

## **Hrvatska geološka ljetna škola**

### **3. proljetni seminar za učitelje i nastavnike geografije u osnovnim i srednjim školama Republike Hrvatske**

Godina VI.

Zagreb,  
18. travnja 2017.



## **Knjiga predavanja**

Urednici:

Josipa Velić, Tomislav Malvić, Jasenka Sremac, Ivo Velić

## **Impresum**

Izdavač: Hrvatska geološka ljetna škola, 2017.

Za izdavača: Ivo Velić, predsjednik Udruge

Urednici: Josipa Velić, Tomislav Malvić, Jasenka Sremac, Ivo Velić

Naklada: e-knjiga

ISBN: 978-953-58069-1-2

## **Napomena**

Sva prava pridržana, HGLJŠ, 2017.

## Organizator

**Hrvatska geološka ljetna škola**

<http://geoloskaljetnaskola.hr/>



## **Organizatori i predavači seminara**

### **Organizatori**

Dr. sc. Ivo Velić, znanstveni savjetnik, HGLJŠ

Dr. sc. Josipa Velić, prof. emer., HGLJŠ

Zlatko Špoljar, dipl. ing., HGLJŠ

Vesna Milić, dipl. geogr., Agencija za odgoj i obrazovanje

### **Predavači**

Dr. sc. Željko Andreić, red. prof.

Dr. sc. Uroš Barudžija, doc.

Dr. sc. Karmen Fio-Firi

Dr. sc. Tomislav Malvić, izv. prof.

Dr. sc. Jasenka Sremac, red. prof.

Dr. sc. Ivo Velić, znanstv. savj.

Dr. sc. Josipa Velić, prof. emer.

Dr. sc. Igor Vlahović, akad.

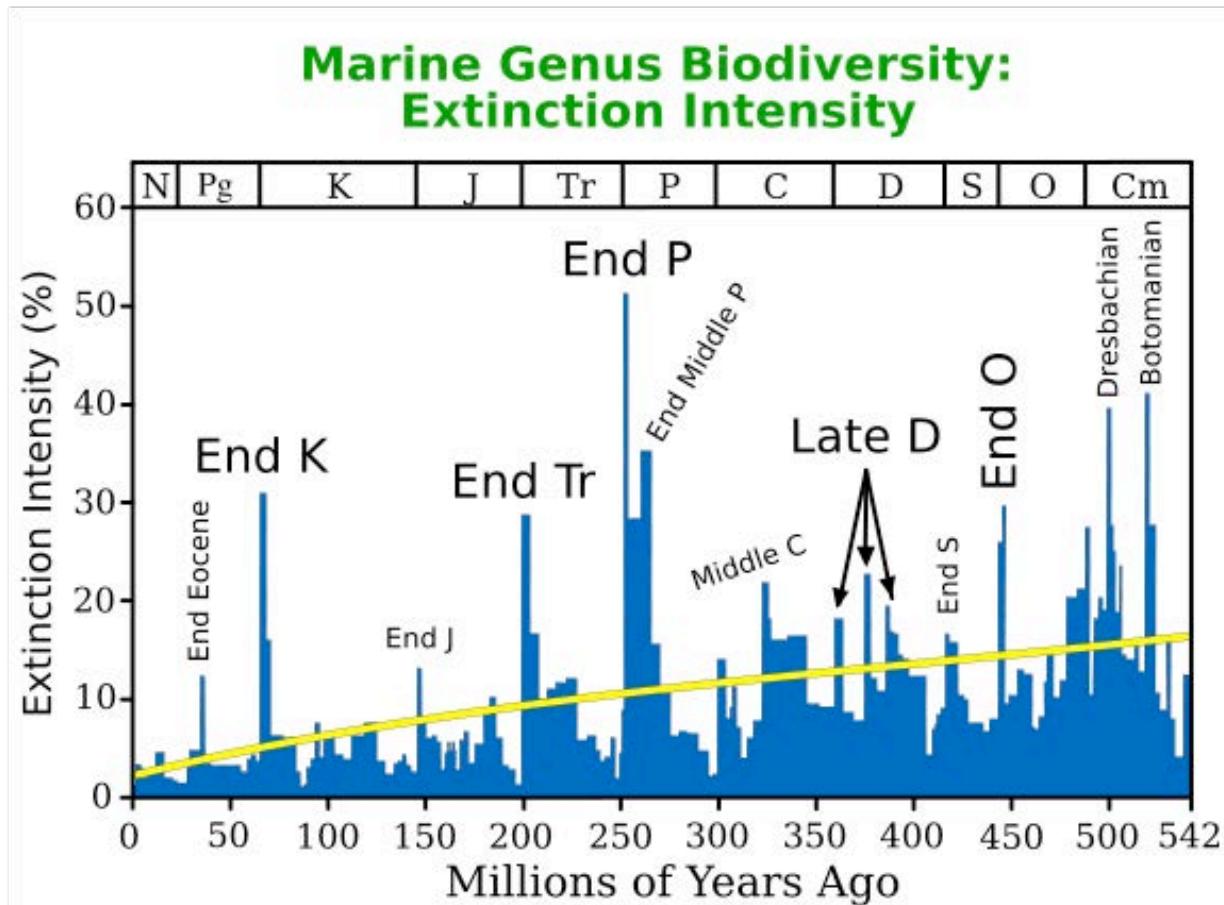
## SADRŽAJ

<b>Uvodnik</b>	<b>1</b>
[Vesna Milić]	
 <b>Poglavlja koja prate red izlaganja</b>	
1. «OKIDAČI» PET MASOVNIH IZUMIRANJA TIJEKOM GEOLOŠKE PROŠLOSTI [Jasenka Sremac]	3
2. O ASTEROIDIMA KAO UZROČNICIMA MASOVNIH IZUMIRANJA [Željko Andreić, Tomislav Malvić]	21
3. IZUMIRANJE NA GRANICI PERMA I TRIJASA NA PRIMJERU IZ HRVATSKE [Igor Vlahović, Karmen Fio-Firi]	35
4. MASOVNI VULKANIZMI KAO IZROČNICI MASOVNIH IZUMIRANJA [Uroš Barudžija, Tomislav Malvić]	51
5. IZUMIRANJE NA GRANICI KREDE I PALEOCENA S PRIMJERIMA IZ HRVATSKE [Ivo Velić]	63
6. ANTROPOCEN – EPOHA OBILJEŽENA TRAJNIM UTJECAJIMA ČOVJEKA [Josipa Velić, Zlatko Špoljar]	73

Ova knjiga priređena je za izvedbeni program

3. proljetnoga seminara za učitelje i nastavnike geografije u osnovnim  
i srednjim školama  
u organizaciji Agencije za odgoj i obrazovanje i Hrvatske geološke  
ljetne škole

18. travnja 2017.



## UVODNIK

Vesna MILIĆ

Stručno usavršavanje jedna je od obveza, ali i sve naglašenija potreba učitelja i nastavnika koju nameće vrijeme u kojem ostvaruju svoju profesionalnu ulogu. Agencija za odgoj i obrazovanje kontinuirano, na različite načine prati potrebe učitelja i nastavnika geografije u domeni stručnoga usavršavanja. Uzimajući u obzir potrebe učitelja i nastavnika te relevantne i nove koncepte koji se pojavljuju u geografiji i u područjima određenih prirodnih, društvenih i humanističkih znanosti s kojima je geografija povezana, kreira programe stručnoga usavršavanja.

Program 3. proljetnog seminara za učitelje i nastavnike geografije izrađen je u suradnji udruge „Hrvatska geološka ljetna škola“ i Agencije za odgoj i obrazovanje i posvećen je konceptu izumiranja u geološkoj prošlosti Zemlje. Koncept je raščlanjen i predstavljen kroz šest tema koje odgovaraju na pitanja: Koji su to okidači pet masovnih izumiranja u geološkoj prošlosti Zemlje; Jesu li asteroidi koji su pali na Zemlju uzročnici masovnih izumiranja; Mogu li se masovni vulkanizmi povezati s masovnim izumiranjem; Kakvo je bilo izumiranje na granicama perma i trijasa te na granici krede i paleocena; Postoje li primjeri takvih izumiranja i u Hrvatskoj te na čemu znanstvenici zasnivaju ideju o antropocenu kao najmlađoj geološkoj epohi.

Svaka tema u ovoj e-knjizi predstavljena je u vidu predavanja na Seminaru, ali i opisana i obrazložena te popraćena slikovnim i grafičkim prilozima. Sadržaj e-knjige time postaje izvor znanja koji učitelji i nastavnici mogu koristiti u svojoj nastavnoj praksi. Također, pomaže im u primjeni načela znanstvenosti i aktualizacije u poučavanju te ostvarivanju planiranih odgojno-obrazovnih ishoda u okviru nastavnih programa za geografiju VII. razreda osnovne i I. razreda srednje škole.

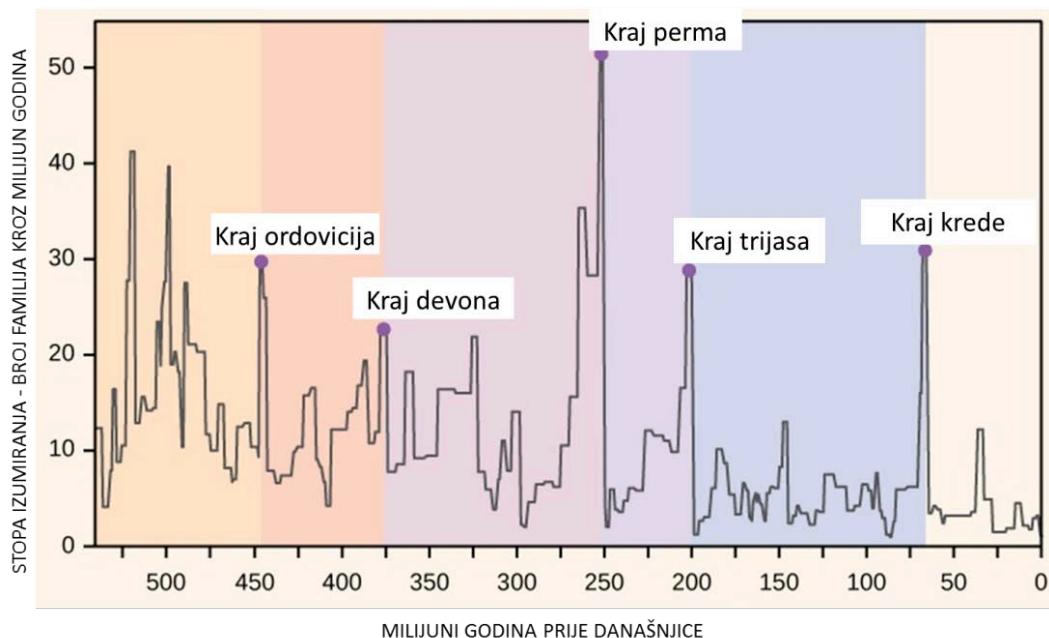
## **UZROCI I POSLJEDICE MASOVNIH IZUMIRANJA TIJEKOM GEOLOŠKE PROŠLOSTI**

## «OKIDAČI» PET MASOVNIH IZUMIRANJA TIJEKOM GEOLOŠKE PROŠLOSTI

Jasenka SREMAC

Pod pojmom **masovno izumiranje (biotička kriza, kriza biodiverziteta)** podrazumijevamo globalni i brzi pad biodiverziteta na Zemlji, koji se najviše očituje kroz naglu promjenu raznolikosti i broja višestaničnih organizama. Pojavljuje se u razdobljima kada brzina izumiranja prijeđe brzinu specijacije (RAUP i SEPkoski, 1982; HALLAM i WIGNALL, 1997; HULL i DARROCH, 2013). Pri tome ne uzimamo u obzir raznolikost i biomasu mikroba, koji čine većinu biomase na Zemlji, jer je njihovo postojanje samo ponekad prepoznatljivo u fosilnom zapisu.

Masovna se izumiranja na Zemlji događaju u nepravilnim vremenskim razmacima (**slika 1**), a u međuvremenu se događaju "pozadinska" izumiranja dinamikom od dvije do pet familija morskih organizama svakih milijun godina. Znanstvenici procjenjuju da je, od postanka života na Zemlji do danas, izumrlo više od 90 % svih nekad živućih vrsta biljaka i životinja. Nakon velikih izumiranja život se na Zemlji obnavlja u novom obliku, naseljavajući ispraznjene ekološke niše (**poveznica 1**).



*Slika 1 : Velika izumiranja geološke prošlosti  
(poveznica 2)*

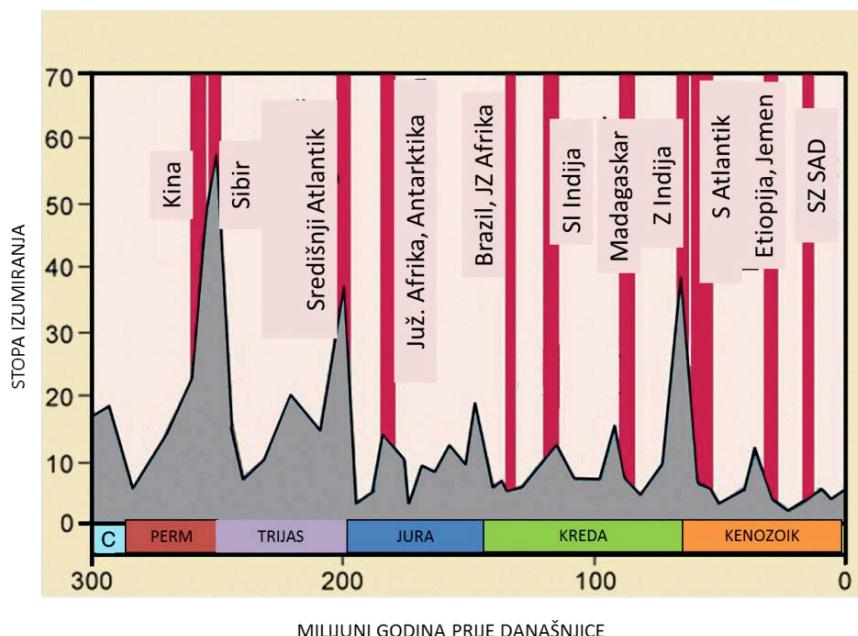
Tijekom fanerozoika Zemlja je prošla kroz nekoliko velikih izumiranja. Bilo ih je najmanje pet, a neki znanstvenici ovoj kategoriji pribrajaju i dvadesetak biotičkih kriza (**slika 1**).

## 1. STRESNI DOGAĐAJI KOJI MOGU DOVESTI DO MASOVNOG IZUMIRANJA

Znanstvenici vode mnoge rasprave o uzrocima masovnih izumiranja, no većina prihvata mišljenje da se krize biote događaju u vrijeme kad je biosfera izložena dugoročnemu stresu, pa dodatno doživi iznenadnu katastrofu (ARENS i WEST, 2006). Zabilježeni katastrofični događaji koji se poklapaju s izumiranjima su masivni bazaltni izljevi, globalni pad morske razine i asteroidni impakti.

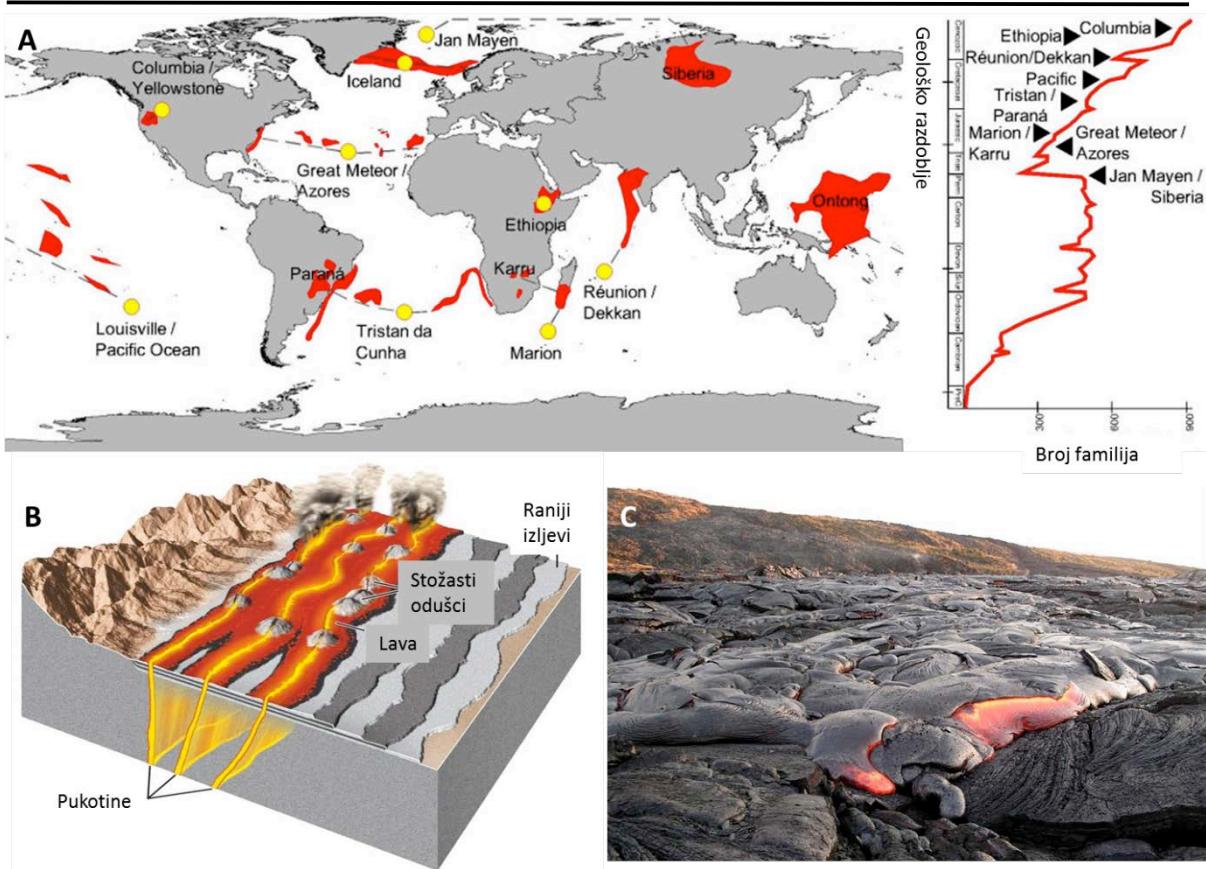
### 1.1. Bazaltni izljevi

Pojavljuju se u pulsirajućem ritmu, nakon dugih razdoblja mirovanja (**slika 2**). Veliki bazaltni izljevi dijelom se nalaze u podmorju. Kontinentalne masivne izljeve u Sibiru i Indiji (Dekkan) povezujemo s masovnim izumiranjima u geološkoj prošlosti (**slika 3**).



**Slika 2:** Glavni bazaltni izljevi od perma do danas.

(Crtež: S. Drury, **poveznica 3**)



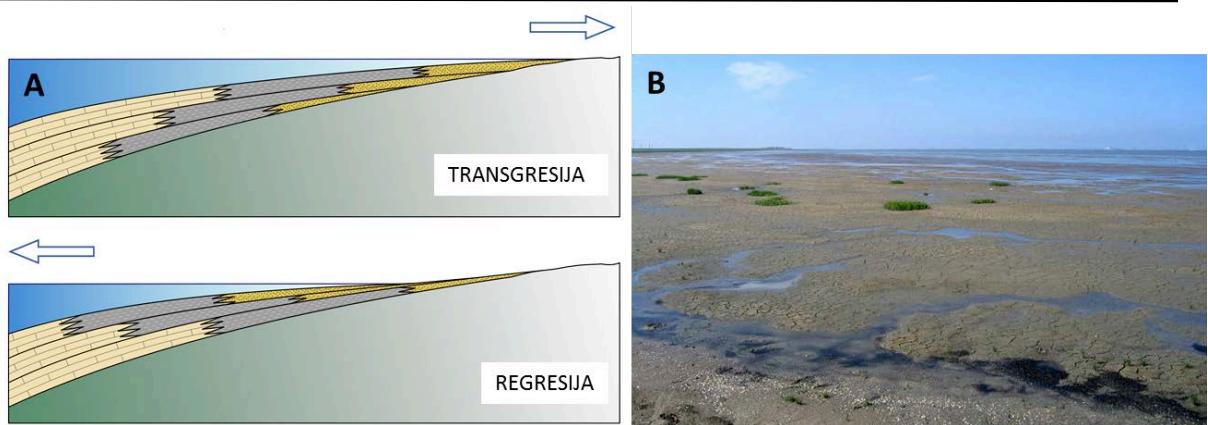
**Slika 3:** A. Veliki bazaltni izljevi na Zemlji (crveno) (BRESSAN, 2011). B. Blok-dijagram koji pokazuje kako se nadograđaju bazaltne terase izljevanjem lave duž izduljenih pukotina (poveznica 4). C. Hlađenje lave na Havajima (poveznica 5)

Bazaltni izljevi utječu na biosferu na sljedeći način:

- Proizvode prašinu i aerosolne čestice, čime onemogućuju fotosintezu, te dolazi do kolapsa hranidbenih lanaca na kopnu i u morima,
- Ispuštaju sumporne okside, koji čine oborine kiselim i doprinose dalnjem kolapsu prehrambenoga lanca,
- Ispuštaju ugljikov dioksid, koji će, nakon što se prašina i aerosolne čestice istalože, dovesti do globalnoga zatopljenja.

## 1.2. Globalni pad morske razine

Ovakvi su događaji zabilježeni više puta tijekom geološke prošlosti, a prepoznatljivi su diljem svijeta u taložnim sljedovima (slika 4).



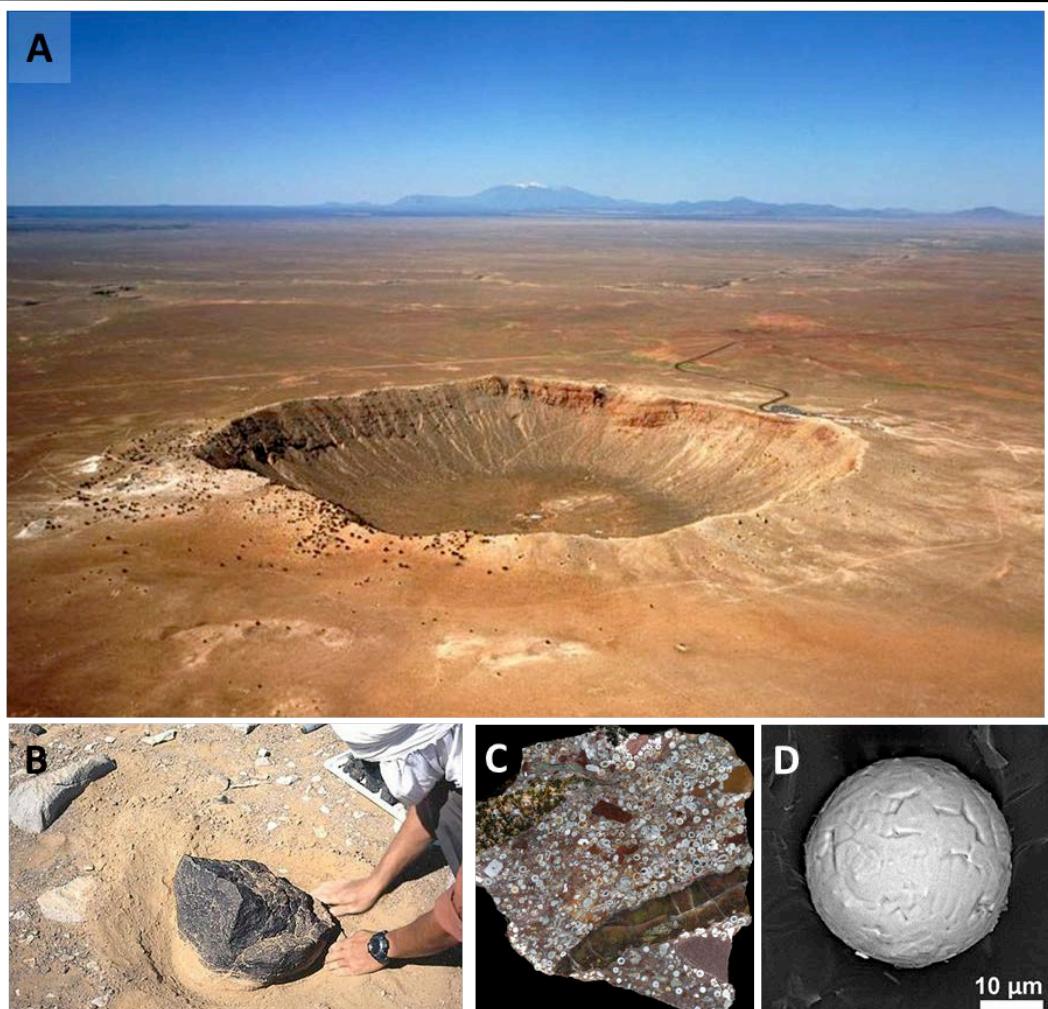
*Slika 4: A. Shematski prikaz porasta i pada morske razine (poveznica 6); B. Plimna ravnica na sjeveru Njemačke u vrijeme oseke (poveznica 7)*

Na otvorenim profilima (npr. u kanjonima, kamenolomima, usjecima prometnica) u stijenama je vidljiva postupna promjena taložnih okoliša, od dubokomorskih, preko plikomorskih, sve do plažnih i, konačno, kopnenih. Pad morske razine može biti posljedica niza uzroka (npr. zarobljavanja velike količine vode u ledenom pokrovu). Zbog regresije smanjuje se površina kontinentskih šelfova, na kojima se bioprodukcijom (proizvodnjom mineralnih skeleta) kontrolira globalni ciklus ugljika, a time i klimatski uvjeti.

### 1.3. Impakti

Sila teže neprekidno privlači nebeska tijela koja se nađu u blizini Zemlje. Dok manja izgaraju u atmosferi, dijelovi većih tijela mogu dospjeti do Zemljine površine (**slika 5**). Udar velikoga asteroida ili kometa može proizvesti golemu količinu prašine i aerosola, zastrijeti Sunce i dovesti do kolapsa hranidbenoga lanca. Zemljom se mogu proširiti požari epskih razmjera, a moguća je i pojava megatsunamija.

