom stopom, nezavisnom od prečnika.

Uvod

Sudari tela sa Zemljom su igrali važnu ulogu u njenom formiranju i razvoju. Za razliku od Meseca, na kome svaki udar rezultuje kraterom, Zemlja je zaštićena atmosferom i stoga samo tela većih dimenzija ostave traga na njenoj kori. Uticajem vode, vetrova i drugih faktora, krateri koji nastanu na Zemlji vremenom erodiraju i nestaju. Erozija je, doduše, prisutna i na Mesecu, pre svega zbog posledica udara mikrometeorita, mada neuporedivo slabija nego na Zemlji. Iz ovog razloga je otežana detekcija starijih kratera, posebno na geološki mladim po-

dručjima. Samim tim je otežana analiza vremenskih struktura u raspodeli kratera, koja je izuzetno važna za izučavanje malih tela Sunčevog sistema.

U idealnom slučaju, kada ne bi bilo erozije i kada bi udarni fluks bio konstantan, ukupan broj kratera na Zemlji bi linearno rastao sa vremenom.

Ukupan broj kratera prečnika većeg od 1 km, jer je manjim kraterima teško odrediti poreklo, stvorenih za godinu dana na Mesecu u periodu od prethodnih t milijardi godina po kvadratnom kilometru površine je (Neukum i Ivanov 1994):

$$\phi(1) = 3.77 \cdot 10^{-13} \exp(6.93 t) + 8.38 \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

Iz formule (1) se vidi da je frekventnost udara bila približno konstantna na Mesecu. Stoga ćemo pretpostaviti da je za isti period fluks bio konstantan i na Zemlji. Iz ove pretpostavke sledi da će sva odstupanja od linearne zavisnosti biti posledica erozije, nedovoljne istraženosti kopna ili manjih nepravilnosti u frekventnosti udara. Kako je potrebno vreme da bi krater erodirao dovoljno da postane nedetektabilan, očekuje se da će postojati periodi u kojima će kumulativan broj kratera održati linearno opadanje sa vremenom.

Najveći broj kratera, nakon završetka epohe kasnog bombardovanja pre 3.8 milijardi godina, nastao je kao posledica sudara sa NEA (engl. *Near Earth Asteroids*) objektima, asteroidima koji se u nekom delu svoje putanje nađu na rastojanju manjem od 1.3 astronomske jedinice od Sunca. Formula koja povezuje prečnik udarnog kratera (D) i impaktora (d) oblika je

$$3 \log d = C_1 + C_2 \log D, \quad (2)$$

Ivana Cvijović (1990), Beograd, Bulevar Avnoja 205/3, učenica 2. razreda Matematičke gimnazije u Beogradu

Tamara Radaković (1990), Novi Sad, Novosadskog sajma 54, učenica 2. razreda Gimnazije "Isidora Sekulić" u Novom Sadu

MENTOR: dr Milan Ćirković, Astronomska opservatorija Beograd

pod pretpostavkom da su gustine i brzine impaktora približno jednake (Hughes 2002) Stoga, možemo smatrati da je

$$\log d \propto \log D \quad (3)$$

Dakle, razlike u raspodelama kratera i NEA objekata po prečnicima ukazaće na razlike u erozivnosti manjih i većih kratera.

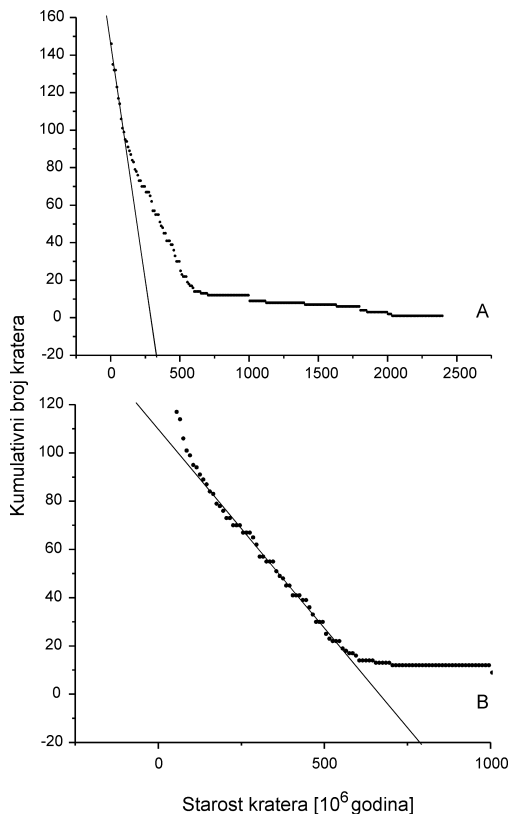
Analiza struktura u raspodeli Zemaljskih sudarnih kratera