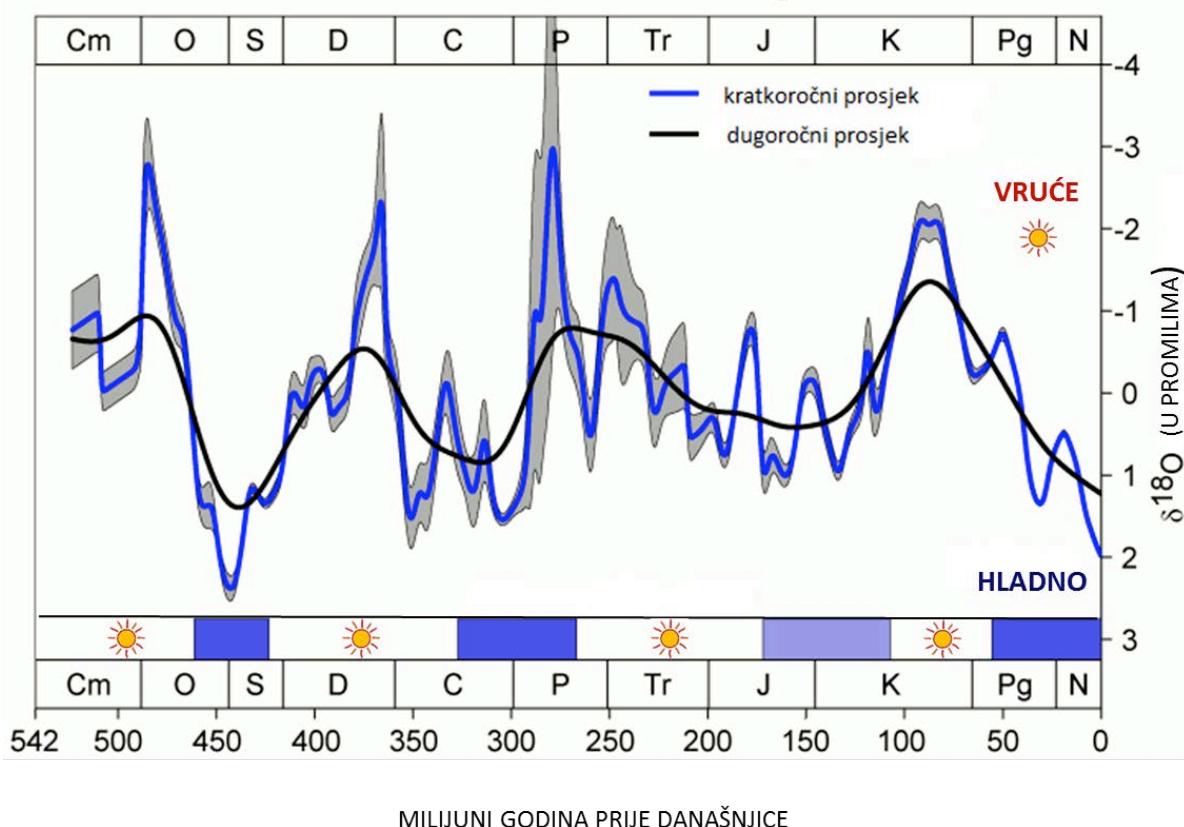
Na Zemlji se mogu naći dijelovi meteorita, a ponekad i krateri (**slika 5**). Veliki udarni krateri iz geološke prošlosti nisu uvijek vidljivi na površini Zemlje (npr. mogu biti pokriveni mlađim naslagama) no rastaljene kapljice, sferule, mogu se naći raspršene u stijenama (JOHNSON & MELOSH, 2012) (**slika 5**). O asteroidima kao uzročnicima masovnih izumiranja možete pročitati detaljnije u zasebnome poglavljju.



**Slika 5:** A. Barringerov krater u Arizoni (poveznica 8). B. Meteorit u Sahari (poveznica 9). C. Impaktne sferule u stijeni, Zapadna Australija (poveznica 10). D. Mikrofotografija magnetitne sferule koja je nastala impaktom prije 12.800 g., New Meksiko (poveznica 11)

#### 1.4. Znakovita promjena klime (zahladnjenje ili zatopljenje)

Tijekom geološke prošlosti klima se neprekidno mijenjala. Kroz dulja razdoblja možemo te promjene objediniti, pa klimatsku povijest Zemlje podijeliti na "staklenička" i "ledenjačka" megarazdoblja (**slika 6**).



*Slika 6: Vruća (označena suncem) i hladna (plavo) razdoblja u povijesti Zemlje (poveznica 12)*

Globalna zahladnjenja uzrokuju izumiranje ili migraciju prema ekvatoru brojnih vrsta polarnih i umjerenih staništa. Zbog zarobljavanja vode u ledenom pokrovu, ledena su doba redovito popraćena sušom.

Globalna zatopljenja imaju suprotan efekt. Proširuje se tropski pojas, dok umjerene vrste nestaju ili migriraju prema polovima. Istovremeno polarne vrste gube staništa, njihov broj pada ili izumiru. Klima često postaje vlažnija, zbog otapanja snijega i leda. Kao popratna pojava pojavljuje se i raslojavanje oceanske vode i oceanska anoksija (WARD i sur., 2005).

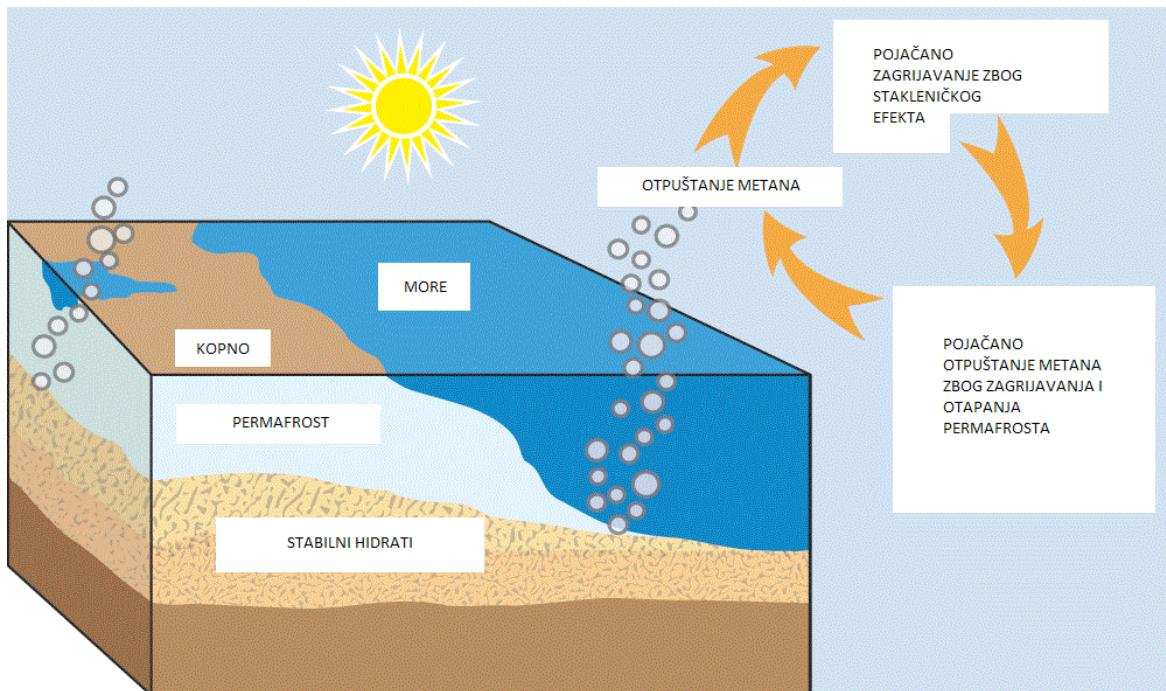
### 1.5. Metanski udar

Velike količine metana nalaze se zarobljene na morskome dnu. Zbog zatopljenja se oslobođaju i, u obliku mjejhura, putuju prema površini (slike 7 i 8). Taj plin ima 30 puta jače djelovanje od CO<sub>2</sub> i stvara efekt staklenika.

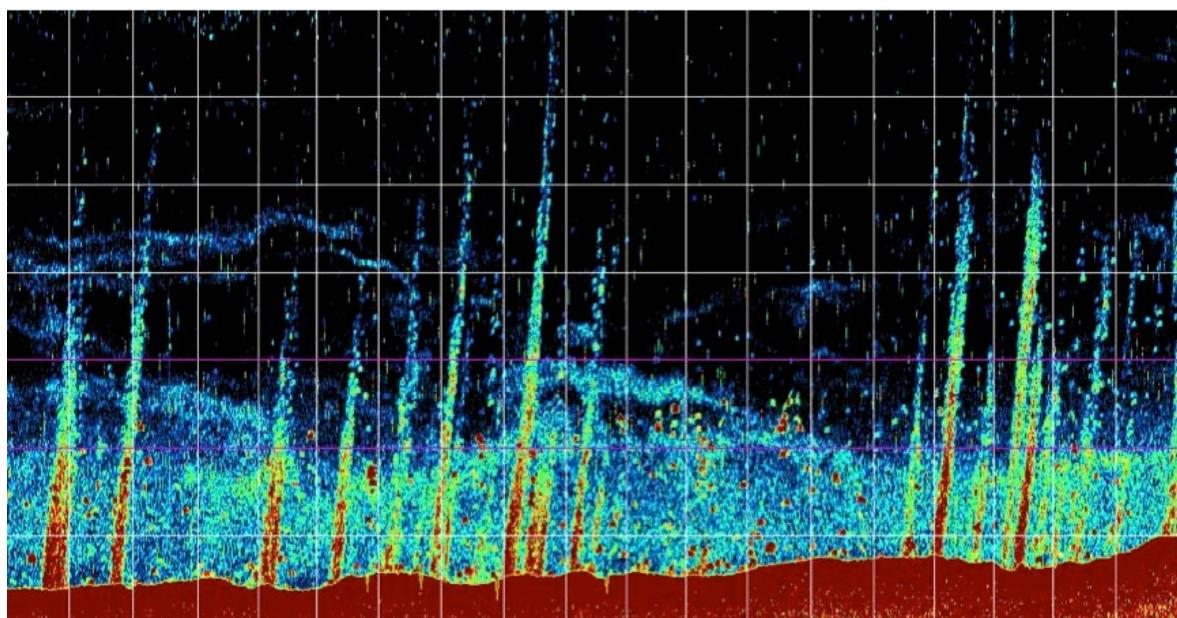
Kod naglog porasta temperature ili pada morske razine, pa čak i pri snažnijim potresima, može doći do oslobođanja velike količine metana, koji, kao staklenički plin, može jako ubrzati proces zatopljavanja. Kad bi se otpustile sve zalihe metana, globalna bi temperatura porasla za

6°C, dok bi temperatura na polovima skočila čak za 12°C. Ledene bi se kape otopile, a, pri najgorem scenariju, globalna bi se morska razina podigla za 80 m.

Prepostavlja se da su metanske erupcije u nekoliko navrata utjecale na biotičke krize u Zemljinoj prošlosti. U sedimentnim stijenama ih možemo prepoznati po naglome negativnom skoku u omjeru ugljika-12 i ugljika-13.



**Slika 7:** Zbog otapanja permafrosta dolazi do otpuštanja metana na dnu Arktičkog oceana  
([poveznica 13](#))

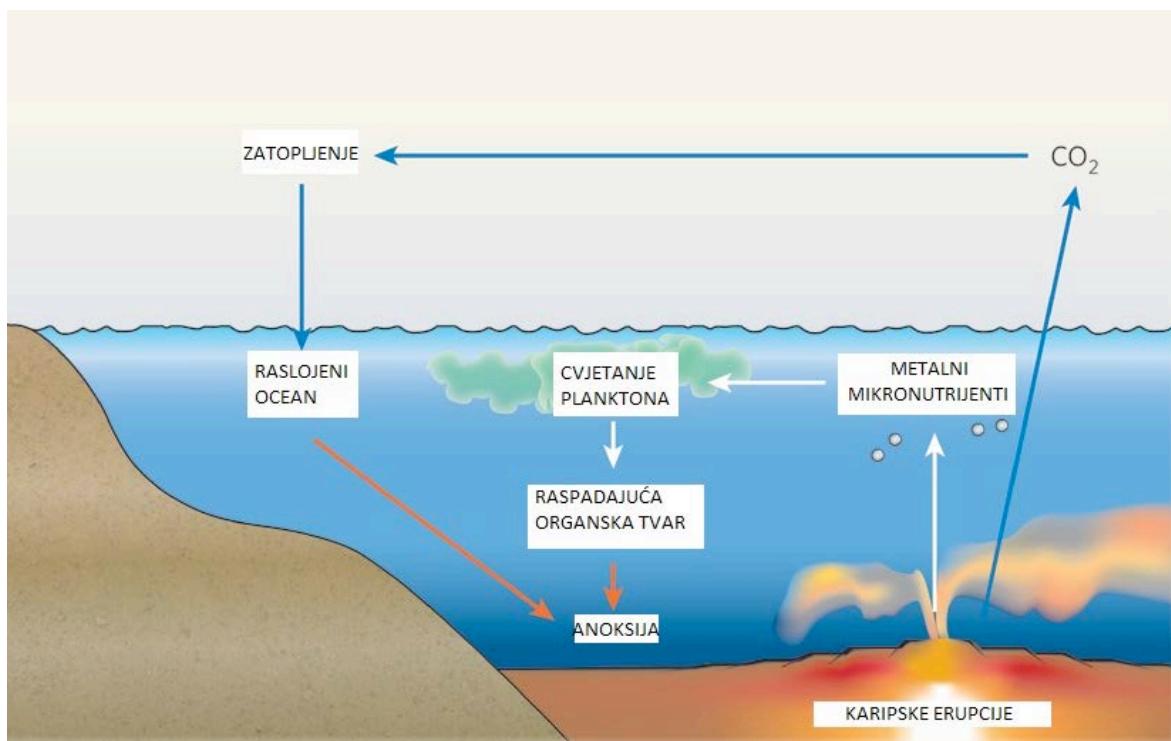


**Slika 8:** Otpuštanje metana zbog razlaganja hidrata zabilježeno sonarom na zapadnom Svalbardu ([THATCHER i sur., 2013](#))

## 1.6. Anoksični događaji i promjena oceanske cirkulacije

Tijekom anoksičnih događaja dolazi do manjka kisika u srednjim, pa čak i gornjim slojevima oceansa. Raslojavanje oceanske vode i anoksija ispod termokline, zabilježeni su i u današnjim okolišima. Takve se epizode povezuju s naglim globalnim zatopljenjem, najčešće izazvanim masivnim vulkanizmom (**slika 9**).

Na početku i na kraju oledbi također su zabilježeni poremećaji u termohalinoj cirkulaciji. Slana površinska voda tone i potiskuje dubokomorsku vodu, siromašnu kisikom na površinu. Na taj način stradavaju organizmi koji nastanjuju površinske i srednje slojeve vode, inače bogate kisikom.

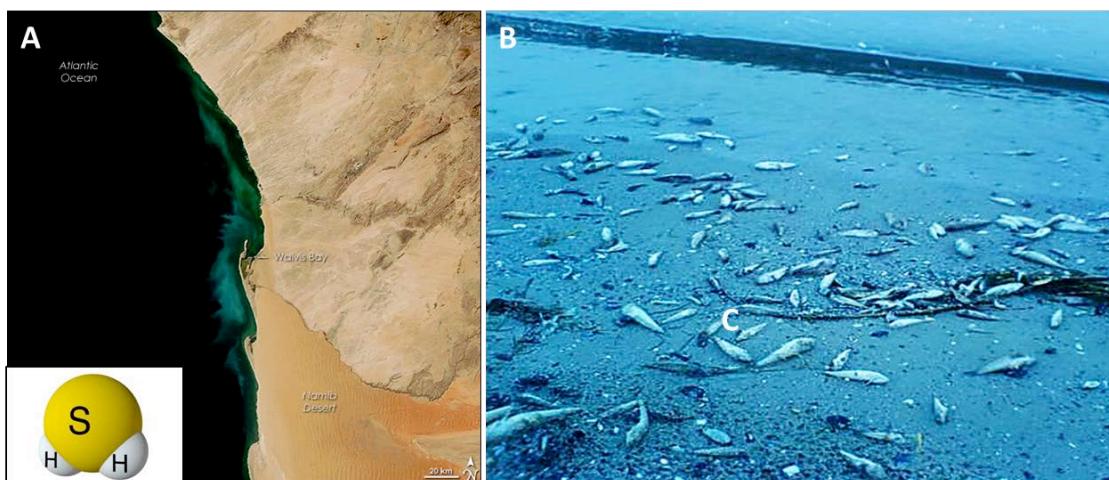


*Slika 9: Model anoksije na području Kariba tijekom razdoblja krede (TURGEON i CREASER, iz BRALOWER, 2008)*

Na anoksiju nas upućuju taložine crnih šejlova, no one mogu predstavljati i lokalnu pojaviu. Na globalnoj razini anoksične događaje prati selenova anomalija. Zbog konverzije topljivih selenata u slabije topljive selenide ( $Se^{2+}$ ) dostupnost selena tijekom izumiranja pada na toksičnih oko 1% današnje koncentracije.

## 1.7. Otpuštanje sumporovodika iz mora

Zbog velikog zatopljenja može se narušiti ravnoteža između fitoplanktona (photosinteza) i dubokomorskih sulfat-reducirajućih bakterija, što može dovesti do masivnih emisija sumporovodika, trovanja organizama i, dodatno, slabljenja ozonskog sloja i smrtonosnih doza UV radijacije.



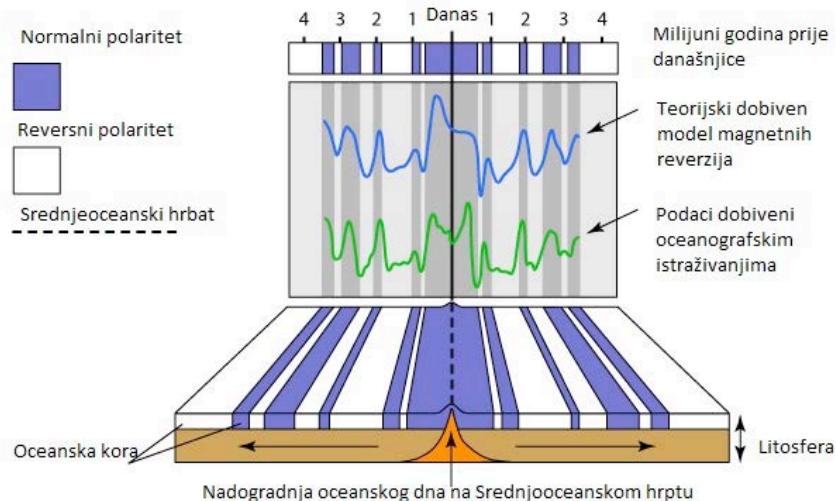
*Slika 10: A. Zbog emisije sumporovodika, površinske vode uz obale Namibije su obojane zelenom bojom (poveznica 14). B. Masovni pomor riba na obalama Crnog mora zbog sumporovodika (plaža Koblevo) 2012. godine (poveznica 15)*

## 1.8. Izboji gama-zraka

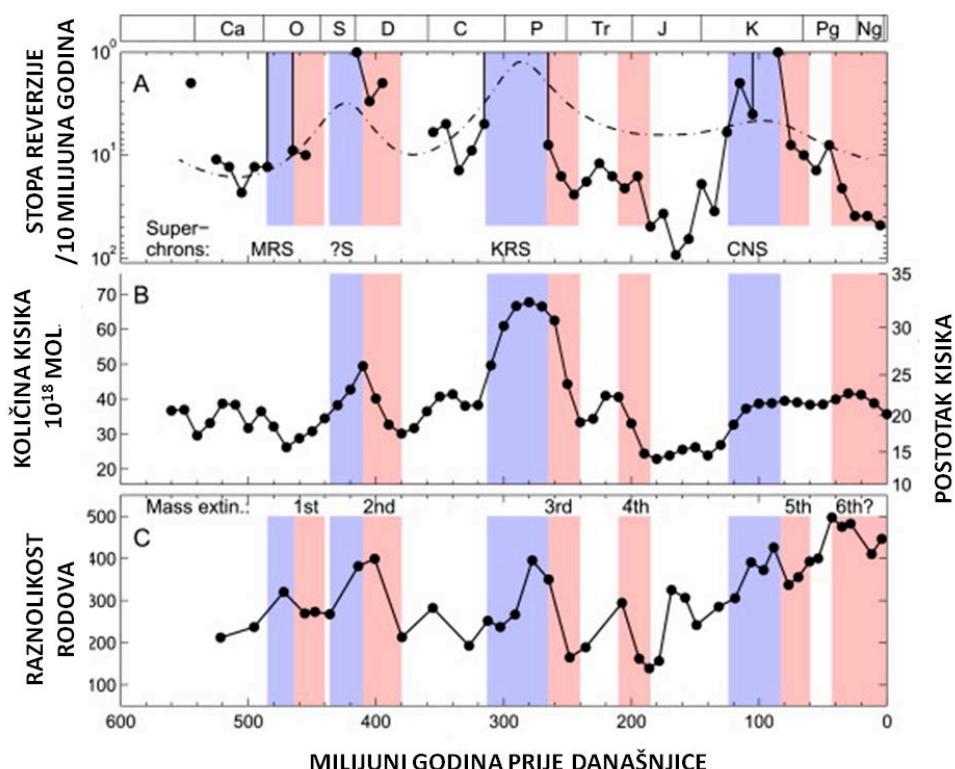
Snažan izboj gama-zraka na udaljenosti manjoj od 6000 svjetlosnih godina mogao bi uništiti Zemljin ozonski sloj i izložiti organizme UV zračenju sa Sunca. Kratki bljeskovi gama-zraka (kraći od 2 sekunde) nastaju u sudaru neutronskih zvijezda. Dugi izboji (obično traju oko 3 minute) nastaju eksplozijom velikih zvijezda, a posljedica je nastanak crnih rupa. Nekoliko dugih bljeskova otkriveno je između 2010. i 2012., a najduži zabilježeni izboj trajao je 7 sati (poveznica 16).

## 1.9. Promjena položaja magnetnih polova

Promjene magnetnih polova prirodni su geološki fenomen i događale su se više stotina puta u povijesti Zemlje. Promjene Zemljinoga polariteta najbolje se očituju na mjestu prirasta oceanske kore, na Srednjeatlantskom hrptu (slika 11).



**Slika 11:** Magnetni profil kroz Srednjoatlantski hrbat, s vidljivim promjenama polariteta Zemlje (poveznica 17)

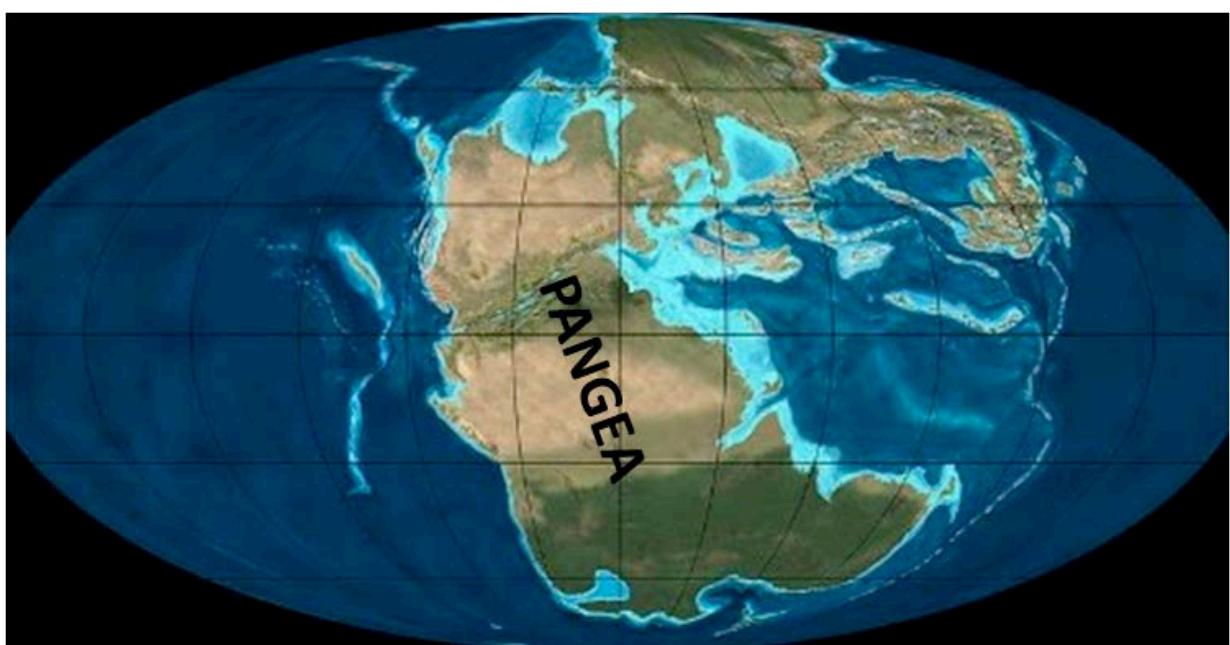


**Slika 12:** Povezanost magnetnih obrata i stope izumiranja (WEI i sur. 2014, iz: DRURY, 2014).

Mnogi od zabilježenih obrata magnetnog polja u Zemljinoj prošlosti ne podudaraju se s velikim izumiranjima. Međutim, kod učestalih reverzija ili dugotrajnog kolebanja, slabljenje Zemljinoga magnetnog polja otvorilo bi put solarnim vjetrovima, pa bi kisikovi ioni bili odneseni u svemir i došlo bi do globalne anoksije (slika 12) (WEIR i sur., 2014; iz: DRURY, 2014).

## 1.10. Tektonika ploča

Poznato je da su kontinenti i oceani tijekom Zemljine povijesti mijenjali svoj položaj. Neki od položaja mogli su doprinijeti nastanku ledenih doba. Otvaranje i zatvaranje morskih putova dovodilo je do unošenja novih kompetitivnih vrsta u ekosustave, ili do izolacije. Stvaranje superkontinenta Pangea u mlađem paleozoiku (**slika 13**) smanjilo je prostor šelfova, a time utjecalo i na bioprodukciju. Ujedno su golema područja u unutrašnjosti kontinenta bila izložena suši.



*Slika 13: Superkontinent Pangea postojao je od karbona do trijasa (od 335 do 175 milijuna godina prije današnjice) (poveznica 18)*

## 2. VELIKA IZUMIRANJA U PROŠLOSTI ZEMLJE

### 2.1. Kraj ordovicija

Ovo je prvo od zabilježenih velikih izumiranja u fanerozoiku, i ujedno jedno od najvećih. Obuhvaća niz kriznih događaja, od koji je zadnji zabilježen između 455 i 430 milijuna godina prije današnjice.

Utjecalo je na gotovo sav tadašnji živi svijet, a posebice na ramenonošce, bodljikaše, školjkaše, mahovnjake i koralje. Pripisuje se naglom zahladnjenu i stvaranju ledenog pokrova, te glacioeustatskom padu morske razine. Ima i mišljenja da je došlo do izboja gama-zraka, pojačanog vulkanizma i trovanja toksičnim metalima (MELOTT i sur., 2004; KATZ, 2015).

## 2.2. Kasni devon

Izumiranje u kasnom devonu dogodilo se približno prije 375 do 360 milijuna godina. Slično kao u ordoviciju, mogu se razlikovati najmanje dva krizna događaja. Izumiranje je bilo popraćeno oceanskom anoksijom (BOND i WIGNALL, 2008). Organska tvar, koja se nije raspala, zadržala se u poroznim grebenskim strukturama, pa su stijene ove starosti ponekad naftnomatične. Postoji čitav niz teorija o "okidačima" ovog izumiranja. Među njima se spominju impakt, magmatizam, ali i evolucija višeg bilja (ALGEO i sur., 1995; RICCI i sur., 2013).

## 2.3. Kraj perma

Krajem perma i na granici perm/trijas došlo je do najgore biotičke krize koja je ikad pogodila Zemlju, pa je geolozi nazivaju: Veliko izumiranje (Great Dying). Detaljnim istraživanjima stijena ove starosti utvrđeno je, slično kao kod prethodnih izumiranja, da se mogu razlikovati najmanje dva krizna događaja.

Među uzrocima navode se: impakt, masivni vulkanizam (Sibirske terase) (**slika 14**), globalno zatopljenje uzrokovano otpuštanjem metana, promjena morske razine, anoksija i klimatske promjene (FIO i sur., 2010). Prema procjenama znanstvenika, u ovom je izumiranju nestalo više od 95% živog svijeta. O ovom izumiranju postoje objavljeni radovi s područja Hrvatske (FIO i sur., 2010) te će o njemu biti više govora u posebnom poglavljju ove knjige.



*Slika 14: Permska katastrofa očima umjetnika. (José-Luis Olivares/MIT, poveznica 19)*

## 2.4. Kraj trijasa

Krajem perioda trijasa, prije oko 200 milijuna godina, nestalo je oko 34% rodova morskih životinja i mnogi kopneni vodozemci i gmazovi. Teorije o uzrocima izumiranja se razlikuju, a spominju se najčešće promjene klime i morske razine te zakiseljavanje oceana, zatim udar asteroida i na kraju masivni vulkanski izljevi na području Središnjeg Atlantika (DAL CORSO i sur., 2012; ONUUE i sur., 2016).