Uzorak. U ovoj analizi korišćena je baza podataka o sudarnim kraterima *Earth Impact Database* (Planetary and Space Centre, University of New Brunswick (<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>)). U razmatranje su uzeti podaci o starosti i veličini kratera prečnika većih od 2 km. Krateri manjih prečnika uglavnom su nastali kao posledica sudara sa metalnim objektima, što ukazuje na drugačije poreklo od većih kratera nastalih od kamenih impaktora. Ti krateri su izuzetno mladi, što već nije slučaj sa većim kraterima ($D = 2$ km). Kada bi i njih razmatrali, ne bi imali precizan uvid u populaciju kratera nastalih od kamenih impaktora.

Zavisnost kumulativnog broja kratera od vremena. Pod pretpostavkom da je Zemlja izložena konstantnom flukusu udara, na grafiku zavisnosti kumulativnog broja kratera od vremena (slika 1) odredili smo vremenske intervale na kojima erozija, nema dovoljno izražen uticaj da bi promenila broj detektabilnih kratera. Ti periodi su izračunati određivanjem najboljeg linearnog fita na delovima grafika. Dobijeni periodi su 0–110 Ma (miliona godina) (slika 1A) i 110–550 Ma (slika 1B).

Zavisnost kumulativne raspodele kratera od minimalnog prečnika. Kako bi smo proverili intuitivnu pretpostavku da manji krateri brže nestaju, posmatrali smo promene na kumulativnom grafiku za različitu graničnu vrednost minimalnog prečnika. Uočeno je da se granice tih perioda ne menjaju zavisno od prečnika kratera, što bi moglo da implicira da stopa erozije ne zavisi od prečnika kratera (grafici A, B, C i D, slika 2).

Poređenjem kumulativne raspodele NEO objekata po prečnicima (slika 3B) koju je utvrdio Džozef Skot Stjuart (Stuart 2003), sa istovetnom raspodelom kratera na Zemlji (slika 3A), uočeno je da krive imaju skoro identičan linearni oblik na logari-