## 2.5. Kraj krede

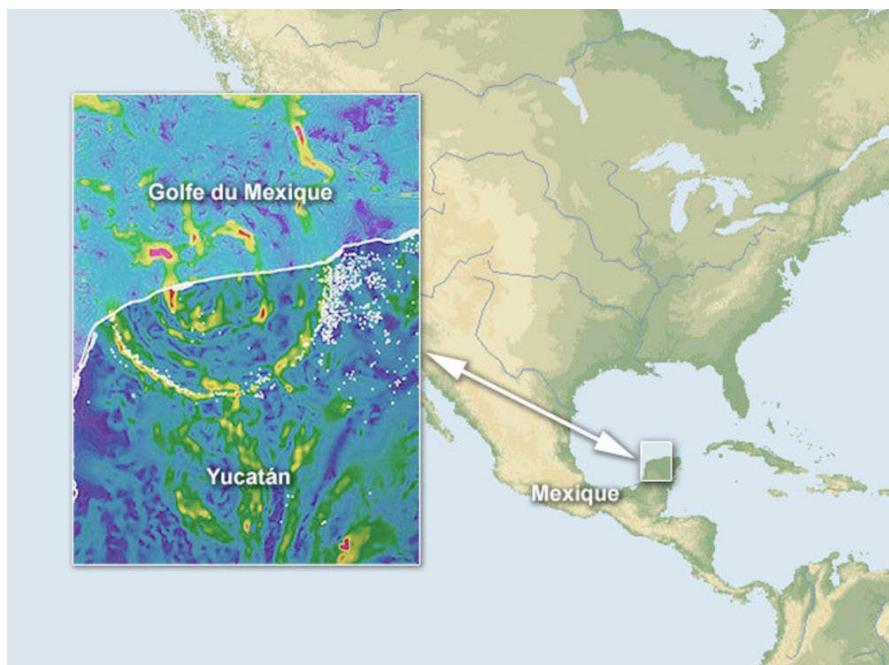
Tijekom krede došlo je do nekoliko manjih stresnih događaja. Među njima zabilježena su i dva oceanska anoksična događaja (OAE). Na prijelazu iz krede u paleogen, prije oko 66 milijuna godina, dogodilo se najpoznatije masovno izumiranje, koje je izbrisalo oko  $\frac{3}{4}$  svih živih bića na Zemlji. Rano je privuklo pažnju znanstvenika, jer su među izumrlim skupinama bili i dinosauri (ELEWA, 2014; BENTON, 2015). Tjelesna masa i način prehrane utjecali su na preživljavanje te se čini da ovu krizu nije preživjela niti jedna životinja teža od 25 kg.

Ovo je izumiranje, prvi puta u povijesti geoznanosti, pripisano impaktu. Dokaze o tome pružaju slojevi obogaćeni iridijem, koji se mogu pronaći diljem svijeta, a prvi su ih objavili ALVAREZ i sur., 1980, ispucala kvarcna zrna i veliki krater odgovarajuće starosti – Chixculub

na Yucatánu (slika 15). Promjer impaktora procijenjen je na 10-15 km. Kolizija je oslobođila energiju milijardu puta veću od nuklearnih bombi koje su pogodile Hirošimu i Nagasaki.

Udar je izazvao globalne požare. Čestice izbačene u atmosferu zastrla su Sunce i dovele do naglog pada temperature (izazvale "nuklearnu zimu"). Jako zahladnjenje je, prema procjenama, trajalo najmanje 3 godine. Udar je izazvao tsunamije golemih razmjera, koji su zabilježeni diljem svijeta, pa i na području Hrvatske (KORBAR i sur., 2015). Sumporne čestice izbačene u atmosferu još su dugo stvarale kisele kiše.

Osobito jak utjecaj imao je ovaj događaj na biljke, fitoplankton i sve organizme neposredno povezane s njima u lancu prehrane. Najveću šansu za preživljavanje imali su organizmi koji se hrane detritusom. Izumiranje su dodatno ubrzali masivni bazaltni izljevi na području današnje Indije (Dekanske terase). Globalni pad morske razine krajem krede također je doprinio masovnom izumiranju.



**Slika 15:** Krater Chixculub s vidljivom koncentričnom kolapsnom strukturu otkrivenom gravitacijskom anomalijom. Bijela crta na karti gravitacijske anomalije označava obalnu liniju (poveznica 20)

### 3. UTJECAJ ČOVJEKA

Svjedoci smo zadnjih godina niza napisa o utjecaju čovjeka na nestanak mnogih vrsta. Stopa izumiranja je porasla na 140 000 vrsta godišnje, tako da znanstvenici već govore o šestom

velikom izumiranju (KOLBERT, 2015). Raspravlja se i o uvođenju novog geološkog razdoblja, antropocena, o kojem će biti više govora u jednom od kasnijih poglavlja.

Mnoge će vrste nestati prije nogu što ih uopće otkrijemo i opišemo. Stoga, širenjem znanja o dusezima katastrofičnih događaja u geološkoj prošlosti, osvješćujemo i krhkost današnjih ekosustava.

*"Upravo u ovom trenutku, koji je za nas sadašnjost, odlučujemo, iako toga uopće nismo svjesni, koji će evolucijski putovi ostati otvoreni, a koji će se zauvijek zatvoriti. Nijedno drugo biće nije nikad bilo u takvom položaju, a to će nažalost, biti naša najtrajnija baština. Šesto izumiranje nastaviti će određivati tijek života dugo nakon što sve što su ljudi napisali, naslikali i izgradili postane prašina..."*

Elisabeth Kolbert

## 4. LITERATURA

### 4.1. Objavljeni radovi

1. Algeo, T.J.; Berner, R.A.; Maynard, J.B.; Scheckler, S.E.; Archives, G.S.A.T. (1995). *"Late Devonian Oceanic Anoxic Events and Biotic Crises: "Rooted" in the Evolution of Vascular Land Plants?"* GSA Today. 5 (3).
2. Alvarez, L. W.; Alvarez, W.; Asaro, F. & Michel, H. V. (1980): Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. Science, 208 (4448).
3. Benton, M. (2015): When Life Nearly Died The greatest mass extinction of all time. Thames & Hudson, 352 str.
4. Bond, D. P. G. i Wignall, P. B. (2008): *"The role of sea-level change and marine anoxia in the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction". Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology. 263, 107–118.* doi:10.1016/j.palaeo.2008.02.015
5. Bressan, D. (2011): Large Igneous Provinces and Mass Extinctions. Scientific American Blog. <https://blogs.scientificamerican.com/history-of-geology/large-igneous-provinces-and-mass-extinctions/>
6. Bralower, T. J. (2008): Earth science: Volcanic cause of catastrophe. Nature, 454, 285-287. doi:10.1038/454285a
7. Dal Corso, J.; Mietto, P.; Newton, R.J.; Pancost, R.D.; Preto, N.; Roghi, G.; Wignall, P.B. (2012). *Discovery of a major negative  $\delta^{13}\text{C}$  spike in the Carnian (Late Triassic) linked to the eruption of Wrangellia flood basalts.* Geology. 40 (1): 79–82. doi:10.1130/g32473.1

8. Drury, S. (2014): Oxygen, magnetic reversals and mass extinctions. Earth-pages. <https://earth-pages.co.uk/2014/04/17/oxygen-magnetic-reversals-and-mass-extinctions/>
9. Elewa, A.M.T. 82014): Causes of Mass Extinctions - With Special Reference to Vanishing Of Dinosaurs. *Greener Journal of Physical Sciences*, Vol. 4 (2), 13-21.
10. Fio, K.; Spangenberg, J. E.; Vlahović, I.; Sremac, J.; Velić, I.; Mrnjek, E. (2010): Stable isotope and trace element stratigraphy across the Permian-Triassic transition in the Velebit Mt., Croatia // *Chemical Geology*, 278, 38-57. doi:10.1016/j.chemgeo.2010.09.001
11. Hallam, T. & Wignall, P. (1997): *Mass Extinctionas and their aftermath*. Oxford Univ. Press, 328 str.
12. Hull, P.M i Darroch, S.A. (2013): Mass extinctions and the structure and function of ecosystems. *Pal. Soc. Papers*, 19, 1-42
13. Johnson, B. C. i Melosh, H.. J. (2012): Impact spherules as a record of an ancient heavy bombardment of Earth. *Nature*, 485, 75-77. doi:10.1038/nature10982
14. Katz, Ch. (2015): New Theory for What Caused Earth's Second-Largest Mass Extinction. National Geographic News. <http://news.nationalgeographic.com/2015/09/15911-metals-extinction-ocean-oxygen-ordovician-silurian/>
15. Keller, G. (2005): Impacts, volcanism and mass extinction: random coincidence or cause and effect? *Australian Journal of Earth Sciences* (2005) 52, 725–757.
16. Kolbert, E. (2015): Šesto izumiranje. Sudbina vrsta u čovjekovim rukama. Znanje, 336 str.
17. Korbar, T., Montanari, A., Premec Fuček, V., Fuček, L., Coccioni, R., McDonald, I., Claeys, P., Schulz, T., Koeberl, C. (2015): Potential Cretaceous-Paleogene boundary tsunami deposit in the intra-Tethyan Adriatic Carbonate Platform section of Hvar (Dalmatia, Croatia), doi:10.1130/B31084.1
18. Melott, A.L.; et al. (2004). "Did a gamma-ray burst initiate the late Ordovician mass extinction?". *International Journal of Astrobiology*. 3: 55–61. <https://dx.doi.org/10.1017%2FS1473550404001910>
19. Onoue, T.; Sato, H.; Yamashita, D.; Ikebara, M.; Yasukawa, K.; Fujinaga, K.; Kato, Y & Matsuoka, A. (2016). "Bolide impact triggered the Late Triassic extinction event in equatorial Panthalassa". *Scientific Reports*, 6, doi:10.1038/srep29609.
20. Raup, D.; Sepkoski Jr, J. (1982). "Mass extinctions in the marine fossil record". *Science*. 215 (4539): 1501–1503.
22. Ricci, J.; Quiddeleur, X.; Pavlov, V.; Orlov, S.; Shatsillo, A. & Courtillot, V. (2013): *New 40Ar/39Ar and K-Ar ages of the Viluy traps (Eastern Siberia): Further evidence for a relationship with the Frasnian–Famennian mass extinction*". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 386, 531-540.

23. Thatcher, K. E.; Westbrook, G. K.; Sarkar, S. I Minshull, T. A. (2013): *Methane release from warming-induced hydrate dissociation in the West Svalbard continental margin: Timing, rates, and geological controls*'. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1-17.
24. Ward, P. D.; Botha, J.; Buick, R.; De Kock, M. O.; Erwin, D. H.; Garrison, G. H.; Kirschvink, J. L.; Smith, R. (2005): Abrupt and Gradual Extinction Among Late Permian Land Vertebrates in the Karoo Basin, South Africa. *Science*, 307 (5710), 709–714.
25. doi:10.1126/science.1107068. PMID 15661973.
26. Wei, Y.; Pu, Z.; Zong, Q; Wan, W.; Ren, Z.; Fraenz, M.; Dubinin, E.; Tian, F.; Shi, Q.; Fu, S & Hong, M. (2014): Oxygen escape from the Earth during geomagnetic reversals: Implications to mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 394, 94-98.

#### **4.2. Mrežne poveznice (1. IV. 2017.)**

1. <http://www.nationalgeographic.com/science/prehistoric-world/mass-extinction/>
2. <https://www.boundless.com/biology/textbooks/boundless-biology-textbook/conservation-biology-and-biodiversity-47/the-biodiversity-crisis-259/biodiversity-change-through-geological-time-964-12223/>
3. <https://earth-pages.co.uk/tag/flood-basalts/>
4. <https://www.flickr.com/photos/murman/6989458580>
5. <http://www.npshistory.com/publications/geology/bul/1309/sec3.htm>
6. <https://www.studyblue.com/Hello?site=flashcard/view/15658877>
7. <http://soundofheart.org/galacticfreepress/content/new-island-emerged-coast-schleswig-holstein-germany>
8. <http://www.universetoday.com/19616/earths-10-most-impressive-impact-craters/>
9. <http://www.cv.nrao.edu>
10. <http://scienceillustrated.com.au/blog/science/tiny-spherules-reveal-asteroid-impact-history/>
11. <https://thenaturalhistorian.com/2013/05/24/ydb-younger-dryas-meteor-explosion-human-history/>
12. <https://robertscribbler.com/2013/08/12/a-deadly-climb-from-glaciation-to-hothouse-why-the-permian-triassic-extinction-is-pertinent-to-human-warming/>
13. <https://globalecogovernment.wordpress.com/2016/01/16/methane-release-accelerates-defrost/>
14. <https://robertscribbler.com/2014/01/21/awakening-the-horrors-of-the-ancient-hothouse-hydrogen-sulfide-in-the-worlds-warming-oceans/>
15. <http://survinat.com/2012/08/in-koblevo-release-of-hydrogen-sulfide-generated/>
16. <http://www.24sata.hr/tech/bljesak-gama-zraka-najjaca-je-eksplozija-od-velikog-praska-310957>

17. <http://earthref.org/ERESE>
18. <http://deeptimemaps.com/global-series-non-profit/>
19. <http://news.mit.edu/2014/an-extinction-in-the-blink-of-an-eye-0210>
20. <http://soundwaves.usgs.gov/2003/05/meetings.html>

# O ASTEROIDIMA KAO UZROČNICIMA MASOVNIH IZUMIRANJA

## (ali i promjena poput panspermije i nastanka vode)

Željko ANDREIĆ, Tomislav MALVIĆ

Meteori, odnosno meteoriti, uvijek su privlačili pozornost ljudi, još od prapovijesnih vremena, pa tijekom prvih civilizacija Staroga svijeta, antike pa do pojave prvih znanstvenika izvan filozofskih disciplina te, naravno, u suvremeno doba. Njihova uloga za razvoj života i površine planeta Zemlje u tim početcima uglavnom je promatrana kao razarajuća, kroz udare tijela raznih veličina koji su izazivali ogromne lokalne, ali i opće promjene na površini Zemlje, njezinim oceanima, atmosferi, a oni najjači mijenjali i sastav i dubine dijela kore (npr. Malvić, 2013). Uobičajeno je da se tijela promjerom manja od nekoliko metara nazivaju meteorima, a ona veća asteroidima, iako se zapravo radi o istoj vrsti malih tijela sunčevog sustava. Padovi meteorita na Zemlju su dosta česti i poznati su kroz povijest, ali imaju samo malo ili nikavu lokalno djeovanje. tek mali astridi razvijaju kod pada energije dovoljne veličine da izazovu lokane ili čak i globalne posljedice.

## 1. ULOGA VELIKIH PLANETOIDNIH SUDARA I SUNČEVA VJETRA U OBЛИKOVANJU RANIХ PLANETARNIH SUSTAVA

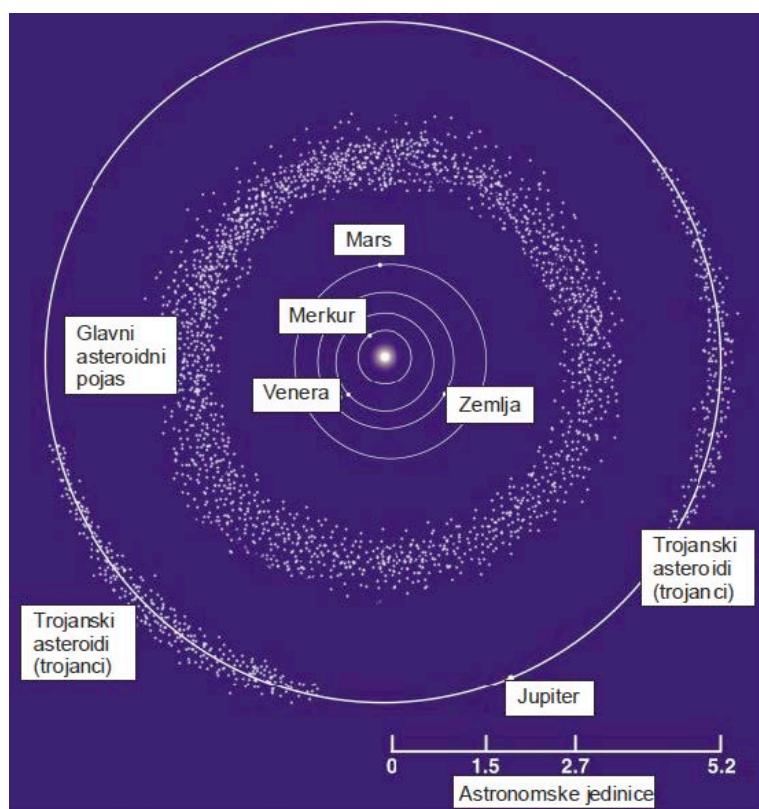
Oblikovanje planeta slijedilo je stvaranje središnje zvijezde i usko je povezano s ranim sudarima između planetarnih tijela (planetizimala). Uz stalna taljenja prvostrukih korenih, te gravitacijske diferencijacije minerala i elemenata, jedan takav sudar velikog ranga, tj. dvaju protoplaneta – Zemlje i Theie (**slika 1**), razlog je nastanka Zemljina Mjeseca.

Planetni mjeseci su međutim toliko masivni i veliki da je njihovo konačno oblikovanje posljedica vlastite kondenzacije, hlađenja i diferencije. Također, tijekom oblikovanja ranih planeta i planetoida djelovao je proces pomicanja staza planeta prema ili od Sunca, što je proces dokazan u svim zvjezdanim sustavima. Recimo znano je kako kod oblikovanja protoplaneta značajna količina prašine i stijena stvara protoprsten koji, dok se ne razori, vremenom smanjuje kutnu količinu gibanja i orbitalnu brzinu, a time i veličinu putanje planeta. Nešto manja tijela, reda veličine asteroida, meteora i prašine, mogla su također djelovanjem zvjezdanog vjetra biti prenesena u daljnje dijelove sustava. Međutim oba ta mehanizma aktivna su u ranom razdoblju stvaranja sustava, recimo ELMEGREEN (1979) navodi razdoblje od 3 do 10 milijuna godina

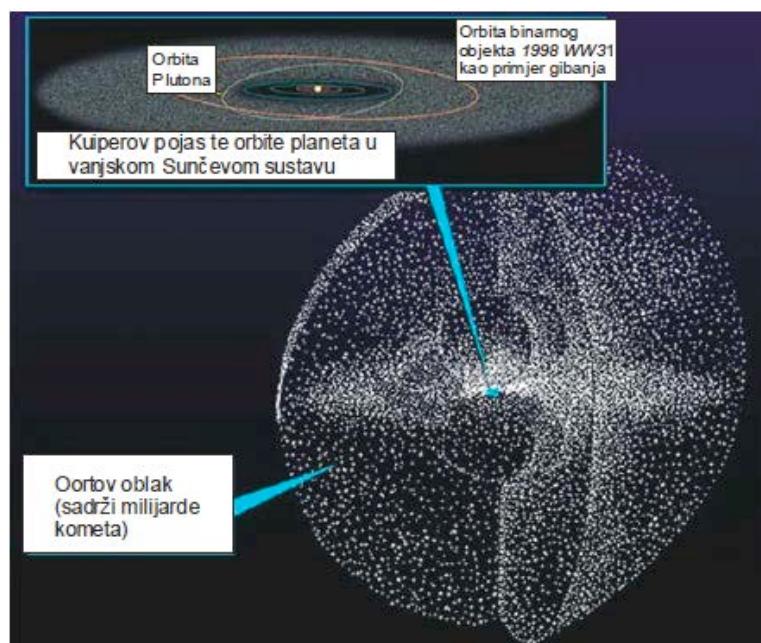
nakon kojega plin i prašina su ili kondenzirani unutar većih tijela ili odbačeni u međuzvjezdani prostor pa njihov utjecaj na gibanje tijela u sustavu postaje zanemarivo mali. Ostaci takvih procesa u današnjem Sunčevom sustavu jesu asteroidni pojasi te Kuiperov pojasi i Oortov oblak (**slika 2 i 3**).



*Slika 1: Kolizija Zemlje i Theie (s poveznice 1; preneseno iz MALVIĆ, 2013)*



*Slika 2: Položaj asteroidnoga pojasa između Marsa i Jupitera (s poveznice 2; preneseno iz MALVIĆ, 2013)*



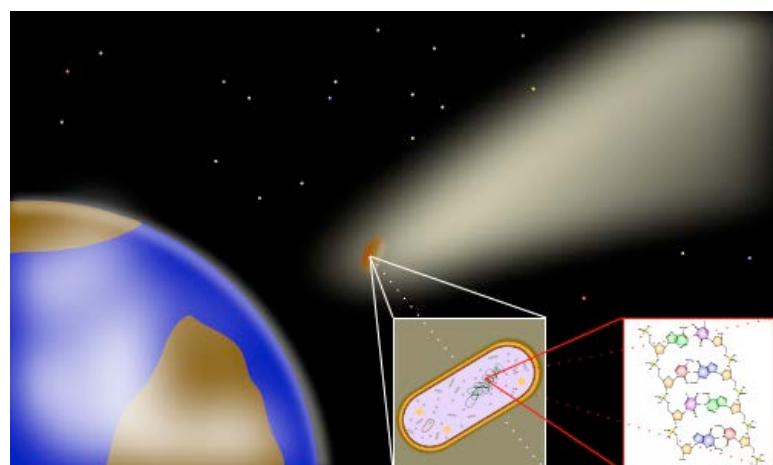
**Slika 3:** Prepostavljena struktura transneptunskog područja (s [poveznice 2](#); preneseno iz MALVIĆ, 2013)

## 2. HIPOTEZA PANSPERMIJE I ULOGA METEORITA

Panspremija (iz grčkog πᾶν (pan) i σπέρμα (sjeme)) je hipoteza kako se život kroz Svemir prenosi meteoridima, asteroidima i kometima (WICKRAMASINGHE, 2011), planetoidima (RamPELOTTO, 2010) ili svemirskim letjelicama koje prenose mikroorganizme koji su tamo dospjeli slučanom kontaminacijom (MADHUSOODANAN, 2014), poput jedne od teorija kojima je objašnjeno otkrivanje mikroorganizama na opremi s Mjeseca vraćenoj na Zemlju letjelicom Apollo 12.

U svim tim slučajevima podrazumijevano je kako su mikroorganizmi bili sposobni preživjeti uvjete otvorenoga Svemira u dugotrajnoj hibernaciji (kao ekstremofili) kojim su putovali u debritu i krhotinama stijena koje su izbačene s matičnoga planeta nakon dovoljno snažnoga udara (**slika 4**). No, treba imati na umu da ta hipoteza ne objašnjava podrijetlo života, već samo njegovo širenje svemirskim prostorom.

Inačica hipoteze, nazvana pesudopanspremija (ili «meka panspermija» ili «molekularna panspermija») stvaranje života ostavlja na površini planeta (npr. KLYCE, 2001) dok se organske molekule iz kojih nastaje prenose mehanizmom pansemije i uklapaju u planetozimale ili oblikovane planete. Same organske molekule u Svemiru nisu rijetkost posebice unutar oblaka plina i prašine gdje se oblikuju kemijskim reakcijama (DALGARNO, 2006) dok ih sama prašina čuva od ionizirajućeg utjecaja UV zračenja matične zvijezde (BROWN et al., 1995). Također, smatra se kako je taj kemizam započeo svoju aktivnost vrlo rano nakon velikoga praska, kada je Svemir bio star samo nekoliko desetaka milijuna godina.



*Slika 4: Umjetnički prikaz kometa u sedištu koji prenosi bakterijski život unutar sebe dok putuje Svemirom prema Zemlji (s poveznice 3)*

### **3. PODRIJETLO VODE NA ZEMLJI I ULOGA METEORITA**

Geološki najstarija razdoblja (eoni) u razvoju Zemlje obilježena su njezinim oblikovanjem kao planeta te razvojem njezinih sastavnih dijelova poput jezgre, astenosfere i litosfere. Nikakvih oblika života na Zemljici tada nije bilo, posebno tijekom prvi milijardu godina. Najstarije razdoblje trajalo je od prije 4,5 do oko 4,0 milijardi godina. Tada je oblikovana temeljna građa Zemlje s jezgrom, plaštom i korom. Nakon sudara s protoplanetom (Theia) dio prvobitnog plašta i kore izbačen je ponovno u Svemir te je oblikovao Mjesec (PORTEGIES ZWART, 2009; KAIB & QUINN, 2008; GREAVES, 2005). Slijedilo je razdoblje arhaika koje je trajalo od prije oko 4,0 do oko 2,5 milijardi godina, zatim proterozoik (oko 2,5-0,54 milijarde godina) te fanerozoik (započeo prije 542 milijuna godina).

Inkluzije najstarijih minerala cirkona u stijenama (4,4 milijardi godina) otvaraju mogućnost postojanja tekuće vode i u tome razdoblju, iako je postojanje oceana pitanje rasprava zbog velikih površinskih temperatura te vrlo maloga udjela vodene pare u tada postojećim plinovima. Najstarije stijene pokazuju rezultate visokog stupnja metamorfizma, no također su zadržale i relikte prvotnih sedimenata sa zaobljenim klastima iz čega je pretpostavljeno kako su bili podložni transportu i eroziji, što indirektno ukazuje na vodene okoliše. Postanak oceana usko je povezan s postojanjem atmosfere. Za Zemlju se smatra da je tijekom geološke povijesti imala tri vrste atmosfera:

- 1) Najstarija je nastala iz primarne maglice i sastojala se od najlakših elemenata u njoj, vodika i helija. Ona je bila otpuhana toplinskim zračenjem Zemlje te Sunčevim vjetrom.
- 2) Tijekom razdoblja „bombardiranja“ i kasnijeg vulkanizma oslobođeno je mnogo plinova, uglavnom iz skupine „stakleničkih“. Oni su počeli prije oko 3,8 milijardi godina temperaturu površine Zemlje zadržavati iznad točke ledišta, što je važno jer je Sunce u to doba emitiralo oko 30 % manje zračenja. Tada već postoji sigurno tekuća voda i oceani te dolazi do pojave jednostaničnog života, a plinovi poput vodene pare i ugljičnog dioksida se kondenziraju, stvarajući oblake i kišu.
- 3) Kisikom bogata atmosfera razvila se prije oko 2,8 milijardi godina, kao rezultat fotosinteze bakterija koje su se, kao anaerobne, pojavile nekoliko stotina milijuna godina ranije i stromatolita koji se javljaju u mezoarhaiku. Vremenom je kisik postao drugi najobilniji atmosferski plin.

Smatra se kako su oceani počeli postojati tijekom razdoblja „stakleničke“ atmosfere, prvenstveno jer su enormne količine vodenoga leda donešene smrznutim tijelima iz asteroidnoga i transneptunskoga pojasa (EDGAR & ARTYMOWICZ, 2004; RAYMOND et al., 2007).

Mnoga takva tijela su prilikom udara bila najvećim dijelom vaporizirana, pridonoseći povećanju količine plinova i tlaka prvotne atmosfere.

Teorija kako je barem dio vode na Zemlju donešen na takav način (kometima, transneptunskim tijelima i meteoritima) potvrđena je mjerjenjima udjela izotopa deuterija, koji je približno isti u ugljikom bogatim hondritima asteoridnog pojasa i oceanima (međutim razlikuje se u transneptunskim objektima, ALTWEGG et al., 2015). Upravo izotopna analiza odnosa deuterija i vodika pokazala je kako ne može sva Zemaljska voda biti iz kometa i sličnih tijela, a ona koja je donešena na Zemlju potječe iz hodritnih tijela. Iz to odnos D/H u oceanima je povećan tijekom geološke povijesti, što ukazuje da je dio vode na planetu već postojao od samih početaka oblikovanja Zemlje. U stvari omjer D/H izmјeren na Mjesecu upućuje kako je izvor molekula vode na današnjoj Zemlji i Mjesecu dobrim dijelom bio isti, tj. potječe iz materijala proto Zemlje, prije sudara s Theiom.

Tako su hidratni minerali stvoreni u prvotnoj Zemljinoj kori kasnije dijelom oslobođili dio molekula vode u oceane i atmosferu. Također, prvotni vulkanizam izbacio je u drugotnu atmosferu Zemlje značajne količine (i) vodene pare.

#### **4. UTJECAJ VELIKIH UDARA NA ZEMLJU I ŽIVOT**

Najvećim udarnim događajem u ranom razdoblju oblikovanja Zemlje smatra se udarac protoplaneta veličine Marsa (nazvan Theia) koji je uzrokovao stvaranje Mjeseca od sijela kore proto Zemlje. Nakon toga, prije nekih 4 milijarde godine, tj. 500-600 milijuna godina nakon stvaranja, započelo je razdoblje intenzivnog bombardiranja svih planeta asteroidnim tijelima i meteorima. To razdbolje trajalo nekoliko stotina milijuna godina i nazvano je razdobljem «kasnoga bombardiranja» (rano je bilo vrijeme spajanja planetoizimala u protoplanete).

Tijekom kasnog bombardiranja terestrički planeti su već imali dovoljnu masu da privuku većinu objekata izbačenih iz asteroidnog pojasa i drugih nestabilnih orbita. Uglavnom su sve nestabilne orbite bile poremećene djelovanjem plinovitih ili ledenih divova, poglavito Jupitera, koji su odgovorni za ovo razdoblje bombardiranja, ali i «čišćenje» ranoga Sunčevoga sustava.

Većina današnjih velikih kratera koje možemo opaziti na drugim nebesnik tijelima, poglavito planetima i velikim mjesecima koji su slabo ili više nisu tektonski aktivni, nastali su u tom razdoblju. Također, lako se može korelirati smirivanje impaktne aktivnosti «kasnoga razdoblja» i prvih zabilježenih mikrofosila. Oba ta događaja datiraju se na oko 3,8 milijardi godina. Razbolje „bombardiranja“ nastavlja se i danas no u puno manjem opsegu, poglavito što se tiče velikih tijela s osima od nekoliko stotina metara ili čak kilometara. Razlog tomu je što je veći dio materijala iz asteroidnog pojasa ranije izbačen, a tijela iz Kuiperovog pojasa i Oortovog oblaka

zbog svoje udaljenosti od Zemlje ipak vrlo rijetko stižu toliko blizu Snca i u orbitu koja bi sijekla Zemljinu, da su puno rjeđi, ali se u velikim vremenskim razmacima i dalje događaju.

#### **4.1. Neke astronomске pojave povezane s velikim udarnim događajima**

Kod sudara asteroida i većeg nebeskog tijela posljedice sudara u najvećoj mjeri određene su kinetičkom energijom asteroida. Govorimo li o Zemlji, brzine kod sudara su u opsegu od oko 20 do oko 70 km/s, što su izuzetno velike brzine. Kod tih brzina meteori uglavnom sagore tijekom puta kroz Zemljinu atmosferu zbog velikog zagrijavanja i ablacije izazvane otporom okolne atmosfere, ali tijela veća od nekoliko metara već mogu doprijeti do tla, pogotovo ako su stjenovite ili metalne grade (tj. dovoljno velike mehaničke čvrstoće da izdrže put kroz atmosferu). Tijela veća od nekoliko stotina metara u pravilu dopiru do tla jer je otpor zraka nedovoljan da ih značajno uspori.

Mali asteroidi (promjera nekoliko desetaka metara) već imaju dovoljnu energiju da na tlu izazovu značane lokalne posljedice, čak i ako ne dospiju do njega, nego zbog dinamičkih opterećenja eksplodiraju u donjim slojevima atmosfere. Dobar primjer takvog događaja je eksplozija malog astroida iznad ruskog grada Chelyabinsk koja se dogodila 15. veljače 2013. Procjenjuje se da je promjer astroida bio oko 17 metara a energija razvijena u eksploziji oko 500 KT TNT. U cijelom gradu počinjena je znatna materijalna šteta a mnogo ljudi bilo je ozlijedeno krhotinama razbijenih prozora i slika (BROWN et al., 2013). Pronađeni su i ostaci asteroida koji sudospjeli na tlo po kojima se radilo o stjenovitom asteroidu (hondritu).

Po današnjim saznanjima poznatu Tungusku eksploziju početkom 20.-og stoljeća izazvao je asteroid slične građe, ali nešto većeg promjera, 60-70 m. Procjene su da bi ta eksplozija, da se dogodila iznad naseljenog dijela svijeta, odnijela i do nekoliko milijuna života. Srećom, ona se dogodila iznad uglavnom nenaseljenog dijela Sibira, pa je uglavnom uništeno nekoliko stotina kvadratnih kilometara sibirske šume, a posljedice se na mjestu eksplozije mogu vidjeti i danas. Istovremeno, prašina nastala u eksploziji gotovo mjesec dana je bila primjetna, izazivajući neobične zalaske i izlaske Sunca i neobično svijetle noći (**slika 5, poveznica 4**). Ukupna energija eksplozije je u ovom slučaju procijenjena na 15 MT TNT-a.

Kad govorimo o velikim udarima, govorimo o udarima tijela čiji promjer se mjeri u stotinama metara pa do nekoliko kilometara. Posljedice takvih udara u najmanju ruku su regionalne, a vrlo često i globalne. Ta su tijela toliko velika, da ih zemljina atmosfera više ne može značajno usporiti, pa u tlo (ili u more) udaraju svojom punom brzinom.

Već kod ulaska u Zemljinu atmosferu ovako veliko tijelo proizvodi kompresijski i udarni val koji uz površinu tijela doseže temperaturu od 5000-6000 K, dakle usporedivu s površinskom

temperaturom Sunca. Zbog velike blizine ukupno toplinsko zračenje na tlu je i stotinama puta veće od normalne insolacije pa svi objekti koji su u doglednici ovakve vatrene kugle trenutno počnu gorjeti. Izgaranje proizvodi ogromne količine dima koje ulaze u atmosferu i kasnije pridonose ozbiljnim posljedicama sudara. Osim dima, ove temperature dovoljne su da u tamosferi dođe do stvaranja dušikovih oksida što kasnije rezultira kiselim kišama na velikom području.

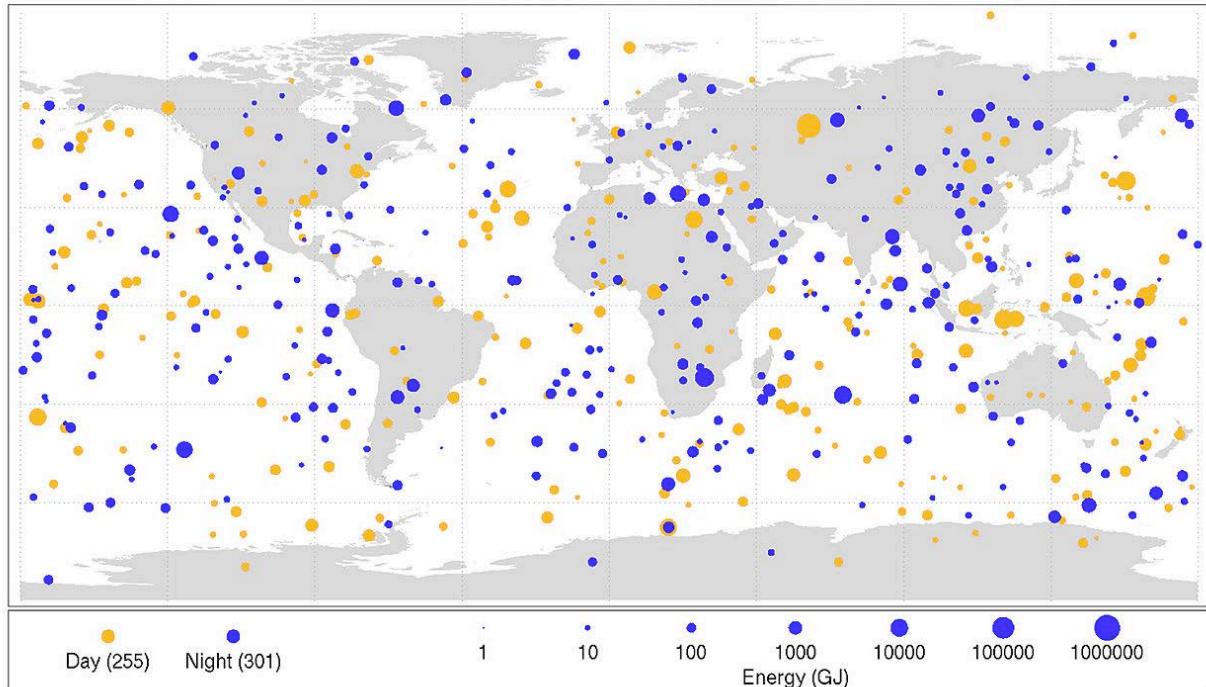
U trenutku udara u tlo nehanička opterećenja i oslobođena energija toliko su veliki da asteroid trenutno isparava i izaziva ogromnu eksploziju koja iskapa tzv. udarni krater i razbacuje materijal zemljine kore uokolo, s brzinama koje su dovoljne da dio materijala dospije i u svemirski prostor. Većina materijala ipak pada na Zemlju u više-manje pravilnom krugu oko samog kratera izazivajući velika razaranja. Istovremeno se od mjesta udara atmosferom širi udarni val čije posljedice su isto tako katastrofalne jer ima dovoljnu energiju da doslovno otrgne s površine Zemlje sve na što nađe. Udar izaziva i izuzetno snažne potresne valove, koji kod većih udara mogu biti tako jaki da na suprotnoj strani zemljine kugle izazovu potpuno razaranje površine. Ugrubo je promjer samog udarnog kratera desetak puta veći od asteroida koji ga je proizveo, a područje pada izbačenog materijala i djelovanja udarnog vala mjeri se u stotinama km za manje i u globalnim razmjerima za veće asteroide. U usporedbi sa ovakvim udarom eksplozija atomske bombe izgleda kao dječja petarda.

U slučaju udara u ocean, jedina razlika je u tome da se uz sve gore opisane pojave pojavljuje i tsunami čija visina može doseći i do kilometar u visinu, a koji dolaskom na obale kontinenata izaziva globalna razaranja po cijelom globusu. Sam udarni krater nastaje u kori dna oceana, na vrlo sličan način kao i kod udara u tlo.

Najgore nažalost dolazi nakon što ove prve posljedice udara prođu. Količina prašine izbačene u stratosferu kod jačih je udara dovoljna da zamrači nebo i izazove tzv. nuklearnu zimu na tlu. Bistrenje atmosfere odvija se vrlo polagano i može trajati od nekoliko mjeseci do nekoliko godina, a u tom periodu izumire prvo većina životinjskih, a onda i biljnih vrsta zbog nedostatka hrane i hladnoće, ali i zbog kiselih kiša koje zatruju vodu. Zbog svega ovoga udar asteroida smatra se jednom najvećih danas poznatih prijetnji ljudskoj civilizaciji. Da bi posljedice udara bile globalne, smatra se da je dovoljno da promjer asteroida bude oko 1 km ili više. Napomenimo još da se asteroidi koji dolaze u blizinu Zemlje (pa su tako potencijalno opasni za nas) nazivaju i *Near Earth Asteroids* (skr. NEA). Uz njih potencijalno su opasni i kometi a obje grupe takvih objekata zajednički se nazivaju *Near Earth Objects* (skr. NEO). Nekoliko institucija u svijetu danas se bavi sustavnim praćenjem i pokušajem otkrivanja svih NEO-a, a radi se i na tehnikama njihovog skretanja s putanje sudara, iako smo na tom području tek na početku. Smatra se da trenutačno poznajemo oko polovice svih NEO-a.

## Bolide events 1994-2013

(Small asteroids that disintegrated in the Earth's atmosphere)



**Slika 5:** Mjesta udara malih asteroida na Zemlju u zadnjih dvadesetak godina. Vjerojatnost udara podjednaka je za bilo koju točku zemljine površine. Preuzeto s [poveznice 4](#).

### 4.2. Neke geološke pojave povezane s velikim udarnim događajima

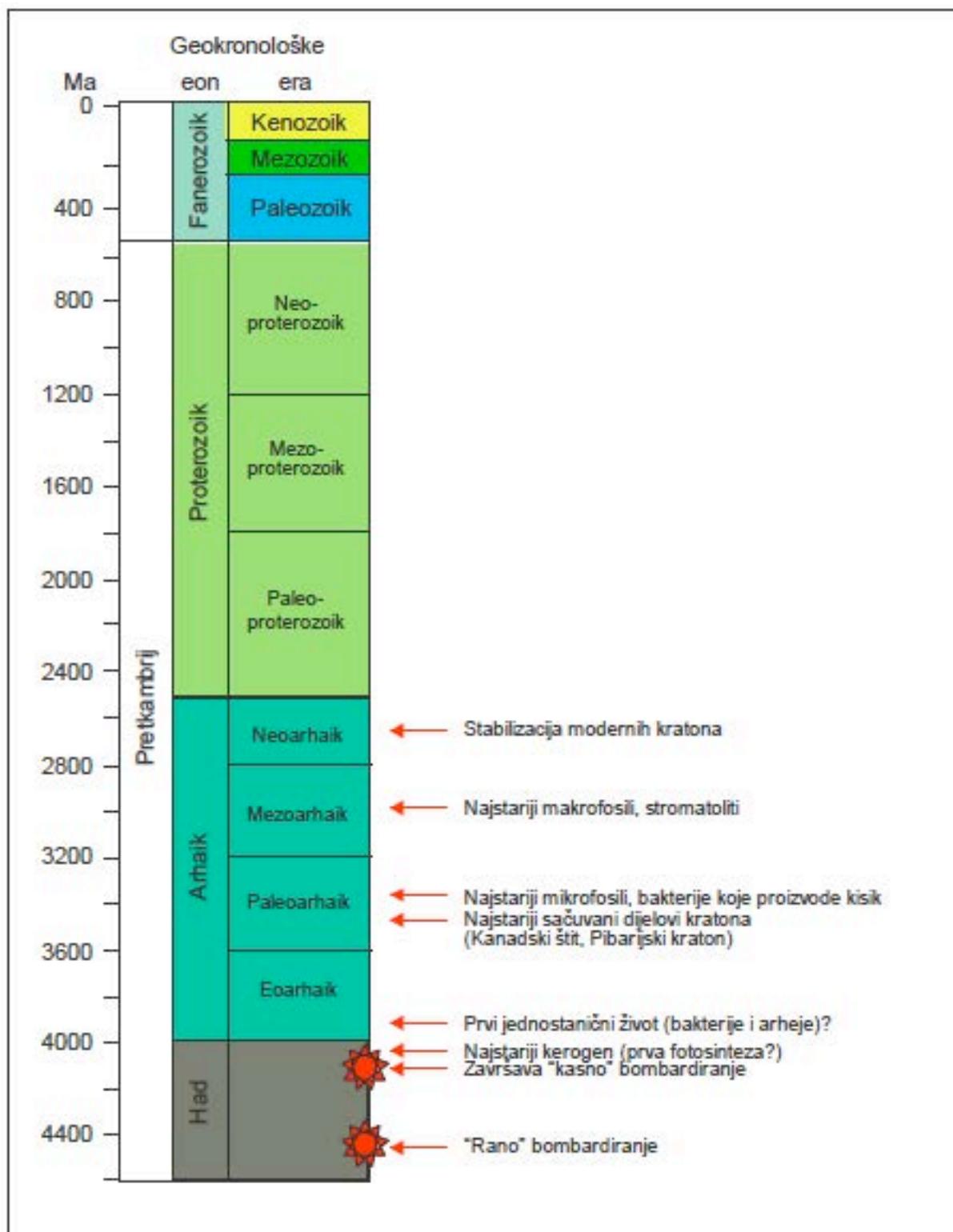
Svaki udarni događaj na Zemlji uzrokuje događaj koji je na nakoj skali mjerljiv. Oni najveći i najsnažniji ostavili su zapise poput kratera koji su, usprkos eroziji i tektonici ploča, i danas vidljivi. Na nebeskim tijelima gdje erozija gotovo i nema, poput Mjeseca, ostaci udara ostali su gotovo nepromijenjeni tijekom milijardi godina i upravo nam oni pružaju najviše podataka za uvid u razdoblja «ranoga» i «kasnoga» bombardiranja u početku razvoja Sunčeva sustava.

U «kasnjem» razdolju, počevši oko 500 milijuna godina nakon razvoja sunčeva sustava najveći udari imali su značajnog utjecaja na fizički oblik površine, ali i atmosferu (sekundarnu i tercijarnu) te biosferu (kada se razvila). Upravo zbog takvih utjecaja, koji su bili česti u prvih milijardu godina, jedna od teorija smatra kako se jednostanični život razvio ispod površine Zemlje, gdje je mogao relativno biti zaštićen od velikih promjena kemizma ranih oceana i atmosfere (**slika 6**). Kako je život evoluirao i razvijao sve složenije višestanične oblike, koji su se također sve više prilagođavali na određene okoliše, te bili osjetljivi na promjene u ekosustavima, veliki planetarni udari bili su uzrokom niza značajnih promjena u broju i obliku vrsta, odnosno masovnih izumiranja tijekom Zemljine povijesti. Jedan od najistraženijih i

najbolje dokumentiranih takvih dogaja bio je udar asteroida, čiji krater Chicxulub je i danas vidljiv, na granici krede i paleogena (npr. BECKER, 2002), kada su izumrli gotovo svi dinosuari, a počela je dominacija sisavaca. U XX. stoljeću najpoznatiji asteroidni udar onaj koji se dogodio blizu rijeke Tunguske u Sibiru, Rusija, 1908. godine (npr. TRAYNER, 1997). Veliki udari meteorita, kometa ili asteroida događaju se i danas dijelom Sunčevoga sustava. Jedna od najbolje dokumentiranih je udar kometa Shoemaker-Levy 9 u površinu Jupitera u srpnju 1994., što je ujedno bilo i prvo izravno opažanje takvoga događaja na drugom planetu.

Međutim, udari asteroida u Zemlju često se mogu povezati s približno istovremenim velikim vulkanskim događajima te izljevima lave. Možda su dile udara bile dijelom i fizički uzrok povećanju naprezanja i relaksiranja unutar ranije predodređenih velikih rasjednih zona unutar Zemljine kore, a time i oslobođanja magme iz velikih «ognjišta» na granici kore i donjega dijela litosfere. U svakom slučaju dva takva približno istovremena događanja (enormni magmatizam i udar asteroida) predstavljali su mehanizme ogromnih promjena geomorfologije, ali posebice kemizma atmosfere i oceana.

Zadnji takav geološki dokumentirani primjer su dekanski trapovi (riječ «trap» u švedskom jeziku opisuje jednu vrstu lave, a Deccan je indijska pokrajina) koji su počeli nastajati prije 66,26 milijuna godina na kraju krede (**poveznica 5**), a mogle su trajati do 30000 godina (**poveznica 6**). Izvorno su izljevi lave prekrili površinu od približno 1,5 milijuna km<sup>2</sup>, da bi ona danas, nakon erozije i kompresije, iznosila oko 0,5 km<sup>2</sup>. U svakom slučaju takav događaj oslobođio je ogromne količine vulkanskih plinova, posebice sumpornoga dioksida i on je samostalno mogao utjecati na globalno sniženje prosječne temperature za 2 °C, uz promjene kemizma. Ako se približno istovremeno dogodio i veliki asteroidni udar koji je mogao enormno povećati broj čestica u atmoferi, smanjiti godinama količinu Sunčeva svjetla koje dopire do površine, jasno je kako je utjecaj na život, biljni i životinjski, a posebice kopneni, morao biti strahovito snažan. U ovome primjeru, gotovo u potpunosti su nestali dinosaurusi.



*Slika 6: Geološki eoni i ere sa značajnim događajima tijekom hada i arhaika (iz MALVIĆ, 2013)*

## 5. ZAKLJUČNO

Veliki udari (impakti) u Zemlju tijekom njezine prošlosti imali su značajan utjecaj na njezin razvoj, prvenstveno atmosfere i hidrosfere, a posljedično i biosfere. To su uglavnom bili enormni energetski događaji koji su mijenali površinu na mjestima udara, ali bili i uzrokom pojačanoga vulkanizma te promjena kemizma atmosfere. Međutim, koliko su za pojedinačne oblike života oni bili katastrofalni i gotovo u potpunosti ih zatrli, toliko su otvarali niše za razvoj drugih porodica i vrsta koje su prije tih događaja bila znatno manje brojem vrsta i veličinom u odnosu na dominantne oblike. Obično su se takvi utjecaji prvo odražavali na kemizam atmosfere i oceana, te propusnost atmosfere na Sunčevu zračenje, vidljivo i toplinsko. To je znatno utjecalo na biljni svijet. Zavisni životinjski oblici trpjeli su posljedice tih promjena u biljnim vrstama i dostupnosti takvoih izvora hrane.

Međutim hipoteze o panspermiji, a posebice teorije o donosu dijela vode na prvotnu Zemlju meteoritima i asteroidima predstavljaju događaje neophodne za početak života. To se posebice odnosi na povećanje vode i vodene pare na površini i u atmosferi prvotne Zemlje kao osnovnoga spoja za nastanak i održavanje svih višestaničnih oblika života.

## 6. LITERATURA

### 6.1. Objavljeni radovi

1. Altweig, K., Balsiger, H., Bar-Nun, A., Berthelier, J. J., Bieler, A., Bochsler, P., Briois, C., Calmonte, U., Combi, M. (2015): 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio. *Science*. 347 (6220): 1261952. doi:10.1126/science.1261952. ISSN 0036-8075. PMID 25501976
2. Becker, L. (2002): Repeated Blows. *Scientific American*, 286, 76–83. doi:10.1038/scientificamerican0302-76.
3. Brown, L. M., Pais, A., Pippard, A. B. (1995).: The physics of the interstellar medium. *Twentieth Century Physics* (2nd ed.). CRC Press. p. 1765.
4. Brown, P. G., J. D. Assink, L. Astiz, R. Blaauw, M. B. Boslough, J. Borovička, N. Brachet, D. Brown, M. Campbell-Brown, L. Ceranna, W. Cooke, C. de Groot-Hedlin, D. P. Drob, W. Edwards, L. G. Evers, M. Garces, J. Gill, M. Hedlin, A. Kingery, G. Laske, A. Le Pichon, P. Mialle, D. E. Moser, A. Saffer, E. Silber, P. Smets, R. E. Spalding, P. Spurný, E. Tagliaferri, D. Uren, R. J. Weryk, R. Whitaker & Z. Krzeminski

- (2013): A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors. *Nature*, 503, 7475, 238-241. DOI: 10.1038/nature12741
5. Dalgarno, A. (2006): The galactic cosmic ray ionization rate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 103, 33, 12269–73.
6. Edgar, R. & Artynowicz, P. (2004): Pumping of a Planetesimal Disc by a Rapidly Migrating Planet. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 354, 3, 769–772. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2004.08238.x.
- Elmegreen, B. G. (1979): On the disruption of a protoplanetary disc nebula by a T Tauri like solar wind. *Astronomy & Astrophysics*, 80, 77.
7. Elmegreen, B. G. (1979): On the disruption of a protoplanetary disc nebula by a T Tauri like solar wind. *Astronomy & Astrophysics*, 80, 77-78.
8. Greaves, J. S. (2005): Disks Around Stars and the Growth of Planetary Systems. *Science*, 307 (5706), 68–71. DOI: 10.1126/science.1101979
9. Kaib, N. A. & Quinn, T. (2008): The formation of the Oort cloud in open cluster environments. *Icarus*, 197, 1, 221–238. DOI: 10.1016/j.icarus.2008.03.020.
10. Klyce, B. (2001): Panspermia asks new questions. In Kingsley, Stuart A; Bhathal, Ragbir. The Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI) in the Optical Spectrum III. Proc. SPIE. The Search for Extraterrestrial Intelligence (SETI) in the Optical Spectrum III. 4273. p. 11.
11. Madhusoodanan, Jyoti (2014): Microbial stowaways to Mars identified. *Nature*. doi:10.1038/nature.2014.15249
12. Malvić, T. (2013): Oblikovanje nebeskih tijela i njihove geološke građe s obzirom na veličinu zvjezdanoga sustava / Oblikovanje Zemljine atmosfere i hidrosfere tijekom intenzivnih udara meteorita (postanak oceana). HGLJŠ, knjiga predavanja (ur. Velić J. Velić I., Malvić, T.), 1-14.
13. Portegies Zwart, S. F. (2009): The Lost Siblings of the Sun. *Astrophysical Journal*, 696, L13–L16. DOI 10.1088/0004-637X/696/1/L13.
- Rawal, J. J. (1986). Further Considerations on Contracting Solar Nebula. *Earth, Moon, and Planets*, 34, 1, 93–100. DOI 10.1007/BF00054038.
14. Rampelotto, P. H. (2010): Panspermia: A promising field of research (PDF). *Astrobiology Science Conference*. 1538: 5224.
15. Raymond, S. N., Quinn, T. & Lunine, J. I. (2007): High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets 2: water delivery and planetary habitability. *Astrobiology*, 7, 1, 66–84. DOI: 10.1089/ast.2006.06-0126.

16. Trayner, C. (1997): The Tunguska event. *Journal of the British Astronomical Association*, 107, 3, 117-130.
17. Wickramasinghe, C. (2011): Bacterial morphologies supporting cometary panspermia: a reappraisal. *International Journal of Astrobiology*. 10, 1, 25–30.

## **6.2. Mrežne poveznice**

Poveznica 1: [http://en.wikipedia.org/wiki/Formation\\_and\\_evolution\\_of\\_the\\_Solar\\_System](http://en.wikipedia.org/wiki/Formation_and_evolution_of_the_Solar_System) (8. III. 2017.)

Poveznica 2: <http://www.aerospaceweb.org/question/astronomy/q0247.shtml> (8. III. 2017.)

Poveznica 3: <https://en.wikipedia.org/wiki/Panspermia#/media/File:Panspermie.svg> (8. III. 2017.)

Poveznica 4: <https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid> (10. III. 2017.)

Poveznica 5: <https://newsoffice.mit.edu/2014/volcanic-eruption-dinosaur-extinction-1211> (8. III. 2017.)

Poveznica 6: <https://www.sciencedaily.com/releases/2005/08/050810130729.htm> (8. III. 2017.)

## **IZUMIRANJE NA GRANICI PERMA I TRIJASA NA PRIMJERU IZ HRVATSKE**

Karmen FIO-FIRI, Igor VLAHOVIĆ

### **1. UVOD**

Zemljina povijest duga je oko 4,6 milijardi godina. Razvoj živog svijeta počeo je pojavom najjednostavnijih organizama prije najmanje 3,5 milijardi godina, a nove i još neistražene oblike života nalazimo i danas.

Razvoj života na Zemlji bio je popraćen povremenim vrlo nepovoljnim razdobljima u kojima je dolazilo do nestanka starih i nastanka mnogobrojnih novih životnih oblika. Tako se u geološkoj povijesti Zemlje može razlikovati pet (ili čak šest) velikih izumiranja. Ipak, najveće izumiranje u Zemljinoj prošlosti dogodilo se prije oko 252 milijuna godina na granici perma i trijasa, kada je izumrlo gotovo 96 % vrsta morskih organizama, 60 % familija vodozemaca i gmazova, 30 % vrsta kukaca, 70 % rodova kopnenih kralježnjaka, a i većina kopnenih biljaka (npr. ERWIN, 2006). Prema broju izumrlih familija slijede izumiranja krajem ordovicija, krajem trijasa, krajem devona, te najmanje, ali široj javnosti najpoznatije izumiranje, krajem krede.

### **2. GRANICA PERM-TRIJAS U SVIJETU**

Granica perm-trijas istražuje se diljem svijeta, a s obzirom na veličinu i posljedice te mogućnost ponavljanja sličnog događaja u budućem razvoju Zemlje, predstavlja i jedan od izazova u geoznanostima, ali i znanosti općenito. Lokacije na kojima je istražen ovaj događaj nisu brojne, ali se nalaze diljem svijeta.

U proteklih dvadesetak godina u svijetu su intenzivirana istraživanja granice perm-trijas, pa se osim sedimentološkim i paleontološkim metodama istraživači sve više koriste i raznim geokemijskim metodama, primjerice promjenama u sastavu stabilnih izotopa iz karbonata i organske tvari ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{karb}}$  i  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ), promjenama u vrijednostima organskog dušika ( $\delta^{15}\text{N}_{\text{org}}$ ), promjenama u koncentracijama elemenata osjetljivih na redoks uvjete u okolišu kao i u zastupljenosti i količinama kompleksnih molekularnih fosila, biomarkera.