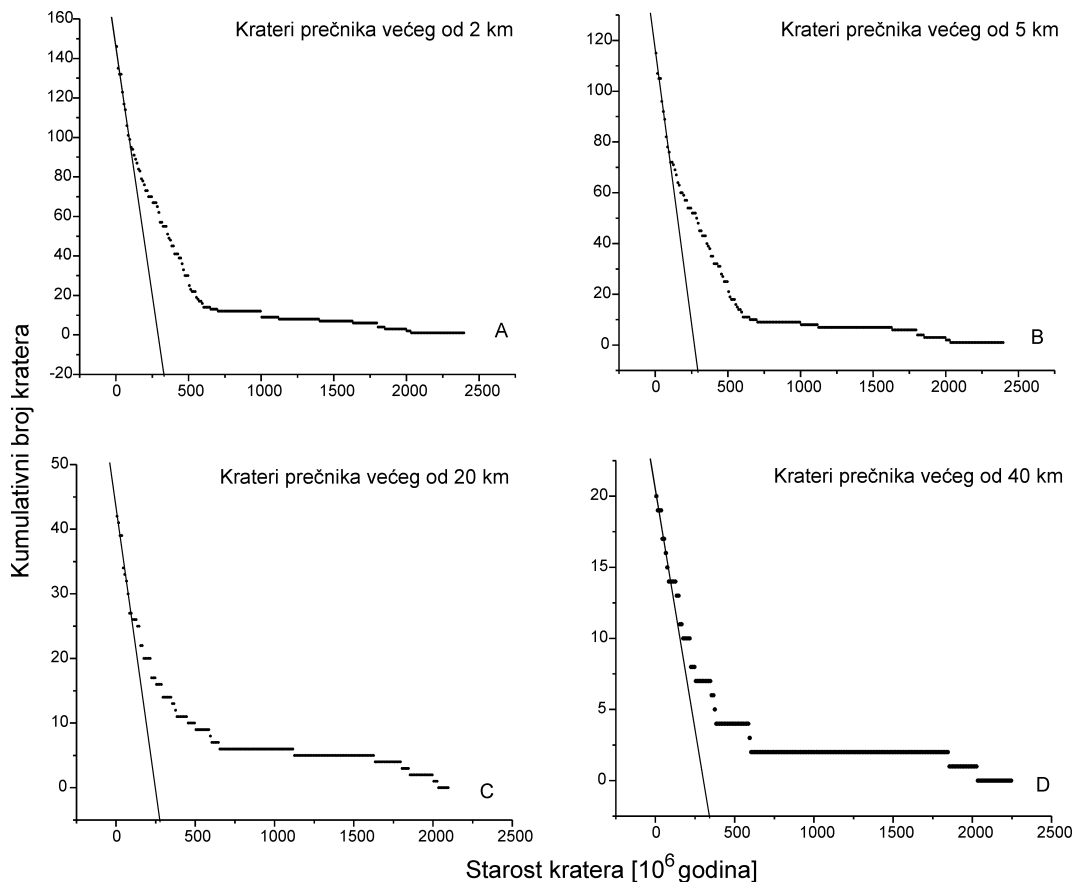


Slika 1. Kumulativna raspodela kratera na Zemlji sa najboljim linearnim fitom na intervalu 0–110 Ma (A) i 110–550 Ma (B), koji određuju period u kome je erozija zanemarljiva, pod pretpostavkom da je Zemlja izložena konstantnom flukusu i da svako odstupanje od linearnog porasta broja kratera ukazuje na uticaj erozije.

Figure 1. Cumulative distribution of craters on Earth with best linear fits on intervals 0–110 Ma (A) and 110–550 Ma (B), in which erosion has same or negligible effect, determined by deviation from conjecturable distribution of constant flux on graph. Horizontal axis – crater age in 10^6 years, vertical – cumulative number.

tamskoj skali. To ukazuje na to da broj kratera koji će se održati i ostati detektabilan ne zavisi od prečnika.

Vremensko grupisanje i periodičnost. Poređenjem raspodele broja kratera u jednakim vremenskim intervalima sa Poasonovom raspodelom, utvrđeno je da na većim vremenskim intervalima (10, 20, 30, 60 Ma) nema statistički značajnog odstupanja od slučajnog, dok se na malim intervalima (5 Ma) dobija statistički značajna razlika ($p < 0.05$).



Slika 2. Kumulativne raspodele kratera za različite vrednosti minimalnog prečnika. Sa grafičkim se vidi da su periodi u kojima je stopa erozije konstantna isti za kratera raznih prečnika. Nagibi prave su različiti, ali periodi nakon kojih zavisnost broja kratera na Zemlji od vremena nije linearan isti je za sve kratera, nezavisno od prečnika.