Posljednjih se godina osobito u Kini značajno povećao broj istraživanja koje se bave ovom problematikom, pa je tako sve veći i broj prepoznatih lokacija na kojima je ta granica precizno utvrđena (**slika 1**).



**Slika 1:** Autori članka na granici perm–trijas u Kini, u okolini grada Lichuan. Granica perm–trijas nalazi se u središnjem dijelu sloja koji s podinske strane 'gura' I.V., a s krovinske K.F.F.

Vidljivi su slojevi vulkanskog pepela iznad i ispod granice.

U Kini se tako nalazi i tipski lokalitet Meishan (ERWIN, 2006), na kojem je granica perm–trijas određena unutar jednog sloja. Granica je u Meishanu određena biostratigrafski, prema prvoj pojavi konodonta *Hindeodus parvus* (KOZUR & PJATAKOVA) (konodonti su neobični listasti, češljasti ili zubasti ostatci primitivnih izumrlih riba) – koji se smatra markerom za granicu, ali i kemostratigrafski, na temelju promjena omjera stabilnih izotopa, elementnih analiza i analiza biomarkera (napr. WANG, 2007; XIE et al., 2007). Istraživanja na lokalitetu Meishan dovela su do zaključka da je izumiranje u morskim i kopnenim ekosustavima bilo praktički istodobno (WANG, 2007). XIE et al. (2007) su na temelju paleontoloških i geokemijskih karakteristika nasлага utvrdili dvije faze izumiranja, dok su WANG & VISSCHER (2007) na temelju analiza biomarkera pretpostavili da je kolaps kopnenih sustava ipak prethodio kolapsu morskih sustava, što je dovelo do značajnog donosa materijala s kopna u morske okoliše. U nama susjednim državama granica perm–trijas utvrđena je i opisana na području Slovenije, Italije i Mađarske.

Granica perm–trijas je u Sloveniji istraživana na nekoliko lokaliteta, pa je tako u sklopu Žažar formacije u zapadnoj Sloveniji granica određena unutar oolitičnog vapnenca na temelju litološke promjene unutar glinovito–laporovitog sloja (DOLENEC et al., 2001; SCHWAB & SPANGENBERG, 2004), a podudarna je s negativnim pomakom u vrijednostima izotopa ugljika

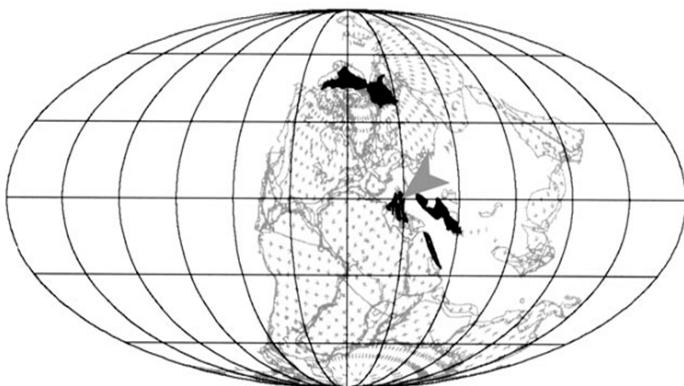
$\delta^{13}\text{C}$ , nestankom gornjopermskih biljnih i životinjskih zajednica, obogaćenjem naslaga na većinu glavnih, sporednih i elemenata rijetkih zemalja, te negativnom cerijevom anomalijom (DOLENEC & LOJEN, 2000; DOLENEC et al., 2001). KOLAR-JURKOVŠEK & JURKOVŠEK (2007) odredili su i populaciju konodonata *Hindeodus–Isarsicella*, dajući uvid u novo, preciznije biostratigrafsko određenje granice perm–trijas u Sloveniji.

U Italiji je granica perm–trijas proučavana na nekoliko različitih lokaliteta u području Južnih Alpa. Tako su napr. BUGGISCH & NOÉ (1986) smatrali da litološka granica (između tzv. Bellerophon formacije i Tesero horizonta) ne predstavlja granicu perm–trijas, već da je izumiranje permskih organizama u Tesero horizontu bilo posljedica klimatskih promjena. Dalnjim biostratigrafskim istraživanjima, i preciznijim određivanjem granice perm–trijas prema pojavi konodonta *Hindeodus parvus*, pretpostavljeno je da Tesero horizont s oolitima još uvijek pripada gornjem permu (TWITCHETT, 1999). HORACEK et al. (2007) su opisali granicu perm–trijas u plitkomorskim naslagama na lokalitetu u Južnim Alpama, na mjestu naglog pada vrijednosti izotopa  $^{13}\text{C}$  te porasta vrijednosti odmah nakon tog događaja. U istočnom dijelu Južnih Alpa, prijelaz iz perma u trijas određen je između početka Tesero horizonta i razine 14 m iznad baze Werfenske formacije, gdje su po prvi put utvrđeni konodonti vrste *Hindeodus parvus* (CASSINIS & PEROTTI, 2007). Na području sjeverne Italije granica perm–trijas također je određena prema pronalasku konodonta *Hindeodus parvus*, a nalazi se unutar Tesero horizonta, 1,3 m iznad litološkog kontakta između Bellerophon i Werfen formacija (SCHOLGER et al., 2000; GORJAN et al., 2007, 2008).

U Mađarskoj je granica perm–trijas poznata na lokalitetima Bálvány (Bükk planina) i Gárdony (SI dio Transdanubijskog područja) (HAAS et al., 1986, 2006, 2007). Na lokalitetu Bálvány negativan pomak u izotopima ugljika  $\delta^{13}\text{C}$  pojavljuje se unutar “graničnog sloja šejla”. Sâm negativan pomak u vrijednostima izotopa ugljika nije povezan s litološkom promjenom, ali koincidira s drugim nestankom biote u tom području. Na lokalitetu Gárdony, kontinuirano negativan pomak u vrijednostima izotopa ugljika  $\delta^{13}\text{C}$ , ali manjeg intenziteta, započinje ispod granice perm–trijas, i koincidira s promjenom facijesa (HAAS et al., 2006).

### 3. GRANICA PERM–TRIJAS U HRVATSKOJ

Karbonatne, siliciklastične i evaporitne naslage, starosti od karbona do srednjeg trijasa, koje nalazimo na području Republike Hrvatske taložene su na prostranoj karbonatnoj platformi koja se u to doba nalazila na sjevernom do sjeveroistočnom dijelu pasivnog kontinentalnog ruba Gondwane, odnosno istočnom dijelu superkontinenta Pangea, u blizini ekvatora (**slika 2**).



*Slika 2: Raspored kontinentalnih masa krajem paleozoika i položaj prostranih karbonatnih platformi (označene crnom bojom) u srednjem permu (guadalupianu). Siva strelica označava približno područje taloženja permskih naslaga koje danas nalazimo na području Hrvatske (dopunjeno prema KIESSLING et al., 2003).*

U Hrvatskoj se permske naslage mogu naći na manjim površinama u 11 različitih područja, a na nekim su prostorima određene i kao zrna u mlađim stijenama, ili pak samo u bušotinama (SREMAC, 2005). Trijaske naslage nalazimo na većim površinama i većem broju područja.

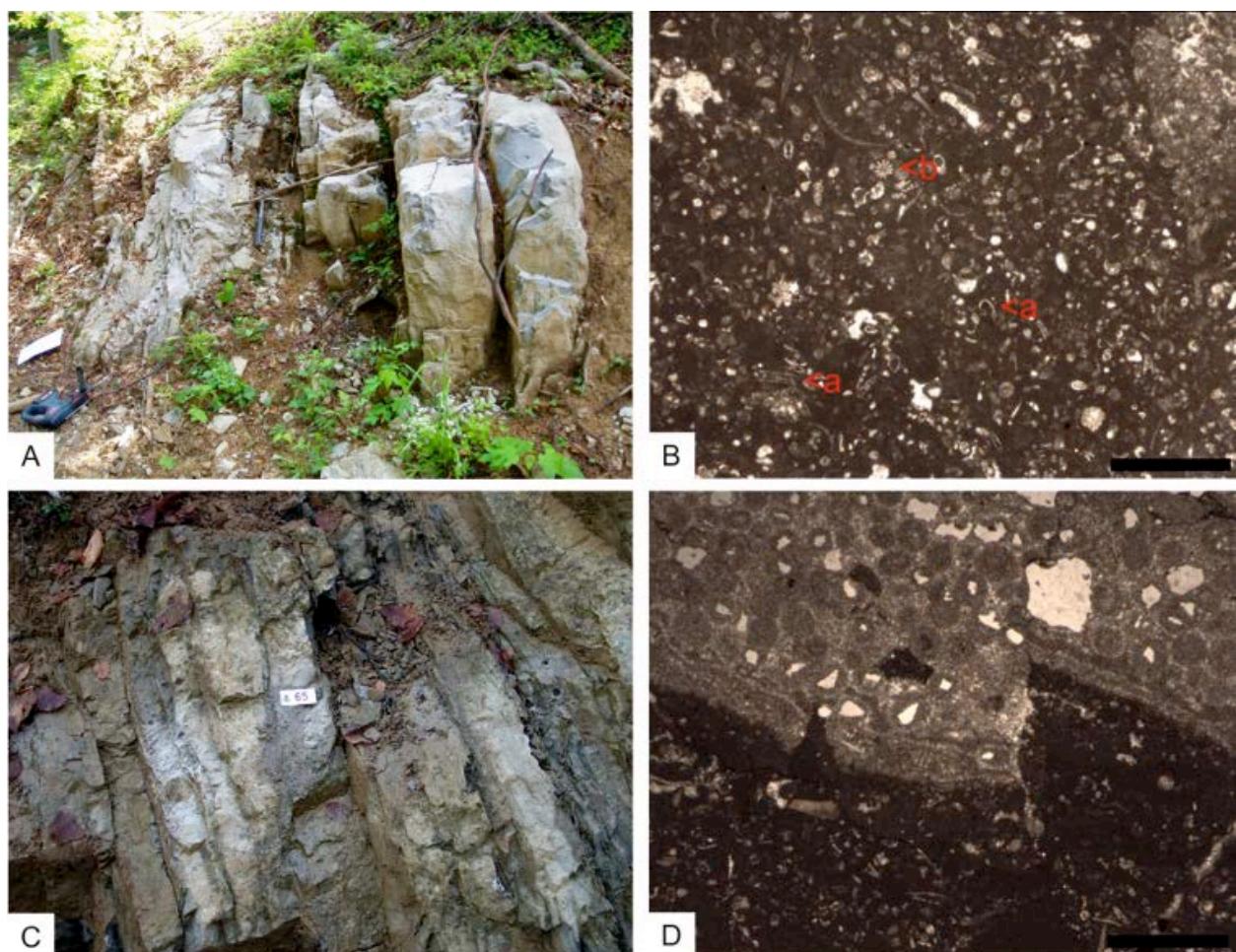
Nažalost, u Hrvatskoj su rijetke lokacije na kojima se mogu pratiti kontinuirani slijedovi naslaga na temelju kojih bi se bolje razumjeli događaji krajem perma i početkom trijasa. Sâm kontakt permskih i trijaskih naslaga često je rasjedan, ili pak prekriven, što otežava istraživanje ovog događaja. Istraživana područja koja uključuju granicu perm–trijas uključuju dijelove Velebita (područje Krških Dinarida) i Samoborskog gorja (područje Unutarnjih Dinarida).

U nedostatku najvažnijih provodnih fosila detaljnu odredbu granice perm–trijas na području Velebita omogućile su suvremene geokemijske metode (FIO, 2010; FIO et al., 2010). Treba svakako spomenuti da su geokemijska istraživanja paleozojskih naslaga na našim prostorima započeli još POLŠAK & PEZDIČ (1978), koji su se bavili proučavanjem paleotemperurnih odnosa u karbonu i permu na području Dinarida i Alpa.

### **3.1. Područje Velebita (Krški Dinaridi)**

Na području Velebita glavninu gornjopermskih naslaga izgrađuju dolomiti, uz mjestimične uloške vapnenaca. Najmlađi dio perma čine dobrosljeviti, svijetlosivi rano- do kasnodijagenetski dolomiti, u literaturi obično nazvani *granični dolomiti* (SALOPEK, 1942; **slika 3A**). Debljine slojeva graničnih dolomita su najčešće između 30 i 50 cm, a sadrže raznolike fosilne ostatke, ponajviše bentičke foraminifere, cjelovite i fragmentirane dijelove skeleta alga, mekušaca i drugih organizama (FIO, 2010; **slika 3B**). Na graničnim dolomitima slijede

takozvani *pjeskoviti dolomiti* (SALOPEK, 1948), koji se sastoje od dolomita s tinčastim pješčenjacima u starijem dijelu, te od dolomita s prevladavajućim karbonatnim zrnima u mlađem dijelu slijeda. Slojevi su najčešće tanjeslojevit, debljine od 5 do 20 cm (slika 3C). U donjem dijelu slijeda pjeskoviti dolomiti ne sadrže ostatke organizama kojima bi se potvrdila njihova stratigrafska pripadnost, ali su nešto više pronađeni fosili koji ukazuju na pripadnost donjem trijasu, a sam početak taloženja obilježen je pojmom terigenog detritusa (FIO et al., 2010; slika 3D). U ranijim je radovima litološka granica stoga smatrana kronostratigrafskom granicom između perma i trijasa (napr. SOKAČ et al., 1976).



**Slika 3:** Slijed naslaga perma i trijasa na lokalitetu Rizvanuša (Velebit): A. Slojevi permskih graničnih dolomita; B. Mikroskopski preparat s vidljivim raznolikim fosilnim ostacima u uzorku graničnog dolomita permske starosti (a – algalne spore, b – presjeci bodlja ježinaca). Duljina oznake na slici iznosi 1 mm; C. Slijed tanjeslojevitih pjeskovitih dolomita; D. litološka granica vidljiva u mikroskopskom preparatu, između tamnjeg graničnog i svijetlijeg, pjeskovitog dolomita (s vidljivim ooidima i fragmentima kvarca); duljina oznake na slici iznosi 1 mm (slike iz FIO, 2010; FIO et al., 2010, 2013).

Kontinuiran slijed naslaga donjeg trijasa na gornjopermskim dolomitima utvrđen je na dva lokaliteta: okolici sela Rizvanuša kod Brušana, te dolini potoka Brezimenjača u području Velike Paklenice. Oba su lokaliteta detaljno istražena sedimentološki, paleontološki, te suvremenim geokemijskim metodama (FIO, 2010; FIO et al., 2010).

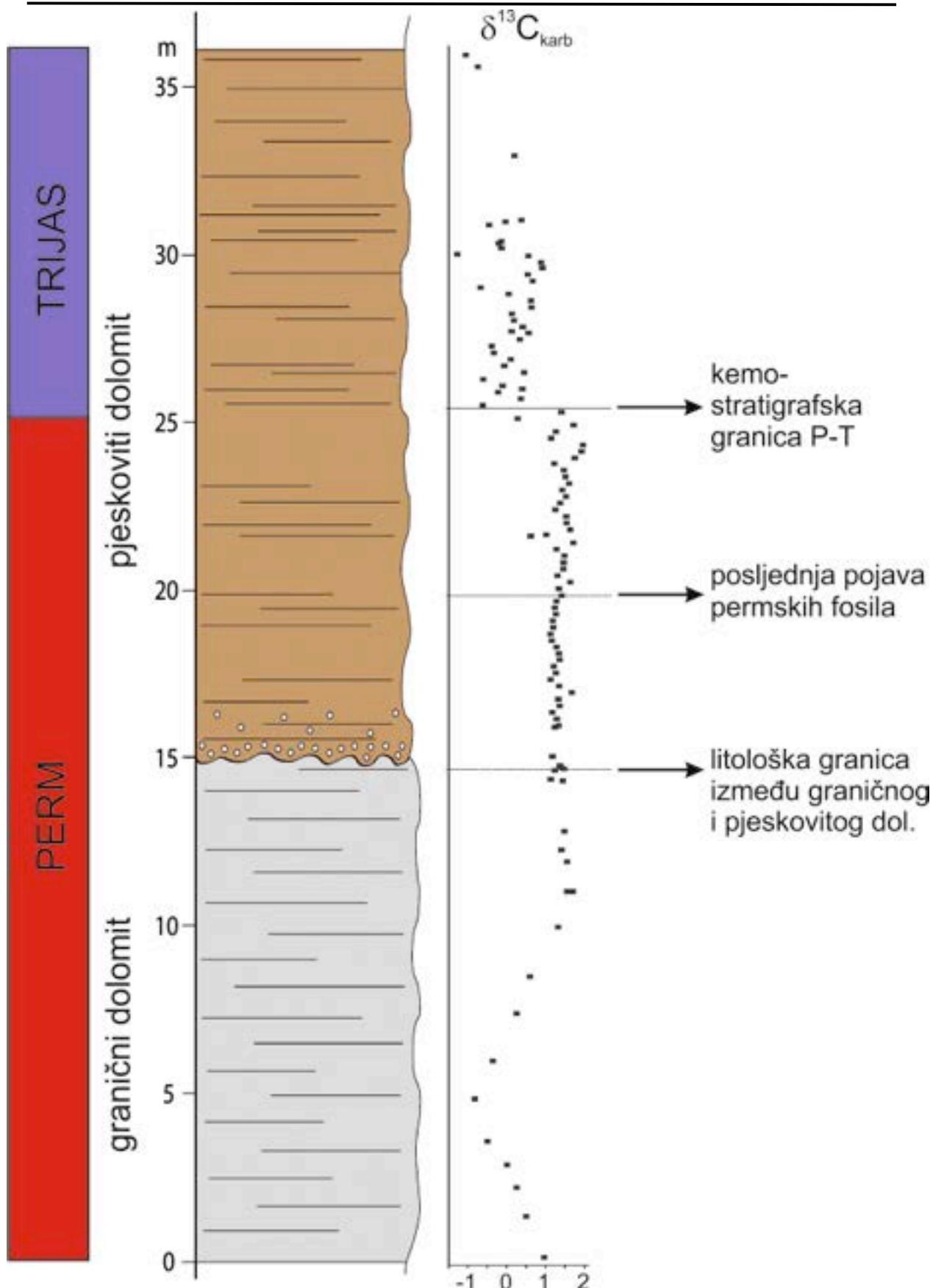
### 3.1.1. Lokalitet Rizvanuša

Na lokalitetu Rizvanuša istraživani slijed čini 37 m debo slijed naslaga od čega donjih 15 m čine granični, a gornjih 22 m pjeskoviti dolomiti. Njihov kontakt čini erozijska granica s naglom pojavom terigenog detritusa (**slika 3D**, **slika 4**). Iako se prethodno smatralo da je ta granica između različitih litoloških jedinica ujedno i granica perm–trijas, detaljna istraživanja najsuvremenijim metodama dovela su do novih rezultata.

Paleontološkim analizama graničnog dolomita određena je zajednica autohtonih permskih mikrofosila koja uključuje male bentičke foraminifere, skeletne elemente i bioklaste različitih alga te bioklaste spužava, puževa, ostrakoda, ramenonožaca i bodljikaša, a taloženje se odvijalo u plitkomorskim područjima otvorene platforme s dobrom cirkulacijom vode. Prvi nestanak permskih fosilnih zajednica poklapa se s litološkom promjenom, odnosno prijelazom iz graničnih u pjeskovite dolomite, gdje se u uzorcima pojavljuju nezaobljena i uglasta zrnca kremena i rekristaliziranih ooida kojih nema u graničnom dolomitu (**slika 3D**). U prvim uzorcima pjeskovitog dolomita nisu nađeni fosilni ostaci koji bi pomogli u biostratigrafskom određivanju starosti stijena, no u uzorku koji se nalazi oko 5 m iznad litološke granice ponovno su nađeni permski mikrofosili, slični onima u graničnom dolomitu, što je ukazalo na to da litološka granica ne predstavlja ujedno i kronostratigrafsku granicu, te da je najniži dio pjeskovitih dolomita na tom lokalitetu permske starosti. Dalnjim istraživanjima na temelju stabilnih izotopa ugljika potvrđeno je da se granica perm–trijas nalazi približno 11 m iznad litološke granice između graničnog i pjeskovitog dolomita, odnosno da se granica nalazi unutar pjeskovitih dolomita 6 m iznad posljednje pojave permskih fosila u njima (**slika 4**). Naime, upravo na tom mjestu određen je nagli pad vrijednosti  $\delta^{13}\text{C}_{\text{karb}}$  od 2‰ te je temeljem ovih rezultata utvrđena kemostratigrafska granica između perma i trijas. Sličan pad u vrijednostima izotopa ugljika utvrđen je na različitim lokalitetima u svijetu, te se koristi za utvrđivanje granice perm–trijas tamo gdje, kao i u našem slučaju, nisu prisutni konodonti, provodni fosili kojima se detaljno može utvrditi prijelaz iz perma u trijas. Na tako određenoj kemostratigrafskoj granici na lokalitetu Rizvanuša vidljive su i promjene u vrijednostima omjera izotopa ugljika iz organske tvari te izotopa dušika, kao i promjene u vrijednostima analiziranih glavnih, sporednih i elemenata u tragovima. Promjene vidljive u rezultatima analiza navedenih elemenata ukazuju na

sve značajne događaje zabilježene u stupu Rizvanuša: litološku granicu između graničnih i pjeskovitih dolomita, zadnju pojavu permских mikrofosila, te kemostratigrafsku granicu definiranu negativnim pomakom u omjeru stabilnih izotopa ugljika iz karbonata (**slika 4**; FIO, 2010; FIO et al., 2010).

Analize bioloških markera na lokalitetu Rizvanuša upućuju na izmjene utjecaja algalnih i bakterijskih organizama duž proučavanog slijeda, uz prevladavajući utjecaj bakterija na litološkoj granici. Biomarkerima je potvrđen i značajan kontinentalni utjecaj nakon litološke granice između graničnog i pjeskovitog dolomita (FIO, 2010).



Slika 4: Shematski prikaz slijeda naslaga na lokalitetu Rizvanuša (Velebit), s prikazom promjena u izotopima ugljika iz karbonata ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{karb}}$ ) i označenim najvažnijim događajima.

### 3.1.2. Lokalitet Brezimenjača

Na drugom istraživanom lokalitetu, dolini potoka Brezimenjača u Velikoj Paklenici, utvrđen je slijed od približno 6 m naslaga, od čega donjih 3,15 m pripada graničnom, a gornjih 2,75 m pjeskovitom dolomitu. Sam slijed naslaga može se korelirati sa slijedom na lokalitetu Rizvanuša, iako sama litološka granica između graničnog i pjeskovitog dolomita nije tako jasno izražena kao na lokalitetu Rizvanuša, nego je vidljiva po prijelazu iz debljih u tanje slojeve, prvoj pojavi sitnih siliciklastičnih zrnaca u sedimentu, ostatcima ooidnih tvorevina, naglom nestanku fosilnih ostataka, te krupnozrnnastoj strukturi dolomita (FIO, 2010; FIO et al., 2010). I na lokalitetu Brezimenjača analize omjera stabilnih izotopa ugljika ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{karb}}$ ) pokazale su negativan pomak od 1,2 ‰, ali se na ovom lokalitetu on nalazi samo 0,2 m iznad litološke granice između graničnog i pjeskovitog dolomita. Tako postavljena kemostratigrafska granica perm–trijas podudara se i s nestankom fosila u naslagama (FIO, 2010; FIO et al., 2010).

Istraživanja granice perm–trijas na području Velebita omogućila su određenje kemostratigrafske granice, koja se s velikom sigurnošću može smatrati i kronostratigrafskom granicom, a na oba istraživana lokaliteta nalazi se unutar iste litološke jedinice, pjeskovitih dolomita, bez ikakve promjene facijesa. Osim određenja točnog položaja granice može se zaključiti i da se unatoč najvećoj ekološkoj krizi u povijesti Zemlje, kad je izumrlo oko 95% organizama, u istraživanom području kontinuirano odvijalo taloženje plitkomorskih karbonata. Rezultati ovog istraživanja doveli su do zaključka da su promjene u okolišu uzrokovane anoksijom bile vjerojatni uzrok izumiranja, što nikako ne isključuje kombinaciju s drugim faktorima i događajima. Pretpostavlja se da je kao posljedica regresije u mlađem permu nastala litološka granica, nakon čega su slijedile transgresivne faze krajem perma te ponovno spuštanje morske razine i stagnacija vodenog stupca prema granici perm–trijas i tijekom najstarijeg dijela trijasa.

## 3.2. Područje Samoborskog gorja (Unutarnji Dinaridi)

Na sjevernom dijelu Samoborskog gorja, na cesti od Bregane prema selu Grdanjci, nalaze se permske i trijaske naslage taložene na prostoru karbonatne platforme koja se nalazila u rubnom području tadašnjeg prostranog oceana Paleotetisa (**slika 2**). Iako su stijene izrazito poremećene rekonstruiran je slijed u području granice perm–trijas u ukupnoj debljini od približno 23 m (FIO FIRI et al., 2016).

Bazni dio slijeda sačinjavaju gornjopermske naslage bogate ostacima mikrofosila (cjeloviti i djelomični ostaci ponajviše zelenih i crvenih alga, puževa, kućica foraminifera). Temeljem sedimentoloških i paleontoloških analiza pretpostavljeno je da se na ovom području u mlađem dijelu perma odvijala sedimentacija u plitkomorskim zaštićenim prostorima, nakon čega je došlo do relativnog pada morske razine. Središnji dio slijeda čine dolomitične breče i mikrobreče koje se sastoje od različitih fragmenata (karbonatnog i terigenog podrijetla). Terigeni donos utjecao je na nastanak dijela biote, posebice alga, te se u slijedu breča mogu pronaći samo ostaci tzv. malih foraminifera za koje se zna da su bile vrlo otporne na stresne uvjete u okolišu i koje su živjele i tijekom perma i tijekom trijasa. U karbonatnim brečama koje sačinjavaju središnji dio rekonstruiranog slijeda vjerojatno se nalazi i sama granica između perma i trijasa, koja bi u naslagama taloženim u manje stresnim okolnostima i uz manji donos materijala s kopna, vjerojatno bila jasnije zabilježena unutar slijeda. U nastavku slijeda nalaze se ponovno stijene nastale u plitkomorskom, zaštićenom području, a nalazi fosila karakterističnih za dio donjeg trijasa potvrđuju da se tu već radi o naslagama trijaskog perioda (FIO FIRI et al., 2016).

### **3.3. Ostale lokacije u Hrvatskoj s mogućom granicom perm–trijas**

Na području Gorskog kotara nalaze se gornjopaleozojske naslage, no mlađi dio perma nije utvrđen sa sigurnošću unatoč nalazima mikrofosila iz toga razdoblja (SREMAC & ALJINOVIĆ, 1997). I za prirodu same granice perm–trijas na ovom prostoru postoje različita mišljenja, te napr. HERAK & TOMIĆ (1995) pretpostavljaju postojanje kontinuiranog taloženja iz perma u trijas na ovom prostoru, PALINKAŠ & SREMAC (1989) pretpostavljaju da je u vrijeme granice perm–trijas u plitkomorskim okolišima dolazilo do taloženja velikih količina bakterija koje su vršile redukciju sulfata, što je rezultiralo ranodijagenetskim ležištem barita i pirita, dok SREMAC & ALJINOVIĆ (1997) pretpostavljaju prekid sedimentacije u vrijeme same granice, tako da ona za sada nije jednoznačno utvrđena.

U prostoru središnjeg dijela Krških Dinarida (središnja i sjeverna Dalmacija, JI dio Like i Z Bosna i Hercegovina) nalaze se evaporitne naslage gornjeg perma i na njima kontinuirano taložene naslage donjeg trijasa, čija je starost dokazana palinološkim analizama te vrijednostima omjera sumpornih izotopa. Ove su naslage nastajale u sušnoj klimi, u plitkomorskom području, prilikom postupnog pada morske razine krajem perma, kad su facijesi prelazili iz morskih u kopnene, a početkom trijasa došlo je do ponovnog prijelaza u morske okoliše taloženja (ŠUŠNJARA et al., 1992).