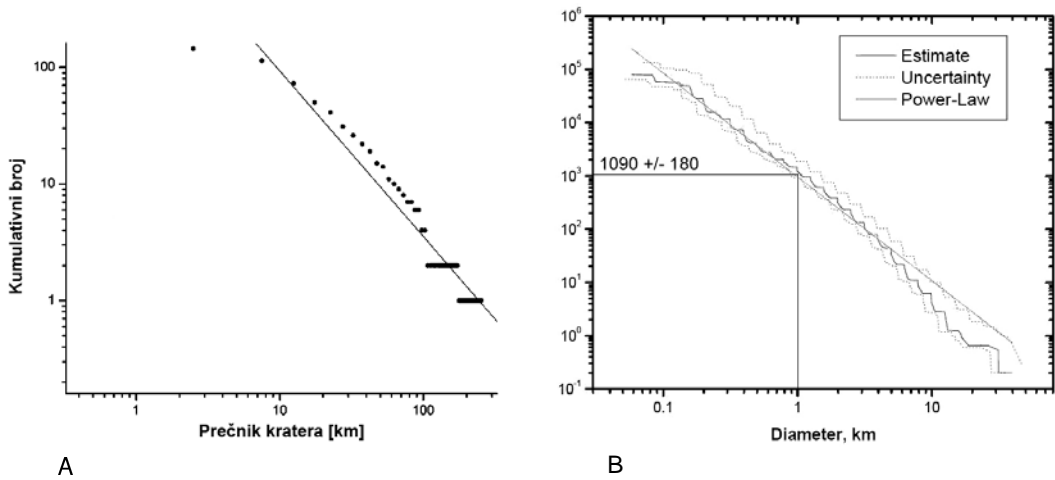
Figure 2. Cumulative distributions of craters for different values of minimal diameter. On graph we can see that periods, where erosion rate is constant, are same for craters of different diameters. Inclinations of lines are variant, but periods where we have best linear fits are same for all craters, substantive from diameter. Horizontal axis – crater age in 10^6 years, vertical – cumulative number. A – craters with minimal diameter of 2 km, B – minimal diameter 5 km, C – minimal diameter 20 km and D – minimal diameter 40 km.

Takođe, ispitivanjem periodičnosti FFT-om, nismo dobili značajniju amplitudu od 1.5 (slika 4). Razlog zašto ovaj rezultat nismo uzeli u razmatranje je nepostojanje kriterijuma po kojem bismo pikove razlikovali od običnog šuma.

Prethodna analiza upućuje na to da u posmatranom periodu nije bilo grupisanja kratera na većim vremenskim skalama. Ono što je ipak moguće jeste da su se sudari događali u mikro-grupama. Na slici 1B mogu se primetiti “stepenice” koje na to ukazuju. Mikrogrupe koje možemo uočiti u proseku su se dešavale sa periodom do 5 Ma.

Diskusija i zaključak

Potrebno je napomenuti da podaci sa kojima raspolazemo ne predstavljaju potpun uzorak kratera na Zemlji. Samo u poslednje 2 decenije 20. veka pronađeno je oko 70 kratera. Dalje, na starim pločama (Severna Amerika, centralni deo Evrope i Australija) koje nisu bile izložene orogenezama u skorijoj geološkoj prošlosti, imamo znatno bolje očuvane kratera, samim tim i uzorak koji je pouzdaniji za analizu. U tim područjima, period u kome je zavisnost ukupnog broja kratera na Zemlji



Slika 3.

A. Kumulativna raspodela kratera na Zemlji po prečnicima na logaritamskoj skali

B. Kumulativna raspodela NEO objekata po prečnicima na logaritamskoj skali (Stuart 2003).

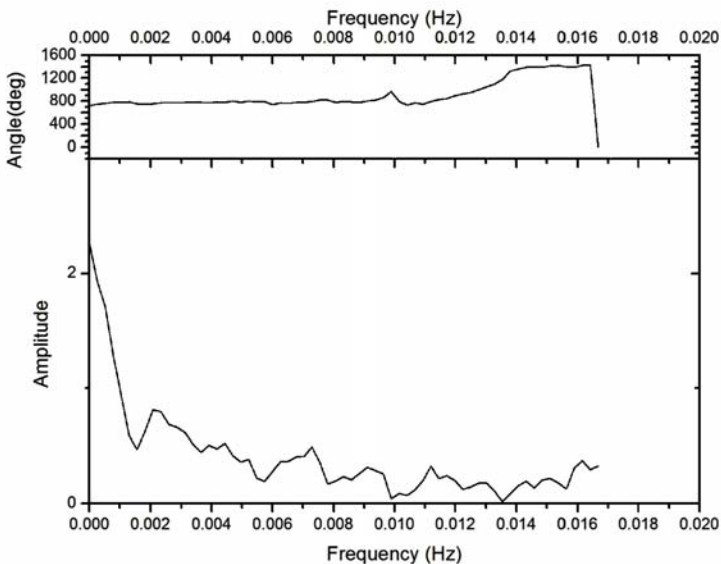
Uočava se sličnost između oblika krivih na graficima A i B. Možemo uvideti da se erozija jednako odrazila na sve kratera na Zemlji zbog čega se raspodela održala.