## 4. MOGUĆI UZROCI MASOVNOG IZUMIRANJA NA GRANICI PERM-TRIJAS

Sam uzrok izumiranja na granici perm-trijas još uvijek nije pouzdano utvrđen. Postoje vrlo brojne hipoteze za objašnjenje krize u okolišu koje uključuju udar meteorita (napr. BECKER et al., 2001), masivni vulkanizam (napr. RENNE et al., 1995), stratifikaciju oceana s visokim koncentracijama CO<sub>2</sub> u dubokim oceanskim vodama (napr. KUMP, 1991), anoksiju u oceanima (napr. WIGNALL & TWITCHETT, 1996), destabilizaciju hidrata koji su sadržavali metan i nagli izlaz metana u atmosferu (napr. MORGAN et al., 2004), a mnogi od navedenih uzroka posljedično bi doveli i do značajnog porasta temperature mora (napr. SONG et al., 2014). Najnovija istraživanja uzrokom smatraju značajne klimatske promjene, odnosno naglo zahlađenje i glacijalni stadij krajem perma, koji je prethodio izrazitom globalnom zagrijavanju koje se smatra jednim od mogućih uzroka izumiranja (BARESEL et al., 2017). Ipak, kao najvjerojatniji uzrok najznačajnijeg izumiranja u povijesti Zemlje na granici perm-trijas smatra se kombinacija više navedenih događaja (napr. ERWIN, 2006). Svaka od ovih promjena imala bi značajan, pretežito negativan utjecaj na život na Zemlji, te je teško i zamisliti koliko je različitih životnih oblika uključeno u brojku koja predstavlja gotovo 95 % organizama koji su tada živjeli. Upravo se zbog toga ovo izumiranje naziva i *majka svih izumiranja*.

Nabrojane hipoteze mogu se objasniti na nekoliko različitih načina. Jedan od mogućih scenarija uključuje promjene u okolišu koje su nastupile već tijekom perma, a utjecale su na postupan nestanak mnogobrojnih organizama, da bi konačna faza nastupila kao posljedica značajne vulkanske aktivnosti, čije su posljedice uzrokovale cijeli niz događaja (WIGNALL, 1999). Pretpostavlja se da je vulkanska aktivnost bila toliko značajna da je površina koju su zahvatile posljedice vulkanizma i na kojoj se može naći trag vulkanske aktivnosti veća od površine Europe, dok su erupcije, s razdobljima zatišja, trajale i do dva milijuna g. Slijedile su značajne promjene u atmosferi zbog mnoštva prisutnih plinova i čestica, značajna promjena klime, a temperaturne promjene dovele su do uništenja kontinentalnih okoliša i organizama, promjene razine mora, ali i anoksije u morskim prostorima, što je i vidljivo u zapisima izotopa ugljika. Tektonska aktivnost, ali i temperaturne promjene mogle su prouzročiti i destabilizaciju hidrata i izboje metana, čime je značajno stradao život u moru, ali i u atmosferi općenito. Svi su navedeni događaji uzrokovali i značajne klimatske promjene, što je utjecalo prvenstveno na plitkomorske organizme, ali i na život u cjelini. Udar nekog nebeskog tijela poput asteroida također se smatra mogućim uzrokom, no malo je dokaza za ovu tvrdnju, posebice s obzirom na vrlo malu vjerojatnost pronalaska kratera u stijenama starim preko 250 milijuna godina, koje su tek malim dijelom danas izložene na površini Zemlje.

## 5. ZAKLJUČAK

Izumiranje na granici perm–trijas najveće je od pet velikih izumiranja koja su pogodila Zemlju u njezinoj oko 4,6 milijardi godina dugoj geološkoj prošlosti. Izumrlo je oko 95% tada živućih organizama koji uključuju mnogobrojne skupine praživotinja, beskralježnjaka (različiti koralji, mekušci, bodljikaši, mahovnjaci, ramenonošci, člankonošci) i kralježnjaka (ribe, vodozemci, gmazovi) te mnogobrojne biljne vrste. Najznačajnije su stradali upravo oblici koji koriste kalcijev-karbonat za izgradnju skeleta, posebice zbog promjena u količinama ugljikovog dioksida. Brojnost mnogih skupina organizama smanjivala se već i tijekom razdoblja perma.

Dokaze zapisane u stijenama koji ukazuju na ovaj događaj možemo naći i na prostoru Hrvatske, i to na nekoliko lokaliteta na području Velebita i Samoborskog gorja, vjerojatno i u Gorskem kotaru i području središnjih Dinarida, a moguće i na nekim drugim lokacijama.

Istraživanja tako kompleksnih događaja uključuju multidisciplinaran pristup, u kojem geokemija zauzima značajno mjesto, jer su same promjene, koliko god značajne bile, često teško vidljive makroskopski. Na proučavanim lokalitetima na području Velebita litološka granica između graničnog i pjeskovitog dolomita predstavlja promjene nastale zbog relativne promjene morske razine u mlađem permu, i ne podudara se s kemostratigrafskom granicom koja predstavlja i samu granicu perm–trijas. Donos siliciklastičnog materijala vjerojatno je posljedica značajnog izdizanja i trošenja tadašnjeg kopna, a donos je utjecao i na vidljiv nestanak fosilnih zajednica, koji je nastupio i prije same granice perm–trijas. Rezultati iz Samoborskog gorja sukladni su s ovakvim načinom razmišljanja, iako je zbog drukčije vrste naslaga nemoguće dobiti kemostratigrafske podatke koji bi u potpunosti potvrdili ovakvu pretpostavku.

Iako postoji cijeli niz hipoteza za objašnjenje ovog događaja, najvjerojatnije objašnjenje prema dokazima zapisanim u stijenama na našim prostorima uključuje značajno smanjenu količinu kisika u oceanima (anoksija). Za objašnjenje tog najvećeg izumiranja u povijesti Zemlje postoji više različitih hipoteza, od udara meteorita, značajne vulkanske aktivnosti, stratifikacije oceana s visokim koncentracijama CO<sub>2</sub> u dubokim oceanskim vodama, anoksije u oceanima, naglog oslobođanja velike količine metana u atmosferu, što sve ima veze i sa značajnim klimatskim promjenama. Kao najvjerojatniji uzrok i dalje se smatra kombinacija više navedenih događaja, pri čemu će veliki interes koji rezultira kontinuiranim istraživanjima na brojnim svjetskim lokalitetima svakako nadopuniti dosadašnja znanja.

## 6. LITERATURA

1. Baresel, B., Bucher, H., Bagherpour, B., Brosse, M., Guodun, K., Schaltegger, U. (2017): Timing of global regression and microbial bloom linked with the Permian–Triassic boundary mass extinction: implications for driving mechanisms. *Scientific Reports*, 7: 43630, 1–8.
2. Becker, L., Poreda, R. J., Hunt, A. G., Bunch, T. E., Rampino, M. (2001): Impact event at the Permian–Triassic boundary: evidence from extraterrestrial noble gases in fullerenes. *Science*, 291, 1530–1533.
3. Buggisch, W., Noé, S. (1986): Upper Permian and Permian–Triassic Boundary of the Carnia (Bellerophon Formation, Tesero Horizon, Northern Italy). *Memorie della Società Geologica Italiana*, 34, 91–106.
4. Cassinis, G., Perotti, C. R. (2007): A stratigraphic and tectonic review of the Italian Southern Alpine Permian. *Paleoworld*, 16, 140–172.
5. Dolenc, T., Lojen, S. (2000): Ce anomaly at the Permian–Triassic boundary in the Idrijca Valley as evidence of changing redox conditions at the P/Tr transition in the western Tethys (Slovenia). *Geologija*, 43, 103–107.
6. Dolenc, T., Lojen, S., Ramovš, A. (2001): The Permian–Triassic boundary in Western Slovenia (Idrijca Valley Section): magnetostratigraphy, stable isotopes, and elemental variations. *Chemical Geology*, 175, 175–190.
7. Erwin, D. H. (2006): Extinction. How life on Earth nearly ended 250 million years ago. Princeton University Press, 296 str.
8. Fio, K. (2010): Biotički i abiotički pokazatelji stresa u naslagama na prijelazu iz perma u trijas na području Velebita. Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, 223 str.
9. Fio, K., Spangenberg, J. E., Vlahović, I., Sremac, J., Velić, I., Mrinjek, E. (2010): Stable isotope and trace element stratigraphy across the Permian–Triassic transition: a redefinition of the boundary in the Velebit Mountain, Croatia. *Chemical Geology*, 278, 38–57.
10. Fio Firi, K., Sremac, J., Vlahović, I. (2016): The first evidence of Permian–Triassic shallow-marine transitional deposits in Northern Croatia: Samoborsko Gorje Hills. *Swiss Journal of Geosciences*, 109/3, 401–413.
11. Fio, K., Sremac, J., Vlahović, I., Velić, I., Spangenberg, J. E. (2013): Permian deposits and the Permian–Triassic boundary in Croatia: palaeoclimatic implications based on palaeontological and geochemical data. Gąsiewicz, A. & Słowakiewicz, M. (ur.), *Palaeozoic*

- Climate Cycles: Their Evolutionary and Sedimentological Impact. Geological Society, London, Special Publications, 376, 539–548.
12. Gorjan, P., Kaiho, K., Chen, Z. Q. (2008): A carbon-isotopic study of an end-Permian mass-extinction horizon, Bulla, northern Italy: a negative  $\delta^{13}\text{C}$  shift prior to the marine extinction. *Terra Nova*, 20, 253–258.
13. Gorjan, P., Kaiho, K., Kakegawa, T., Niitsuma, S., Chen, Z. Q., Kajiwara, Y., Nicora, A. (2007): Paleoredox, biotic and sulphur-isotopic changes associated with the end-Permian mass extinction in the western Tethys. *Chemical Geology*, 244, 483–492.
14. Haas, J., Demény, A., Hips, K., Vennemann, T. W. (2006): Carbon isotope excursions and microfacies changes in marine Permian–Triassic boundary sections in Hungary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237, 160–181.
15. Haas, J., Demény, A., Hips, K., Zajzon, N., Weiszburg, T. G., Sudar, M., Pálfy, J. (2007): Biotic and environmental changes in the Permian–Triassic boundary interval recorded on a western Tethyan ramp in the Bükk Mountains, Hungary. *Global and Planetary Change*, 55, 136–154.
16. Haas, J., Góczán, F., Oravecz-Scheffer, A., Barabás-Stuhl, Á., Majoros, Gy., Bérczi-Makk, A. (1986): Permian–Triassic Boundary in Hungary. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 34, 221–243.
17. Herak, M., Tomić, V. (1995): Continental subduction tectonics in the high karst Dinarides of Western Croatia. *Geologia Croatica*, 48, 161–166.
18. Horacek, M., Brandner, R., Abart, R. (2007): Carbon isotope record of the P/T boundary and the Lower Triassic in the Southern Alps: Evidence for rapid changes in storage of organic carbon. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252, 347–354.
19. Kiessling, W., Flügel, E., Golonka, J. (2003): Patterns of Phanerozoic carbonate platform sedimentation. *Lethaia*, 36, 195–226.
20. Kolar-Jurkovšek, T., Jurkovšek, B. (2007): First record of *Hindeodus–Isarcicella* population in Lower Triassic of Slovenia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252, 72–81.
21. Kump, L. R. (1991): Interpreting carbon-isotope excursion: Strangelove oceans. *Geology*, 19, 299–303.
22. Morgan, J. P., Reston, T. J., Ramero, C. R. (2004): Contemporaneous mass extinction, continental flood basalts, and “impact signals”: are mantle plume-induced lithospheric gas explosions the cause link? *Earth and Planetary Science Letters*, 217, 263–284.

23. Palinkaš, L., Sremac, J. (1989): Barite bearing stromatolites at the Permian–Triassic boundary in Gorski Kotar (Croatia, Yugoslavia). *Memorie della Societa Geologica Italiana*, 40, 259–264.
24. Polšak, A., Pezdić, J. (1978): Paleotemperaturni odnosi u karbonu i permu Dinarida i Alpa na temelju kisikove izotopne metode i njihova uloga u paleogeografiji. *Geološki vjesnik*, 30/1, 167–187.
25. Renne, P. R., Zichao, Z., Richards, M. A., Black, M. T., Basu, A. R. (1995): Synchronology and causal relations between Permian–Triassic boundary crises and Siberian flood volcanism. *Science*, 269, 1413–1416.
26. Salopek, M. (1942): O gornjem paleozoiku Velebita u okolini Brušana i Baških Oštarija. *Rad Jugoslavenske Akademije znanosti i umjetnosti*, 274, 218–272, Zagreb.
27. Salopek, M. (1948): O gornjem paleozoiku sjeveroistočnog podnožja Velebita i Like. *Prirodoslovna istraživanja Jugoslavenske Akademije znanosti i umjetnosti*, 24, 1–75.
28. Scholger, R., Mauritsch, H. J., Brandner, R. (2000): Permian–Triassic boundary magnetostratigraphy from the Southern Alps (Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 176, 495–508.
29. Schwab, V., Spangenberg, J. E. (2004): Organic geochemistry across the Permian–Triassic transition at the Idrijca Valley, Western Slovenia. *Applied Geochemistry*, 19, 55–72.
30. Sokač B., Šćavničar, B., Velić, I. (1976): Osnovna geološka karta SFRJ – Tumač za list Gospić L33-127. Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd, 64 str.
31. Song, H., Wignall, P.B., Chu, D., Tong, J., Sun, Y., Song, H., He, W., Tian, L. (2014): Anoxia/high temperature double whammy during the Permian–Triassic marine crisis and its aftermath. *Scientific Reports*, 4: 4132, 1–7.
32. Sremac, J. (2005): Equatorial shelf of the Palaeozoic supercontinent – cradle of the Adriatic Carbonate Platform. *Geologia Croatica*, 58/1, 1–19.
33. Sremac, J., Aljinović, D. (1997): Upper Palaeozoic Fossils from Clastic Sedimentary Rocks in the Gorski Kotar Region. *Geologia Croatica*, 50/2, 187–199.
34. Šušnjara, A., Sakač, K., Jelen, B., Gabrić, A. (1992): Upper Permian evaporites and associated rocks of Dalmatia and borderline area of Lika and Bosnia. *Geologia Croatica*, 45, 95–114.
35. Twitchett, R. J. (1999): Palaeoenvironments and faunal recovery after the end-Permian mass extinction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 154, 27–37.

36. Wang, C. (2007): Anomalous hopane distributions at the Permian–Triassic boundary, Meishan, China – Evidence for the end-Permian marine ecosystem collapse. *Organic Geochemistry*, 38, 52–66.
37. Wang, C., Visscher, H., 2007. Abundance anomalies of aromatic biomarkers in the Permian–Triassic boundary section at Meishan, China – Evidence of end-Permian terrestrial ecosystem collapse. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252, 291–303.
38. Wignall, P. B. (1996): Large igneous provinces and mass extinctions. *Earth Science Reviews* 53, 1–33.
39. Wignall, P. B., Twitchett, R. J. (1996): Oceanic anoxia and the end-Permian mass extinction. *Science*, 272, 1155–1158.
40. Xie, S., Pancost, R. D., Huang, X., Jiao, D., Lu, L., Huang, J., Yang, F., Evershed, R. P. (2007): Molecular and isotopic evidence for episodic environmental change across the Permo/Triassic boundary at Meishan in South China. *Global and Planetary Change*, 55, 56–65.

## MASOVNI VULKANIZMI KAO UZROČNICI MASOVNIH IZUMIRANJA

Uroš BARUDŽIJA, Tomislav MALVIĆ

Ispod površine planete Zemlje, odnosno pod stijenskim omotačem koji čine kora i litosfera i prosječne je debljine 400 km, dinamika planeta iznimno je snažna i uzrokuje stalne promjene u najvećem dijelu njegova volumena. Sama unutarnost Zemlje nalazi se pod znatno većim tlakom i temperaturom negoli li je to ona na površini. Jedna od posljedica tih sila su vulkani kao njihova površinski odraz, te magmatska ognjišta kao pojave velike potencijalne energije smještene u kori i litosferi. Obje te pojave vezane su uz magmu, koja izlaskom na površinu se imenuje lavom. Magma je užarena, tekuća, fluidna masa rastopljenih stijena i minerala, uz niz lakoisparljivih, plinovitih komponenata (poput vodene pare, ugljičnoga dioksida, sumporovoga dioksida i drugih). Temperatura joj se kreće otprilike između 600 i 1200 stupnjeva, ovisno o sastavu, dubini i okolnim medijima. Ujedno je i manje gustoće od stijena između kojih prolazi, što znači da se njezina migracija odvija zbog gravitacijske separacije, odnosno uzgona. Ovisno o volumenu magme i geološkim svojstvima krovinskih stijena ona se može utisnuti i ohladiti (kristalizirati) na nekoj dubini ili prodrijeti sve do površine. U prvom slučaju nastat će intruzivne ili dubinske, plutonske, a u drugom efuzivne (ekstrazivne, eruptivne) stijene.

Izlazak lave na površinu u biti se odvija na dva temeljna načina (npr. MALVIĆ, 1992). Jedan je kada lava oblikuje površinske izljeve, obično kroz velike rasjedne zone ili pukotine u okolini vulkanskoga kratera. U ekstremnih slučajevima oni mogu biti regionalni, prekrivati velike površine od nekoliko tisuća kilometara kvadratnih te doseći debljibju d nekoliko stotina pa i tisuću metara. Takvih izljeva bilo je više u Zemljinoj prošlosti, a posebice su znali pratiti najveće vrste asteroidnih udara u ranoj povijesti oblikovanja planeta (npr. MALVIĆ, 2013). Danas se stijene nastale takvih velikim izljevanjem mogu opaziti na Islandu, u SAD-u, Indiji (Dekkan), u Africi te Sibiru. Drugi oblik izbijanja magme na površinu jest vulkanizmom (Vulkan je bio rimski bog vatre, ognja i kovača koji stoluje na planini Etni na Siciliji). To se događa kada kada užarena magma, pod velikim tlakom i temperaturom, probije najplići dio kore i izbije na površinu. U tom slučaju izboj je eksplozivan te otvara jedan ili više kratera koji su s magmatskim ognjišten povezani tzv. «dimnjacima». Način izboja na površinu, njegova snaga i kemizam magme uvjetuju oblik kratera vulkana te način izljevanja lave nakon izboja.

## 1. DVIJE OSNOVNE VRSTE VULKANA I POJAVE NA NJIMA

Magmatsko ognjište vulkana nalazi se na različitim dubinama, no obično seže do nekoliko kilometara unutar kore. Struktura na površini naziva se vulkanski čunj, koji je obično najlakše prepoznati kod stratovulkana, a njezin vrh obilježen je kraterom, odnosno ljevkastom, spuštenom strukturom. Taj površinski dio vulkana najvećim dijelom izgrađen je od ohlađene lave i vulkanskoga pepela koji je kompakcijom postao tuf, a kasnije može prijeći i u stijenu tufit (75-90 % sadržaja priloklastičnoga materijala).

Ako je magma bogata plinovima, posebice vodenom parom, vulkan je eksplozivnoga tipa, jer se oslobođanjem plinova događa eksplozija. Što je sadržaj plinova u magmi manji, na površini će se lave mirnije izlijevati, dok će plinovi postupno isparavati. To za posljedicu ima da se lave dijele po svome viskozitetu što utječe na brzinu površinskoga kretanja. Ako je viskozitet velik, sporo kretanje može uzrokovati da već magma se ohladi i oblikuje intruzivne stijene, koji onda sprječava kretanje dubljih dijelova te iste magme. Ona se zbog uzgona i dalje nakuplja ispod «čepa» te raste tlak. To će posebice biti izraženo ako se vremenom mijenja kemizam magme, poraste udjel plinova u njoj, i smanji viskozitet. Tada je porast tlaka veći. Na kraju će cijelo to područje postati iznimno nestabilno i erupcija će biti iznimno eksplozivna, nekada toliko jaka da može razoriti cijeli postojeći vulkanski čunj. Takav katastrofalan događaj (primjer je erupcija vulkana Krakataua 1883. godine) može dodatno potaknuti bilo kakav jačin tektonski događaj, poput kumulativnog naprezanja zbog rasjedanja ili potresa.

Sama erupcija događaj je u kojem se izbacuje različiti materijal, glede veličine i sastava, te koji prekriva različitu površinu. Jednim imenom sav taj materijal naziva se piroklastičnim, a sastavljen je od vulkanskoga pepela, lapila (klasti veličine šljunka) te vulkanske bombe (koje su najvećih dimenzija). Svaku vulkansku aktivnost, kako erupcije tako i vrijeme «mirovanja», prate i popratne pojave, najčešće plinovite, koje ukazuju da je magmatsko ognjište u podzemlju još uvijek aktivno. To su fumarole, mjesta gdje na površini izbijaju magmatski plinovi i čija temperatura na prelazi  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ovisno o (prevladavajućem) plinu koji izbija na takvim mjestima dijele se na solfatare (imenovane po fumaroli Solfatara kod Pozzulija u Italiji), gdje obilno izbija sumporov vodik ( $\text{H}_2\text{S}$ ) iz kojega se oksidacijom izlužuje sumpor. Mofete su mjesta gdje dominira ugljčni dioksid ( $\text{CO}_2$ ), a gejziri mjesta s vodenom parom ( $\text{H}_2\text{O}$ ) imenovana prema mjestu Gejzir na Islandu.

Raspored vulkana u Svijetu vezan je uglavnom uz raspored velikih rasjednih sustava litosfere te dodira tektonskih ploča. Tri najveća takva pojasa danas su tihooceanski, sredozemno-indonezijski i atlantski, na kojima se oceanska kora podvlači pod oceansku.

## 2. MASOVNI VULKANIZAM I NJEGOV UTJECAJ NA ZEMLJU

Utjecaj vulkana uvijek je regionalan i erupcije ili izljevi značajno mijenjaju okoliš. Iako je svaka erupcija, s ljudskog stajališta, iznimno snažan, opasan događaj, većina njih, ako se radi o aktivnosti jednoga vulkana, promjene izaziva samo u svojoj okolini. One u atmosferi, zbog povećanog broja čestica aerosola, mogu se raširiti globalno, no njihovo trajanje mjeri se u danima. Takvih erupcija u nedavnoj ljudskoj povijesti, koje su opažene na velikom prostoru i dobro opisane bilo je veliki broj. Jedna je spomenuta ranije, ona erupcije vulkana Krakatau 1883. godine u Indoneziji. Vulkan Etna na Siciliji često je eruptirao tijekom pisane povijesti, tako da mu je današnji krater širok oko 450 m, a samo vulkansko brdo dosiže visinu od 3274 m. Vezuv blizu Napulja poznat je po svojoj erupciji iz 79. g. p. K., kada je pepeo prekrio gradove Pompeje i Herculaneum. Rađanje vulkana Paricutin u Meksiku znanstvenici su mogli pratiti 1943.-1950. Zabilježene su i aktivnosti vulkana Chichonal u Meksiku, St. Helens u Kordiljerima, M. Pelee na Martiniqueu u Malim Antilima i niza drugih. No, sve su to aktivnosti koji nisu utjecale na ljudski rod i život općenito, osim uzroka loklanih promjena u njihovim okolicama. Međutim, bilo je i onih, drugih, rjeđih, ali s globalnim utjecajem na reljef, atmosferu, biosferu i Zemlju kao planet općenito.

### 2.1. Utjecaj vulkanizma na velika izumiranja

Uzroci masovnih izumiranja u geološkoj prošlosti predmet su znanstvenih rasprava, a glavno otvoreno pitanje je jesu li impakti (udari izvanzemaljskih tijela – asteroida i kometa), velike magmatske erupcije (engl. Large Igneous Provinces - LIPs) ili pak njihova kombinacija primarni mehanizmi koji pokreću promjene staništa, a koje se smatraju neposrednim uzrocima četiri od pet glavnih masovnih izumiranja. Novija istraživanja ukazuju, na primjer, na to da se impakti više ne smatraju jedinim uzrokom masovnog izumiranja na granici krede i tercijara (KT izumiranje), niti za ostala zabilježena masovna izumiranja.

Prirodoslovni muzej u Londonu (Natural History Museum London) organizirao je 2013. godine međunarodnu multidisciplinarnu konferenciju (**poveznica 1**), kako bi sakupili i raspravili trenutne znanstvene spoznaje o vulkanizmu, impaktima i masovnim izumiranjima te stratigrafske i geokemijske zapise okolišnih promjena tijekom najvećih događaja masovnih izumiranja. Glavni cilj konferencije bio je procijeniti trenutni status različitih hipoteza o uzrocima masovnih izumiranja živih vrsta na Zemlji: ulogu masovnog vulkanizma i impakata te okolišne promjene tijekom glavnih epizoda izumiranja. Prezentirani podatci i koncepti imaju i puno veći utjecaj,

izvan samih geoznanosti. Za ovaj prikaz trenutnih spoznaja o utjecaju vulkanizma na izumiranja korištene su zabilješke o rezultatima konferencije, prema prof. dr. G. Keller i suradnicima (vidjeti internetske poveznice navedene u literaturi).

## **2.2. Vulkanske erupcije velikih bazaltnih tijela (LIPs)**

Najveća masovna izumiranja u povijesti Zemlje dogodila su se krajem ordovicija (prije oko 440 mil. godina), krajem devona (prije oko 360 mil. godina), krajem perma (prije oko 250 mil. godina), na prijelazu trijasa u juru (prije oko 200 mil. godina) i krajem krede (prije oko 65,5 mil. godina). Dva glavna potencijalna uzročnika tih izumiranja koja su detektirana još ranih 1980-ih godina, su udar asteroida (impakt) i velike magmatske (vulkanske) erupcije (engl. Large Igneous Provinces - LIPs). Da bi utvrdili uzroke izumiranja, potrebno je precizno datiranje tragova impakata i vulkanskih stijena. Novija intredisciplinarna istraživanja velikih izljeva bazaltnih tijela u Indiji, tzv. Dekanskih zamki (izljeva) (engl. Deccan Traps), pri kojima su korišteni podatci iz paleontologije, vulkanologije, petrologije, geokronologije i paleomagnetizma, pokazala su da se tragovi impakta (iridijske (Ir) anomalije) nalaze između pojedinih izljeva lave. Vulkanski izljevi vjerojatno su se dogodili u pojedinačnim „impulsima“, a neki od njih bili su i ogromnih razmjera. Postoje dokazi i o izljevima od više od  $10000 \text{ km}^3$  bazaltne lave u manje od 100 godina, a možda čak i u samo 10 godina. Za usporedbu, najveća bazaltna erupcija zabilježena u povijesnom razdoblju, 1783. godine na Islandu (tzv. Laki erupcija), izbacila je oko  $15 \text{ km}^3$  lave u periodu od godinu dana. Jedan veliki indijski Dekanski izljev mogao je izbaciti najmanje 667 Laki erupcija u manje od 100 godina, ili čak 100 Laki erupcija u 15 godina. Količina  $\text{CO}_2$  i  $\text{SO}_2$  izbačena u atmosferu pri samo jednoj od tih gigantskih erupcija bila bi ogromna, odnosno istog intenziteta kao i materijal izbačen impaktom asteroida na Yucatanu (Chicxulub krater).

## **2.3. Oceanske pločaste (plateau) erupcije**

Potencijalni utjecaj na okoliš kontinentalnih izljeva bazalta je višestruko dokumentiran, a mogući utjecaj oceanskih pločastih erupcija na atmosferu, biosferu i hidrosferu je manje proučavan. Oceanske pločaste erupcije mogu uzrokovati trenutna masovna izumiranja (unutar nekoliko sekundi). Periodi oceanskih ekoloških kriza mogu se detektirati u geološkom zapisu pojavom crnih škriljavaca, koji ukazuju na dubokoceanske uvjete s niskim sadržajem ili bez kisika, povezanih s formiranjem oceanskih platoa (ploča), osobito oko granice cenomana i turona (prije 93,5 milijuna godina), u aptu (prije 124-112 milijuna godina) i na kraju jure (prije cca 200

milijuna godina). Prosječne temperature na Zemlji u navedenim razdobljima krede bile su znatno više nego danas, što je vjerojatno posljedica značajnog povećanja globalnog atmosferskog udjela CO<sub>2</sub>. Ove pojave prate masovna izumiranja, koja su rezultirala nestankom oko 20% svih poznatih rodova živih organizama. Cenomansko-turonski (CT) i aptski događaji su povezani s formiranjem oceanskih bazaltnih platoa (ploča), na što ukazuju geokemijski podatci o elementima u tragovima te radioaktivni izotopi. Procijenjeni volumen lava tih oceanskih platoa (ploča) je oko  $1 \times 10^7 \text{ km}^3$ .