Figure 3.

A. Cumulative distribution of craters on Earth by diameters on a logarithm scale

B. Cumulative distribution of NEO objects by diameters on a logarithm scale (Stuart 2003).

There is an apparent similarity between the shapes of curves on graphs A and B. We can conclude that the erosion rate was the same on all craters on Earth as the distribution remained the same.



Slika 4.

Ispitivanje periodičnosti. Analizom periodičnosti pomoću FFT, dobili smo mnoštvo nejasnih pikova, sa neznatnim amplitudama, za koje nismo imali kriterijum po kojem bismo ih razlikovali od običnog šuma

Figure 4.

Periodicity analysis.

During the periodicity analysis with FFT, we found many small surges, with slight amplitudes, and we could not establish a criterion for distinguishing them from regular noise.

od vremena linearna procenjen je na $0-125\pm 20$ Ma (Hughes 2000). Analizom našeg uzorka koji uzima u razmatranje celokupnu bazu podataka, procenjen period je od 0 do 110 Ma koji se uklapa u opseg referentnog rezultata. Takođe, utvrđeno je i da za taj interval prosečna starost kratera istog prečnika nije ni u kakvoj korelaciji sa veličinom prečnika, dakle da brzina kojom krateri erodiraju ne zavisi od njihovog prečnika. Kada bi to bilo ispunjeno, manji krateri bi u proseku bili mlađi od većih. Kako su naši rezultati u saglasnosti sa zaključcima izvedeni iz informacija o pouzdanijoj populaciji, imamo dobrih razloga da verujemo da selekcionni efekat nastao kao posledica gorepomenutih činjenica nije presudan za verodostojnost zaključaka.

Literatura

Hughes D. 2000. A new approach to the calculation of the cratering rate of the Earth over the last 125 ± 20 Myr. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **317**: 429.

Hughes D. 2002. The approximate ratios between the diameters of terrestrial impact craters and causative incident asteroids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **338**: 999.

Neukum G., Ivanov B. A. 1994. Crater size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet and asteroid cratering data. U *Hazards Due to Comets and Asteroids* (ed. T. Gehrels). Tuscon, Ariyona: University Arizona Press, str. 359.

Stuart J. S. 2003. Observational Constraints on the Number, Albedos, Sizes, and Impact Hazards of the Near-Earth Asteroids. PhD thesis.

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA. Dostupno na <http://www.ll.mit.edu/mission/space/linear/files/StuartThesis.pdf>

Ivana Cvijović and Tamara Radaković

Analysis of Structural Characteristics in the Distribution of Earth's Impact Craters

In this paper we analyze the existence of time periodic cycles and groupings in the formation of Earth's impact craters. We also analyze the differences in erosion of different-sized craters. The model used was the one given by Neukum & Ivanov (1994), in which the impact frequency in the last 2 billion years is constant. Periods in which erosion has the same or negligible effect were determined by the deviation from the conjecturable distribution of constant flux on the graph. Those periods are 0-110 My and 110-550 My. We determined that there were no large-scale time groupings in the formation of the craters, while small-scale groupings are widely present. No significant periodic cycles were recognized. By observing the differences in the size-distribution of the craters and their most common impactors, NEA (Near Earth Asteroids), we concluded that all the craters of a diameter greater than 2 km have the same erosion rates, independent of their size.