U moguće učinke oceanskih pločastih erupcija ubraja se i izdizanje oceanske litosfere (uslijed magmatskih pulseva u gornjem Zemljinom omotaču), koje su tako mogle poremetiti cirkulaciju hladnih, kisikom bogatih polarnih voda u niže geografske širine, što je potom rezultiralo povećanom anoksijom oceana. Oslobadanje hidrotermalnih fluida izravno je doprinijelo zagrijavanju oceana i anoksiji, budući da je topivost kisika bitno smanjena u toploj morskoj vodi, dok povišena razina CO<sub>2</sub> zbog jake vulkanske aktivnosti dovodi do globalnog povišenja temperature. Uočeni efekti oceanskih pločastih erupcija bazalta podržavaju hipotezu o raširenoj globalnoj oceanskoj anoksiji, koja mijenja oceane i atmosferu. Pločaste erupcije tako pokreću niz događaja koji dovode do globalnog zatopljenja, anoksije oceana, taloženja crnih škriljavaca i na kraju do masovnih izumiranja.

## **2.4. Masovno izumiranje na granici krede i tercijara (KT izumiranje)**

Danas se samo masovno izumiranje krajem krede može direktno povezati s udarom asteroida (Chicxulub krater na poluotoku Yucatan), iako samo djelomice. No, i veliki izljevi bazalta u Indiji (tzv. Dekanske zamke (izljevi); engl. Deccan Traps), koji sadrže milijune km<sup>3</sup> bazaltnе lave, vremenski su ekvivalentni tom izumiranju. Prema trenutno dostupnim podatcima, veliko izumiranje na granici krede i tercijara (KT izumiranje) je vjerojatno povezano s velikim pulsevima plinova u atmosferu, koji uzrokuju epizode hlađenja i zagrijavanja atmosfere. Kisele kiše pak uzrokuju kalcifikacijske krize u morima i oceanima (krize precipitacije karbonata, potrebnog za formiranje skeleta mnogih živih organizama), ubrzavaju procese trošenja minerala i stijena na kopnu, što dalje vodi velikom unosu nutrijenata u oceane i uzrokuje eutrofičnost i anoksičnost oceana, koji postaju „negostoljubivi“ za život. Zahvaljujući podatcima paleontologije, paleomagnetizma i preciznog datiranja, kod Dekanskih izljeva bazalta možemo razlikovati niz od tri faze: 1. faza - oko 2 milijuna godina prije kraja krede; 2. faza - u zadnjih nekoliko 100 000 godina krede; i 3. faza - u ranom paleocenu, oko 300 000 godina nakon masovnog izumiranja. Impakt asteroida dogodio se tijekom druge faze. Svaka vulkanska faza sastojala se od megaimpulsa, a svaki impuls sastojao se od više manjih impulsa. Trenutno

dostupni podatci ukazuju na to da je glavni uzrok masovnog izumiranja ipak bio masivni vulkanizam, iako su i drugi događaji (prvenstveno impakt asteroida) utjecali na izumiranje.

## 2.5. Masovno izumiranje na granici trijasa i jure (TJ izumiranje)

Razdoblje trijasa započelo je nakon velikog masovnog izumiranja krajem perma, a završilo je s još jednim izumiranjem, koje je istovremeno utjecalo i na morske i na kopnene ekosustave, podudarajući se s globalnim stakleničkim zatopljenjem i velikim promjenama u ciklusu ugljika. Uzrok ovih okolišnih i biotskih promjena je još nedovoljno istražen. Alvarezova hipoteza o impaktu na Yucatanu (Chicxulub krater) na KT granici potaknula je potragu za ekstraterestričkim tragovima i na TJ granici, ali uvjerljivi dokazi o impaktu do danas nisu pronađeni. Vjerojatniji uzrok dobiven je U-Pb datiranjem slojeva vulkanskog pepela marinskih sekvencija, koje povezuje granicu TJ (prije oko 200-201,4 milijuna godina) s istodobnim eruptivnim pulsom iz srednjearaltske magmatske provincije (engl. Central Atlantic Magmatic Provinces - CAMP). CAMP je jedna od najvećih magmatskih provincija u fanerozoiku, koja je „najavila“ raspad superkontinenta Pangee. Bazaltne lave eruptirale su na prostranim područjima današnjih četiriju kontinenata (Sjeverna i Južna Amerika, Afrika i Europa). Te magmatske provincije danas se smatraju „okidačem“ niza povezanih bioloških i ekoloških katastrofa na Zemlji. TJ katastrofa uzrokovala je izumiranje konodonata i gotovo potpun nestanak amonita. Grebenske zajednice nestaju i ostaje „velika ranojurska praznina“. Kopneni život također je pretrpio krizu, a najpoznatiji je po makroflori sačuvanoj na Grenlandu. Dinosauri su bili „pobjednici“ ove katastrofe, jer su iskoristili ekološku priliku nastalu izumiranjem manjih gmažova na granici TJ.

Koncentracije atmosferskog CO<sub>2</sub> naglo su porasle, zajedno s ekstremnim zatopljenjem atmosfere, što se može uočiti i na strukturi fosilnih listova ginka. Na vruću i vlažnu klimu na granici TJ ukazuje i obilnost kaolinita, minerala iz skupine minerala glina, nastalog procesima trošenja feldspata na kopnu. Negativni pomaci krivulje izotopa ugljika također prate ove promjene na granici TJ. Modeliranjem ovih podataka pokazano je da niti vulkansko otplinjavanje iz Zemljinog gornjeg omotača, niti smanjena primarna biološka produktivnost ne daju zadovoljavajuća objašnjenja za ovo izumiranje. Unos izotopno lakog ugljika je moguć uslijed disocijacije plinskih hidrata koji pohranjuju bakterijski proizvedeni metan u sedimentima, ili uslijed oslobođanja termogenog metana, gdje uzlazne lave iz CAMP-a dolaze u kontakt s ležištima ugljena. U svakom slučaju, CAMP magmatizam vjerojatno predstavlja „okidač“, a efekti početnog vulkanskog zatopljenja potaknutog oslobođanjem CO<sub>2</sub> znatno su pojačani oslobođanjem metana, što rezultira velikim promjenama stakleničkih plinova u atmosferi.

Analiza cikličke izmjene sedimentnih stijena na granici TJ ukazuje na to da su epizode promjene ciklusa ugljika bile kratkotrajne, s trajanjem od samo nekoliko desetaka tisuća godina. No, kratki impulsi zahlađenja, uzrokovani vulkanski deriviranim sulfatnim aerosolima, možda su jednako štetni za ekosustave kao i globalno zatopljavanje? Kako bilo, povezivanje CAMP vulkanizma s okolišnim i biološkim promjenama na granici T-J danas je potkrijepljeno brojnim stratigrafskim, geokronološkim, geokemijskim i paleontološkim dokazima.

## 2.6. Masovno izumiranje krajem perma (PT izumiranje)

Permo-trijaski „događaj“ (engl. PT event; PT mass extinction) predstavlja najozbiljniju krizu života na Zemlji zabilježenu u sedimentnom i fosilnom zapisu, koja je kulminirala spektakularnim izumiranjem krajem perma (prije 252 milijuna godina). U oceanima je izumiranje bilo ogromno i izuzetno neselektivno. Izumrle su gotovo sve vrste iz grebenskih ekosustava u kojima dominiraju vapnenačke spužve i alge, kao i i većina dominatnih vrsta iz okoliša tropskih karbonatnih platformi (brahiopodi, koralji, foraminifere), a izumrli su i organizmi sa silicijskim skeletima (spužve i radiolarije). Oceanski organizmi bez skeleta, kao što su npr. morski crvi i morski krastavci, ne ostavljaju fosilni (skeletni) zapis, ali u sedimentima ostaju njihovi tragovi (ihnofosili). Ihnofosili također naglo nestaju u ranotrijaskim sedimentima, što ukazuje na naglo izumiranje i neskeletalnih organizama. Na kopnu su izumiranja bila podjednako katastrofalna kao i ona u oceanima. Nestale su mnoge skupine kukaca, kao i velikih predatora i biljojeda. Kopnene biljne zajednice pretrpjele su vjerojatno najveću krizu u Zemljinoj povijesti. Stabla golosjemenjača su bila dominantna u šumama toga doba, s Glossopterisom kao najpoznatijim predstavnikom u višim zemljopisnim širinama i s njegovim ekvatorijalnim ekvivalentom Gigantopterisom. S nestajanjem tih šuma, nestaju i velika ležišta ugljena, koja se neće više formirati u sljedećih 15-20 milijuna godina. Neposredno nakon izumiranja dolazi do širenja gljivičnih spora i polena, koje ubrzo zamjenjuju mahovine. Što je uzrokovalo ovo masovno izumiranje? Pokušaji povezivanja s impaktom meteorita nisu bili uspješni. Velike površine izljeva bazalta na području današnjeg Sibira, tzv. Sibirske zamke (engl. Siberian Traps), koji su eruptirali u vrijeme PT krize, mogući su uzrok. No, jedno je naglašavati slučajnost, a drugo pak povezivati dvije vrlo različite geološke pojave. Razmotrimo stoga dostupne podatke. Vulkanske erupcije izbacuju razne plinove, a najviše CO<sub>2</sub> i SO<sub>2</sub>. Njihov utjecaj na svjetsku klimu bitno se razlikuje: CO<sub>2</sub> je staklenički plin s efektom zagrijavanja koji traje i tisućama godina, dok SO<sub>2</sub> uzrokuje hlađenje u samo nekoliko godina prije nego što padne u obliku kisele kiše. Ispuštanje plina erupcijama Sibirskih zamki samo po sebi ne bi bilo smrtonosno, ali uz plinove ispuštene iz ugljena i evaporita koji su „kuhani“ eruptirajućom magmom, masovno

izumiranje čini se vrlo izglednim. Nedavno otkriće fosilnih vulkanskih pepela (indikativnih za izgaranje ugljena ispod lame) u gornjopermskim sedimentima ukazuje da je taj proces možda znatno povećao emisiju CO<sub>2</sub>.

No, čak i uz potpuno razumijevanje mehanizma gigantskog vulkanizma kao što su Sibirske zamke, još smo daleko od spoznaje kako emisije plinova uzrokuju štetu u okolišu, dovoljno ozbiljnu da pokrene katastrofu kao što je bila ona krajem perma. Geološki dokazi ukazuju na to da je kriza bila povezana sa zatopljavanjem i širenjem anoksije u morima, dok se moguće zakiseljavanje oceana tek odnedavno razmatra kao potencijalna opasnost tadašnjem morskom životu. Na kopnu je pak mehanizam izumiranja još zagonetniji. Emisije SO<sub>2</sub> mogu izazvati kratkoročno hlađenje, što je vjerojatno i bio jedan od čimbenika izumiranja na sjevernoj hemisferi. Globalno uništavanje biljnih zajednica ukazuje na atmosferske probleme kao što je npr. oštećenje ozonskog omotača. Sibirskim vulkanizmom je tako možda ispuštena i značajna količina halogenih spojeva koji uništavaju ozon, koja uz one poznatije vulkanske plinove, predstavlja vrlo poguban „koktel“.

## **2.7. Masovno izumiranje krajem devona (FF izumiranje)**

Kasnodelonsko masovno izumiranje na granici katova frana i famena (FF masovno izumiranje, datirano na 376 milijuna godina) dogodilo se tijekom nekoliko milijuna godina, s nizom impulsa izumiranja tijekom najmlađeg frana. Glavni grebenotvorci (koralji i stromatoporoidi) su tada najviše stradali. Od ostalih morskih beskralješnjaka, 70 % svojti nije preživjelo taj događaj, uključujući trilobite, brahiopode, amonite i briozoe, ali i konodonti, ribe beščeljusnice i plakoderme. Kopneni okoliši su bili pod relativno manjim utjecajem. Ekstraterestrički impakti, te oceanografske i klimatske promjene, koji su predloženi kao uzroci ovoga masovnog izumiranja, još uvijek se razmatraju. Mogući impakt blizak FF masovnom izumiranju (377-378 milijuna godina) je Siljan Ring u Švedskoj, krater promjera 65-75 km. No, ovaj relativno mali impakt ne može objasniti niz impulsa izumiranja tijekom najmlađega frana, a iako se pretpostavlja još nekoliko impakata, oni do danas nisu potvrđeni. Štoviše, izotopni podatci ne ukazuju na veliki meteorski impakt tijekom najmlađega frana. Uloga vulkanizma i njegova potencijalnog utjecaja na kasnodevonsku klimu nije detaljno proučavana. Takozvane Viluy zamke u istočnom Sibиру predložene su kao potencijalno istovremene s kasnodevonskim masovnim izumiranjem, ali preliminarno datiranje pokazuje njihovu starost od oko 370 milijuna godina, što je 3-4 milijuna godina kasnije od FF masovnog izumiranja. Promjene u oceanografskom i klimatskom sustavu relativno su dobro dokumentirane za ovaj kritični interval. Najpoznatiji je facijes crnih škriljavaca, koji se talože tijekom najmlađega frana (tzv. Donji

Kellwasser događaj) i na granici frana i famena (tzv. Gornji Kellwasser događaj) te ukazuju na anoksične do euksinske uvjete u oceanu. Nekoliko događaja pridonijelo je povećanju unosa hranjivih tvari i eutrofikaciji oceana: pojačano trošenje zbog uzdizanja tijekom Eovariscičke orogeneze, evolucija kopnenih biljaka i unos fosfora iz vulkanskih pepela. Današnje spoznaje stoga ukazuju na to da su periodična eutrofikacija, anoksija, promjene globalnog ciklusa ugljika i klimatske promjene mogli imati značajan utjecaj na taksonomsku raznolikost u kasnom devonu.

## **2.8. Masovno izumiranje krajem ordovicija**

Kraj ordovicija obilježavaju ubrzana izumiranja, istodobno s razvojem novih vrsta, što završava Velikim Ordovicijskim Biodiverzifikacijskim Događajem (engl. Global Ordovician Biodiversification Event - GOBE) kada je uspostavljena bioraznolikost koja je trajala do kraja paleozoika. U moru je izumrlo oko 20 % familija, 40 % rodova i 85 % vrsta. Masovno izumiranje sastoji se od dva događaja. Prvi se dogodio u ili neposredno prije početka hirnantiana (*Normalograptus extraordinarius* graptolitna zona) i obuhvatio je uglavnom bentosne organizme u dubokovodnim i plitkovodnim okolišima, a nešto manje organizme srednje dubokih voda, te graptolite. Jedan od predloženih mehanizama izumiranja je i glacijacijom inducirano hlađenje, pad morske razine i kemijsko recikliranje u oceanima. Drugo masovno izumiranje zabilježeno je u srednjem hirnantianu (*Normalograptus persculptus* graptolitna zona) te je povezano s velikim podizanjem morske razine i oceanskom anoksijom koja obilježava kratak događaj zatopljavanja. Izumiranja su manje selektivna i zahvaćaju faune vodenih okoliša različitih dubina, ubijajući uglavnom organizme preživjele pri prvom izumiranju. Izumiranjima je dramatično smanjen broj biogeografskih provincija. Unatoč povećanju spoznaja o klimi u ordoviciju, još ne postoji konsenzus o tome kako su klimatske promjene izravno utjecale na globalni biodiverzitet. Druga dva moguća mehanizma masovnog izumiranja također se oslanjaju na ograničavanje ili uništavanje staništa. Prvo, globalni pad morske razine (oko 100 m) tijekom formiranja hirnantijanskih ledenih pokrova smanjio bi šelfna područja i time povećao pritisak na nastanjuće prostore vanjskog šelfa. Drugo, amalgamacija mikrokontinenata tijekom kaledonske orogeneze također bi smanjila područje šelfa, a time i staništa. Kako bilo, glacijacija se ipak čini „dovoljnim“ uzrokom za objašnjenje hirnantijanskog masovnog izumiranja, bez prizivanja „u pomoć“ impakata ili vulkanizma.

### **3. ZAKLJUČAK**

Zahvaljujući paleontologiji, sedimentologiji, geokemiji i preciznom datiranju, jasno se mogu uočiti zapisi o svih pet masovnih izumiranja. Ništa ne ukazuje na jedan trenutni događaj koji je povezan s masovnim izumiranjem i naglim promjenama u okolišu. Svaki od njih ukazuje na dulje razdoblje pojačanog stresa prije i nakon masovnih izumiranja, a tri događaja sastoje se od više faza izumiranja (PT izumiranje, kasnodevonsko FF izumiranje te izumiranje krajem ordovicija), koji su odvojeni vremenskim razmacima i od nekoliko stotina tisuća godina. Obrasci izumiranja su različiti i ponekad više utječe na život u moru nego na kopnu, ali su uvijek selektivni i pretežno usmjereni na skeletne organizme koji ovise o izlučivanju kalcijevog karbonata. No, nijedan uzrok nije dominantan. Trenutno dostupni podatci ukazuju na to da je glavni uzrok izumiranja ipak masivni vulkanizam (velike magmatske provincije), koji je povezan s četiri od pet masovnih izumiranja. Impakti su mogli uzrokovati uništavanje okoliša gotovo podjednako kao i vulkanizam. Ako su oba uzroka „istovremena“, kao kod KT masovnog izumiranja, masovno izumiranje može biti još više pojačano (npr. otpuštanjem velike količine CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> i drugih plinova u atmosferu, koji bi potom uzrokovali kisele kiše i zakiseljavanje oceana, uništavanje ozonskog omotača i promjene klime). Neki ili svi efekti su uočeni (ili se pak nagađa da su se dogodili) tijekom svih pet masovnih izumiranja. No, najmanje jedno masovno izumiranje (ono krajem ordovicija) ne može se povezati s impaktima ili vulkanizmom, ali ukazuje na to da su velike klimatske promjene očito dovele do oceanske anoksije i dvije faze izumiranja.

### **4. LITERATURA**

#### **4.1. Objavljeni radovi**

1. Bartolini A., Guex J., Spangenberg J., Taylor D. Schoene B., Schaltegger U., Atudorei V. 2012. Disentangling the Hettangian carbon isotope record: implications for the aftermath of the end-Triassic mass extinction. *Geochemistry, Geophysics and Geosystems* 13: 1-11.
2. Chenet A.-L., Quidelleur X., Fluteau F., Courtillot V. 2007. 40K/40Ar dating of the main Deccan large igneous province: further evidence of KTB age and short duration. *Earth and Planetary Science Letters* 263: 1-15.
3. Gradstein F., Ogg J., Smith A. 2004. *A Geologic Time Scale*, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 598 pp.

4. Keller G. 2005. Impacts, volcanism and mass extinctions: random coincidence or cause & effect? Australian Journal of Earth Sciences 52: 725-757
5. Kerr A.C. 2005. Oceanic LIPs: The kiss of death. Elements 1: 289-292.
6. Keller G. 2011. KT Mass Extinction in marginal and open marine environments: Texas and Tunisia. In: Keller G. & Adatte T. (eds.) SEPM Special Publication 100: 197-226.
7. Malvić, T. (1992): Vulkani. ABC tehnike, 12, 116-118.
8. Malvić, T. (2013): Oblikovanje nebeskih tijela i njihove geološke građe s obzirom na veličinu zvjezdanoga sustava / Oblikovanje Zemljine atmosfere i hidrosfere tijekom intenzivnih udara meteorita (postanak oceana). HGLJŠ, knjiga predavanja (ur. Velić J. Velić, I., Malvić, T.), 1-14.
9. Pálfy J., Zajzon N. 2012. Environmental changes across the Triassic-Jurassic boundary and coeval volcanism inferred from elemental geochemistry and mineralogy in the Kendlbachgraben section (Northern Calcareous Alps, Austria). Earth and Planetary Science Letters 335: 121-134.
10. Schoene B, Guex J, Bartolini A, Schaltegger U., Blackburn T.J. 2010. Correlating the end-Triassic mass extinction and flood basalt volcanism at the 100 ka level. Geology 38: 387-390.

#### 4.2. Mrežne poveznice

Poveznica 1: <http://www.massexinction.princeton.edu.html> (10. IV. 2017.)

Poveznica 2: <https://www.geolsoc.org.uk/Geoscientist/Archive/November-2012/Volcanism-impacts-and-mass-extinctions-2> (10. IV. 2017.)

Poveznica 3: <http://gkeller.princeton.edu/deccan-volcanism> (10. IV. 2017.)

Poveznica 4: <https://www.geolsoc.org.uk/Geoscientist/Archive/July-2013/Soapbox-The-LIPs-have-it#> (10. IV. 2017.)



## IZUMIRANJE NA GRANICI KREDE I PALEOGENA S PRIMJERIMA IZ HRVATSKE

Ivo VELIĆ

Danas se općenito smatra da je globalno izumiranje oko 75% živućih vrsta na Zemlji krajem krede, na K/T\* granici bilo posljedica tzv. impakta, tj. udara jednoga svemirskog tijela, asteroida ili kometa, na području današnjega poluotoka Yucatan u Meksiku (**slika 1**). Međutim, put istraživača i znanstvenika do te spoznaje bio je dug i mukotrpan, praćen mnogobrojnim osporavanjima, kontroverzijama, omalovažavanjima, podcjenjivanjima, znanstvenom ljubomorom i zavišću. Stoga, treba odati priznanje auktorima toga epohalnoga otkrića.



*Slika 1: Jedna od vizualnih prepostavka udara na Yukatanu prije 66 MG*

Odavno je poznato da je Zemlja u svojoj geološkoj povijesti bila izložena kontinuiranim udarima svemirskih tijela različitih veličina od manjih planeta preko asteroida, kometa i meteorita do najsitnijih „kozmičkih sferula“, tj. svemirske prašine; ove posljednje se svake godine skupi i do 30 000 tona. Ideju o povremenim razornim udarima na Zemlju iznio je američki astrofizičar R. Baldwin 1942. godine člankom u novinskome časopisu *Popular Astronomy* jer mu ga nije htio prihvatići niti jedan znanstveni časopis.

Rijetki su znanstvenici to prihvaćali. Među prvima je javno bio paleontolog M. W. DE LAUBENFELS (1956). Pozivajući se na posljedice udara sibirskoga meteorita 1908. godine iznosi mogućnost planetarnoga udara koji je uzrokovao izumiranje dinosaura.

\**U starijim stratigrafskim podjelama postojao je sistem „tercijar“ i zbog toga se je zadržao simbol K/T za ovu granicu; tercijar je kasnije podijeljen na dva sistema – paleogen i neogen čime je nestao iz sustava stratigrafskih jedinica. K/T granica dijeli i dvije geološke ere – mezozoik i kenozoik.*

Klupko zagonetki oko svemirskih udara počelo se je značajnije odmotavati pedesetih godina 20. stoljeća kad na „udarnu scenu“ stupa mladi geolog Eugene Shoemaker (**slika 2a**) posjetom Meteor krateru u Arizoni (**slika 2b**). I u idućima se je godinama sa skupinom suradnika uhvatio proučavanja kratera ne-vulkanskoga podrijetla. U Meteoru je otkrio usitnjene silikate i magnetit što je bio nepobitan dokaz o udaru iz svemira. Zaključio je da asteroidi predstavljaju veliku opasnost, veću nego što je itko može zamisliti ponajviše što su nam razmjerno blizu – u pojasu između Marsa i Jupitera (BRYSON, 2003). Tijekom šezdesetih godina prošloga stoljeća radio je u programu Apollo, podučavao astronaute geologiji i umijeću uzimanja uzoraka na Mjesecu.



*Slika 2: a) Eugene Shoemaker*

*b) Krater Meteor*

U sedamdesetima, dok se je Shoemaker bavio asteroidima i upozorenjima o njihovoj opasnosti, njegov kolega geolog Walter Alvarez bio je na terenskim istraživanjima dubokomorskih nasлага u Umbriji, nedaleko od mjesta Gubbio, u klancu pod prijevojem Bottacione (**slika 3a**). Unutar slijeda tanko slojevitih vapnenaca isticao se je proslojak crvenkaste gline (**slika 3b**) debo svega 6 mm. Znalo se je da je ta gлина na K/T granici, tj. na granici između mastrichta i paleocena. U pomoć W. Alvarezu priskočio je njegov otac Luis (nuklearni fizičar i nobelovac; **slika 4**) i poslao uzorke gline iz Gubbia kolegi kemičaru F. Asaro-u u Lawrence Berkley laboratorij. Laboratorijskim analizama utvrđena je enormna količina minerala svemirske provenijencije, među kojima prvenstveno iridija, 500 puta veća od najveće na Zemlji. To ih je uvjerilo da izumiranje dinosaura nije trajalo milijunima godina već praktično odjednom u jednom eksplozivnom događaju, a to je bio udar nekoga svemirskoga tijela.



Slika 3a: Mjesto K/T granice kod Gubbija

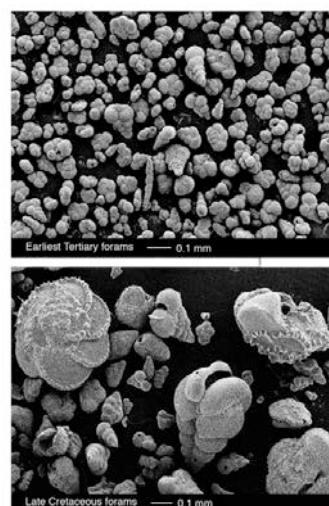


b) Detalj s proslojkom gline s iridijom

Alvarezi su početkom 1980. godine u *American Association for the Advancement of Science* obznanili spomenute rezultate istraživanja o masovnome izumiranju na K/T granici. Iste godine su u jednom od dva najprestižnija svjetska znanstvena časopisa, „*Science*“ (drugi je britanski „*Nature*“) objavili rad o tome otkriću (ALVAREZ i dr., 1980).



Slika 4: Luis i Walter Alvarez kod Gubbija

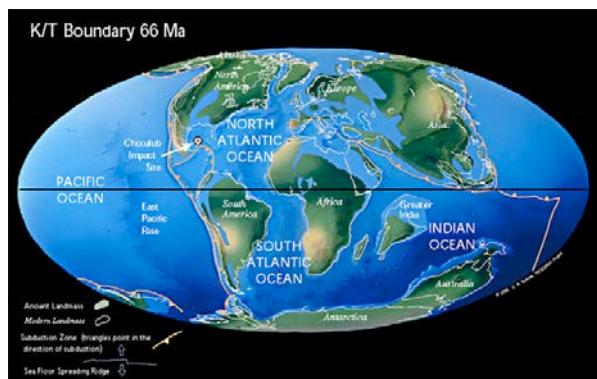


Slika 5: Pučinske foraminifere mastrihta (dolje) i paleocena(gore)

Očekivano, reagiranja stručnih i znanstvenih krugova su bila od blagoga prihvaćenja, preko nevjericice do paleontološkoga stajališta o nečuvenoj herezi. Na to se je duhovito osvrnuo Asaro:...“ Morate znati da smo mi u tome području bili amateri – Walter je doduše geolog, ali paleomagnetičar, Luis fizičar, a ja nuklearni kemičar. I onda objavimo paleontolozima da smo im riješili problem kojim se bave više od sto godina pa nije čudno da to nisu odmah prihvatili“. Luis Alvarez je u šali dodao:“ Uhvatili su nas da se bavimo geologijom bez njihove dopusnice.“ Oglasio se je i Shoemaker izjavivši da je udar za većinu geologa u suprotnosti s njihovom znanstvenom religijom, a Luis Alvarez je bio i držak: “Paleontoloz zaista nisu znanstvenici – sličniji su skupljačima maraka“. Više nego bezobrazna primjedba, ta

zar De Laubenfels nije prvi predpostavio izumiranje dinosaura zbog planetarnoga udara? A tko je u Gubbiu odredio K/T granicu? Paleontologinja Isabella Premoli Silva!!! Na temelju analiza i odredaba pučinskih foraminifera (**slika 5**).

Usprkos silnim osporavanjima Alvarezi ne posustaju i traže mjesto udara. Imali su dosta sreće. Nakon nekoliko neuspjelih pokušaja na različitim mjestima u USA njihov suradnik Alan Hildebrand sa Sveučilišta Arizona doznao je od jednoga teksaškoga novinara da zna za veliku prstenastu strukturu široku 193 km i duboku 48 km u Chicxulubu kod grada Progreso na poluotoku Yucatán u Meksiku. Otkrila ga je meksička naftna kompanija Pemex. U njemu je nataloženo oko 3000 m mlađih kenozojskih vapnenaca. Kasnija istraživanja potvrdila su da je krater Chicxulub uistinu mjesto udara prije 66 MG (**slike 6 i 7**).



*Slika 6: Paleogeografska skica Zemlje na K/T granici*



*Slika 7: Mjesto udara na Yucatanu, krater Chicxulub promjera 193 km, dubine 48 km*

Međutim, ni to postignuće nije bilo opće prihvaćeno. Prigovora je bilo svakavih, a najveći je bio sažet u pitanju: "Zašto bi objekt širok samo 9,5 km izazvao takav kaos na Zemlji, planetu koji ima promjer gotovo 13 000 km?". Ali uskoro se ukazala prigoda za prirodni test udara. Naime, Shoemaker i Levy otkrili su komet nazvan *Shoemaker-Levy9* koji se je približavao Jupiteru, što je praćeno pomoću Svemirskoga teleskopa Hubble. U očekivanju toga sraza bilo je posprdnih primjedaba od astronoma poput: "da će Jupiter progutati komet, a da se neće ni podrignuti" do časopisa *Nature* s člankom „Stiže nam Veliki fijasko“.

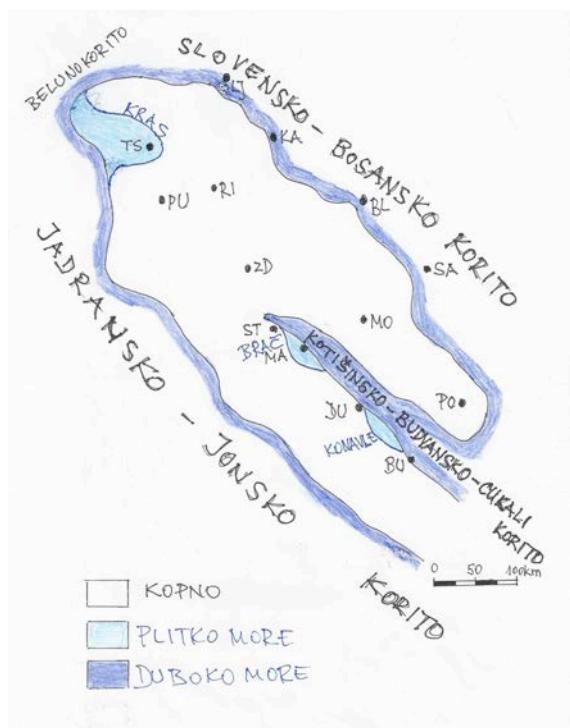
U srpnju 1994. godine udari kometa trajali su tjedan dana i bili su jači od najoptimističnijih očekivanja. Samo je Shoemaker predvidio enormnu jačinu udara. A bio je takav da je samo jedan fragment, veličine „omanje planine“ (npr. veličine Kozjaka ili Mosora) napravio na površini Jupitera rupu veličine Zemlje. Udario je snagom od oko 6 milijuna megatona sedamdeset puta jačom od svega postojećeg Zemaljskoga nuklearnog naoružanja. Taj je događaj bio završni udarac kritičarima otkrića Alvarezovih.

Luis Alvarez umro je 1988. godine prije otkrića kratera *Chicxulub* i *Shoemaker-Levy 9* kometa. Eugene Shoemaker poginuo je na treću obiljetnicu kolizije na Jupiteru u prometnoj nesreći u pustinji Tanami u Australiji u potrazi za neotkrivenim kraterima. Dio njegovoga pepela poslan je na Mjesec, ostatak raspršen oko Meteor Kratera.

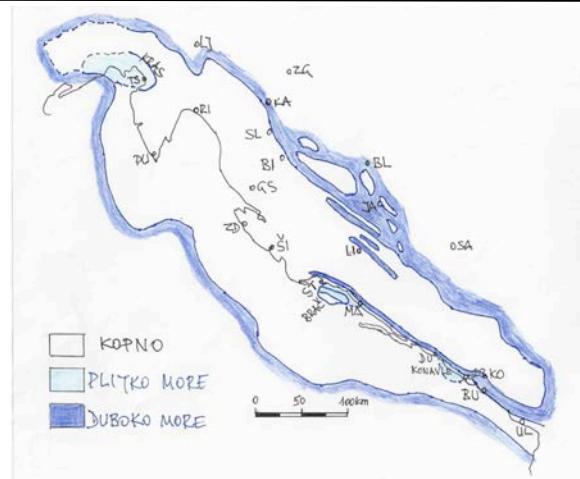
### **A kakav je trag ostavio udar na K/T granici u Hrvatskoj?**

Do udara je Krško područje Dinarida tijekom jure i krede bilo u sastavu Jadranske karbonatne platforme (JKP; VELIĆ, 2000) slične današnjoj Bahamskoj platformi (*Great Bahama bank*) s prevladavajućim plitkomorskim okolišima taloženja. Međutim, već su se od sredine cenomana bile uočavale tendencije dezintegracije Platforme.

Prema kraju krede ona je postupno okopnjavala pa je na K/T granici preko 95% njezine površine bilo kopno (**slika 8**), podložno djelovanju atmosferilija, prvenstveno eroziji. U takvim okolnostima nemoguće je bilo da tragovi i posljedice udara ostanu sačuvani. Osim toga JKP je paleogenskom i neogenskom tektonikom znatno poremećena i u odnosu na njezine dimenzije krajem krede sužena je, po osi jugozapad – sjeveroistok, za oko 35% (**slika 9**).



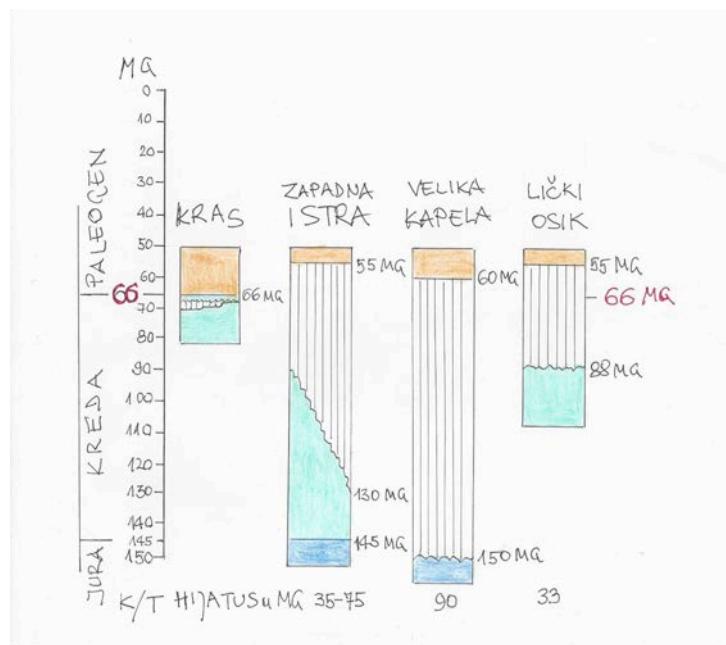
**Slika 8:** Paleogeografska skica JKP u vrijeme udara prije 66 MG



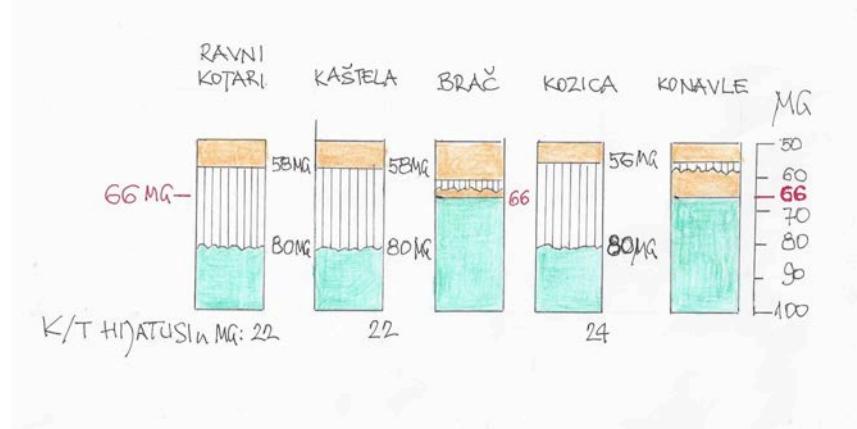
**Slika 9:** Paleogeografska skica JKP na K/T granici u današnjem geografskom položaju i dimenzijama

Paleogensko more je u mlađem paleocenu i eocenu transgrediralo na okršeni kredni paleoreljeff. Taložili su se paleogenski plitkomorski Foraminiferski vapnenci, rijetko konglomerati i kalkareniti pretežito na gornjokrednim Rudistnim vapnencima, a mjestimice i na starijim krednim ili čak i na gornjojurskim karbonatima.

Na najvećem dijelu Krških Dinarida, na granici između krede i paleogena utvrđene su stratigrafske praznine (hijatusi), tj. kopneno razdoblje s erozijom i mjestimičnim taloženjem boksita, u trajanju od 22 MG (u Ravnim kotarima) do 90 MG (u Velikoj Kapeli) (**slika 10 i 11**).



**Slika 10:** Granica K/T na nekim mjestima u sjeverozapadnom dijelu JKP



**Slika 11:** Granica K/T u središnjem i jugoistočnom dijelu JKP

Ipak, na tri mesta do kraja krede zadržalo se je plitko more s kontinuiranom karbonatnom sedimentacijom i na K/T granici. To su današnji slovenski Kras (JURKOVŠEK i dr., 2013) i tršćanski Carso, (CARULLI, 2006), zatim sjeverni dio otoka Brača (**slika 12**) (GUŠIĆ i JELASKA, 1990) i Konavle (**slika 13**) (PRTOLJAN i dr., 2012). K/T granica je detaljnije istražena samo na otoku Braču (KORBART i dr., 2017; **slika 14**).



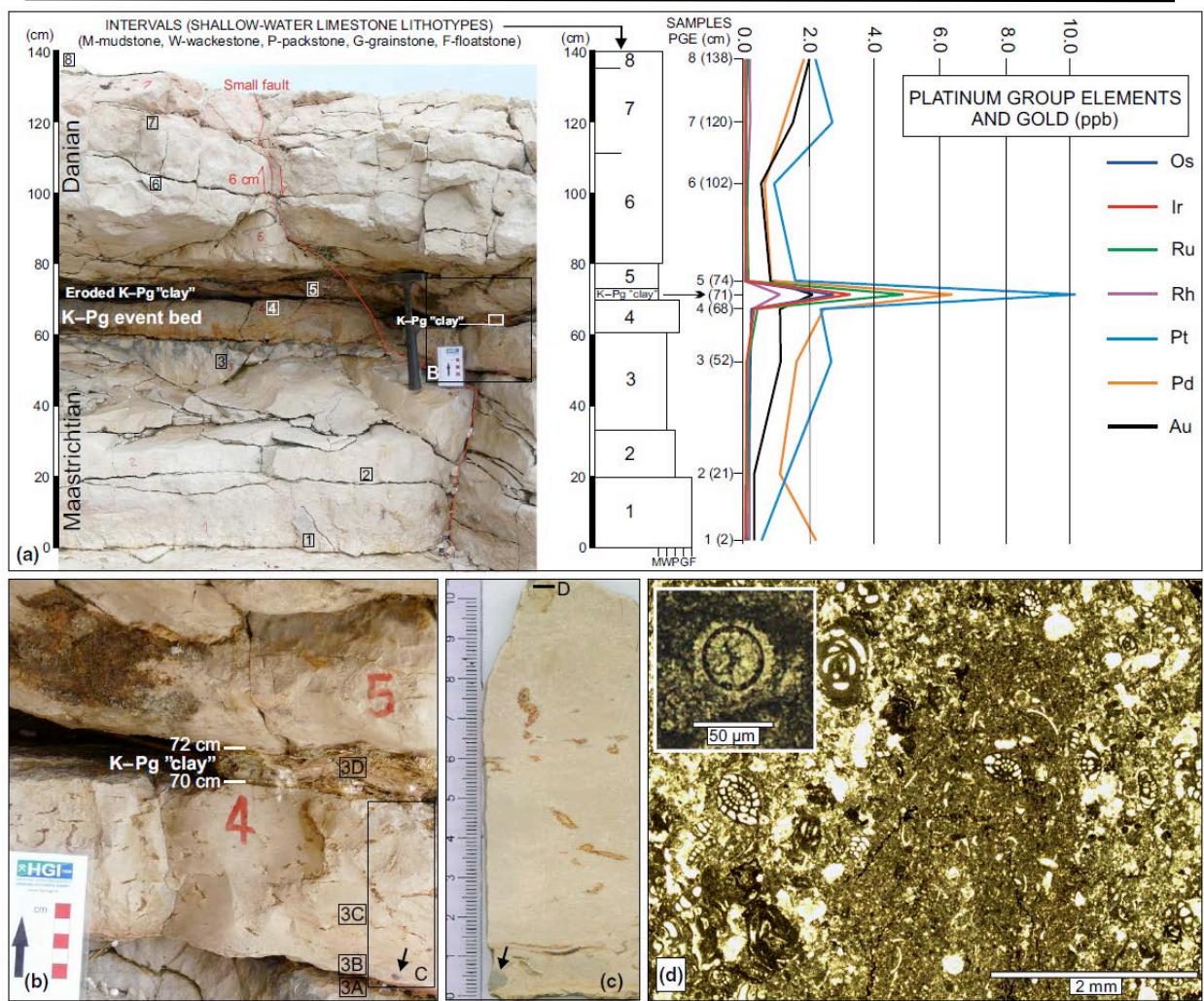
**Slika 12:** Kontinuirana granica K/T

u uvali Likva na Braču



**Slika 13:** K/T granica je u vapnencima na

Ilijinu brdu u Konavlima



*Slika 14: Detalj s granice K/T u Likvi prema KORBAR i dr. (2017)*

S druge strane, u dubokomorskim okolišima koji su okruživali JKP (slika 8), u pelagičkim vapnencima i klastitima sigurno su sačuvane posljedice udara u vapnencima ili klastitima (glinama, šejlovima, laporima) s istaloženim česticama iridija i drugih „svemirskih“ elemenata. Nažalost u Hrvatskoj nema otkrivenih profila ili izdanaka s K/T granicom u takvim pelagičkim facijesima poput onih kod Gubbia da bi se centimetar po centimetar moglo istraživati i uzorkovati tu granicu. I na hrvatskome ozemlju, gdje ima dubokomorskih naskaga iz vremena udara, sjeverno i istočno od Karlovca, kao i u podmorju, prekriveni su mlađim naslagama i nedostupni su istraživanju. A ako negdje i jesu na površini s obzirom na litologiju - pretežito klastite i/ili pločaste vapnence unutar klastita, obično su pokriveni humusom, travom i drugim niskim raslinjem.

## LITERATURA

- ALVAREZ, L. W., ALVAREZ, W., ASARO, F. & MICHEL, H. V. (1980): Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction.- *Science*, 208, 1095-1108.
- BRYSON, B. (2003): A short history of nearly everything; Kratka povijest gotovo svega.- Biovega, Zagreb, 2005., 516 str.
- CARULLI, G.B. (2006): Carta geologica del Friuli Venezia Giulia (1:150 000) e Note illustrative.- Regione autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione centrale ambiente e lavori pubblici, servizio geologico, 44 p.
- DE LAUBENFELS, M. W. (1956): Dinosaur extinction: one more hypothesis.- *Journal of Paleontology*, 30/1, 207-212.
- GUŠIĆ, I. & JELASKA, V. (1990): Stratigrafija gornjokrednih naslaga otoka Brača u okviru geodinamske evolucije Jadranske karbonatne platforme.- Djela JAZU, Zagreb, 69, 160 str.
- JURKOVŠEK, B., CVETKO-TEŠOVIĆ, B. & KOLAR-JURKOVŠEK., T. (2013): Geologija Krasa.- Geološki zavod Slovenije, 205 str.
- KORBAR, T., MCDONALD, I., |PREMEC-FUČEK, V., FUČEK, L. &| POSILOVIĆ, H. (2017): Post-impact event bed (tsunamite) at the Cretaceous– Palaeogene boundary deposited on a distal carbonate platform interior.- *Terra Nova*, 29, 135–143.
- PRTOLJAN, B., VLAHOVIĆ, I. & VELIĆ, I. (2012): Osnovna geološka karta 1:50 000, Konavle.- Hrvatski geološki institut.
- VELIĆ, I. (2000): The Karst Dinarids: the Adriatic carbonate platform or carbonate pie up to 8000 m thick, built through the period of more than 200 millions of years.- Societa Geologica Italiana, Riassunti 80a Riunione Estiva, Universita di Trieste 2000, 452-455.



# ANTROPOCEN – EPOHA OBILJEŽENA TRAJNIM UTJECAJIMA ČOVJEKA

Josipa VELIĆ i Zlatko ŠPOLJAR

„Premda je lijepo zamišljati da je postojalo vrijeme kad je čovjek živio u skladu s prirodom, nije posve sigurno da je to ikada bila istina“ (E. Kolbert)

## 1. UVOD

U geologiji se koriste brojni sustavi jedinica. Zovu se **stratigrafske klasifikacije**, od kojih se najčešće rabe geokronološka, kronostratigrafska, biostratigrafska i litostratigrafska. Njihov cilj je definirati sustav pomoću kojega se može dati slijed dokumenata i zbivanja ujednačeno za svako područje kao i za Zemlju u cjelini. Jedinice se razlikuju prema okomito jasno omeđenim stjenskim cjelinama koje su redovito karakterizirane **provodnim fosilima** (moguće samo ako se radi o sedimentima), odnosno **apsolutnim starostima** na osnovi radiometrijskih rezultata mjerjenja stjenskih uzoraka pogodnih za takva mjerjenja (osobito magmatske i metamorfne stijene). U zadnje se vrijeme spominje još jedan sustav jedinica primjerena današnjici, tj. spoznaji o nepovratnom utjecaju ljudi na Zemlju. To je **tehnostratigrafski** sustav kao mogući sustav temeljen na ubrzaju geoloških procesa i raznolikosti **tehnofosila**.

Prema IUGS-u (Međunarodna unija geoloških znanosti) koja radi na definiranju geološke vremenske skale (**geokronološke-eon**, era, period, **epoha**, *age*; i **kronostratigrafske-eonotem**, eratem, sistem, **serija**, *stage*) (*International chronostratigraphic chart, 2016/12*) Svijet odnosno Zemlja je u **holocenu** koji je počeo prije 11 700 godina. No, neki znanstvenici tvrde da je ta epoha završila i da je nastupila nova epoha **antropocen**.

Tema o antropocenu je vrlo kompleksna . Prema terminu koji se obrađuje isključivo je geološka, a prema podatcima koji se koriste za obrazloženje odnosi se velikim dijelom i na ekologiju, poglavito na ekosustave. U tome su suglasna dvojica znanstvenika od kojih je ideja i potekla (CRUTZEN & STOERMER, 2000). **Geologija** je znanost o građi, dinamici i razvitku Zemlje (Herak, 1984). **Ekologija** je prirodna znanost koja proučava odnose među živim organizmima, njihov utjecaj na okoliš u kojem obitavaju, te utjecaj tog okoliša na njih. Iako se razvila kao grana biologije, ekologija se koristi i znanjima iz kemije, fizike, matematike te geologije. Riječ dolazi iz grčkog *oikos*- dom, mjesto za život i *logos*- znanost. **Geoekologija** proučava prostornu izmjenjivost sredine, tj. na Zemlji, promjene izazvane ljudskom djelatnošću,

a između ostalog pomaže pri prognoziranju promjena u budućnosti. Važan predmet geokologije je problem onečišćenja i zaštita od onečišćenja okoliša, te sanacija degradiranog područja (**poveznica 1**). Iz ovih kratkih definicija je razvidna izrazita isprepletenost geologije i znanosti o ekosustavima.

Temeljna postavka ili činjenica jest da su posljedice i utjecaji ljudi na okoliš sve jači i očitiji. Industrijalizacija i brzi razvoj tehnologije u izravnoj su korelaciji s porastom broja stanovnika što se izražava rastućom potrebom potrošnje od hrane do kovina.

Ostaje li „**trajan potpis**“ ljudskih aktivnosti u slojevima (sedimentima)? Jesu li te promjene kao što ih ostavljaju ogromne erupcije vulkana, iznenadne epidemije, nuklearni ratovi svjetskih razmjera, udari asteroida, novo ledeno doba ili stalno sve jače „pljačkanje“ Zemlje utisnute u sedimentima-slojevima na cijelom Svijetu takvi da ljudska vrste postaje najveća geološka sila ostavljajući zapise za sljedećih više desetaka tisuća ili milijune godina? Je li taj učinak usporediv s posljedicama otapanja ledenjaka na kraju pleistocena? Je li moguće nekoliko stotina godina uvrstiti u geološku tablicu vremena? Javljuju se i nazivi **antropozoik** ili **psihozoik**. To su prema hijerarhiji jedinica **eratemi** jednako kao mezozoik trajanja 185 milijuna godina, odnosno paleozoik trajanja 290 milijuna godina (**poveznica 2**). Ima li to smisla?

Svi **službeni nazivi i podjele** na geološke jedinice različitoga ranga su jako dugo utemeljivani. Za to su postojale i postoje povjerenstva sa strogo određenim pravilima i metodama rada. Jedna od uloga ICS-a (*International Commission on Stratigraphy*) je utemeljiti zajednički globalni jezik za povijest Zemlje. Pri tome je važan aspekt da termini-izrazi u raspravama o intervalima geološkoga vremena imaju logičnu koncepciju i da su prikladni u definicijama diljem Svijeta te pogodni za primjenu na bilo kojem mjestu Svijeta. Zbog toga razloga postupno je razvijen niz međunarodnih podjela geološkoga vremena (*geological time scale*) na osnovi dogovora prema njihovoj uporabivosti i prikladnosti za globalne korelacije (usporedbe), precizno definirane i jedinstvene na temelju uporabe granica stratotipova i potvrđene od strane IUGS-a (*International Union of Geological Sciences*)

Kao primjer pogledajmo kako se razvijalo uvođenje serije/epohe holocena i od kada postoje ideje o utjecaju ljudi na Zemlju. Holocen je doba zadnjih 11 700 godina stabilne klime od posljednjega ledenog doba, tijekom kojeg se razvila ljudska civilizacija današnjice. Naziv „holocen“ (sadašnjost) za postglacijalnu geološku epohu tijekom proteklih 11 700 godina bio je predložio CH. LYELL 1833. a usvojen je na Međunarodnom geološkom kongresu u Bolonji 1885. Bilo je, dakle, potrebo 52 godine da se pojmom utemelji, usvoji i postane prihvatljiv za sve geologe Svijeta.

Značaj antropocena je da on **predstavlja drugačiji svekoliki sustav razvoja planeta Zemlja**. Čovječanstvo ima presudan utjecaj na stanje, dinamiku i budućnost Zemlje, rekao je

JAN ZALASIEWICZ, poljski i britanski geolog, profesor na Sveučilištu Leicester i predsjednik Radne skupine za antropocen (**slika 1**) koji je počeo djelovati još 2009. godine. Radna skupina ima 37 članova plus voditelj.



*Slika 1: Prof. dr. sc. Jan Zalasiewicz*

Odnosni članovi dolaze iz više od 14 država: od Velike Britanije do Kine, od Norveške do Južne Afrike, od Kanade do Australije. U njoj je i prof. dr. sc. DAVOR VIDAS, hrvatski znanstvenik (**slika 2**). Rođen je u Zagrebu 9. svibnja 1960. Redoviti je profesor u trajnom zvanju u Institutu Fridtjof Nansen u Oslu, Norveška. U posljednjih dvadesetak godina bio je glavni istraživač i voditelj petnaestak međunarodnih znanstvenih projekata iz raznih područja međunarodnoga prava, kao i organizator te predsjedavajući više međunarodnih znanstvenih konferencija o pravu mora u Norveškoj, Hrvatskoj i Velikoj Britaniji.



*Slika 2: Prof. dr. sc. Davor Vidas*

Geološka zajednica je složna da je za novu kronostratigrafsku jedinicu potreban **jasan, fosiliziran ljudski trag u svim mogućim pojavnostima, koji će biti uočljiv budućim geolozima.**

## 2. POVIJEST IDEJE

Tijekom holocena čovjekove aktivnosti postupno su postajale značajna geološko-morfološka sila što su znanstvenici zarana prepoznali. Tako je G. P. MARSH već 1864. objavio knjigu „Čovjek i priroda“, ponovno tiskanu 1964. godine kao „Zemlja oblikovana ljudskim

djelovanjem“. STOPPANI (1873) je ocijenio ljudsko djelovanje kao „novu zemaljsku silu koja se po snazi i univerzalnosti može usporediti s većim zemaljskim silama“ i već je tada govorio o **antropozojskoj eri**. Veliki ruski geolog V.I.VERNADSKY uvidio je 1926. rastuću snagu čovječanstva kao dijela biosfere pa navodi „...smjer u kojem procesi evolucije moraju napredovati prema rastućoj spoznaji i razmišljanju imaju sve veći i veći utjecaj na njegov okoliš...“. On, francuski isusovac P. TEILHARD DE CHARDIN i E. LE ROY skovali su 1924. izraz „**noosphere**“, svijet mišljenja, da bi označili rastuću ulogu koju igra snaga ljudske misli i tehnologije u oblikovanju njegove vlastite budućnosti i okoliša (preuzeto iz CRUTZEN & STOERMER, 2000).

Traje li taj utjecaj već tisućama godina ili će postati stvaran i jasan te uočljiv s početkom tek u budućnosti? Radi li se o tisućama ili milijunima godina? Pojam „antropocen“ je 1980. kao prvi spomenuo EUGENE F. STROEMER (rođen 7. ožujka 1934., umro 17. veljače 2012.), ekolog koji je proučavao slatkvodne dijatomeje (alge kremenjašice) u jezeru *Lake West Okoboji*, Iowa (**poveznica 3**), a 2000. PAUL J. CRUTZEN, nobelovac, atmosferski kemičar, koji se bavi se ozonskim rupama, ponovio je u Mexiku ideju za pojам „antropocen“. STROEMER je svojevremeno izjavio „Počeo sam rabiti izraz „antropocen“ 1980-tih, ali nije formaliziran dok me Crutzen nije kontaktirao“. Tek zahvaljujući velikom utjecaju nobelovca Crutzena pojma antropocen se počeo širiti diljem Sviljeta, ali bez formalne definicije.

Godine 2000. zajedno su P. CRUTZEN i E. STROEMER predložili u *IGPB NEWSLETTER*-u, da je čovječanstvo uvelo Svijet u novu geološku epohu „antropocen“ (**poveznica 4**). O tome je CRUTZEN (2002) objavio članak u časopisu „Nature“ te je ideja privukla veliku pozornost znanstvene zajednice, a odnedavno i šire javnosti.

PAUL JOZEF CRUTZEN (**slika 3**) rođen je 3. prosinca 1933. Po nacionalnosti je Nizozemac. Dobitnik je Nobelove nagrade za kemiju atmosfere. Najpoznatiji je po radovima o klimatskim promjenama i po popularizaciji termina „antropocen“ (**poveznica 5**).



*Slika 3: Akademik Paul Jozef Crutzen*

### 3. NEKE OD POJAVA I PROMJENA NASTALIH LJUDSKIM UTJECAJIMA

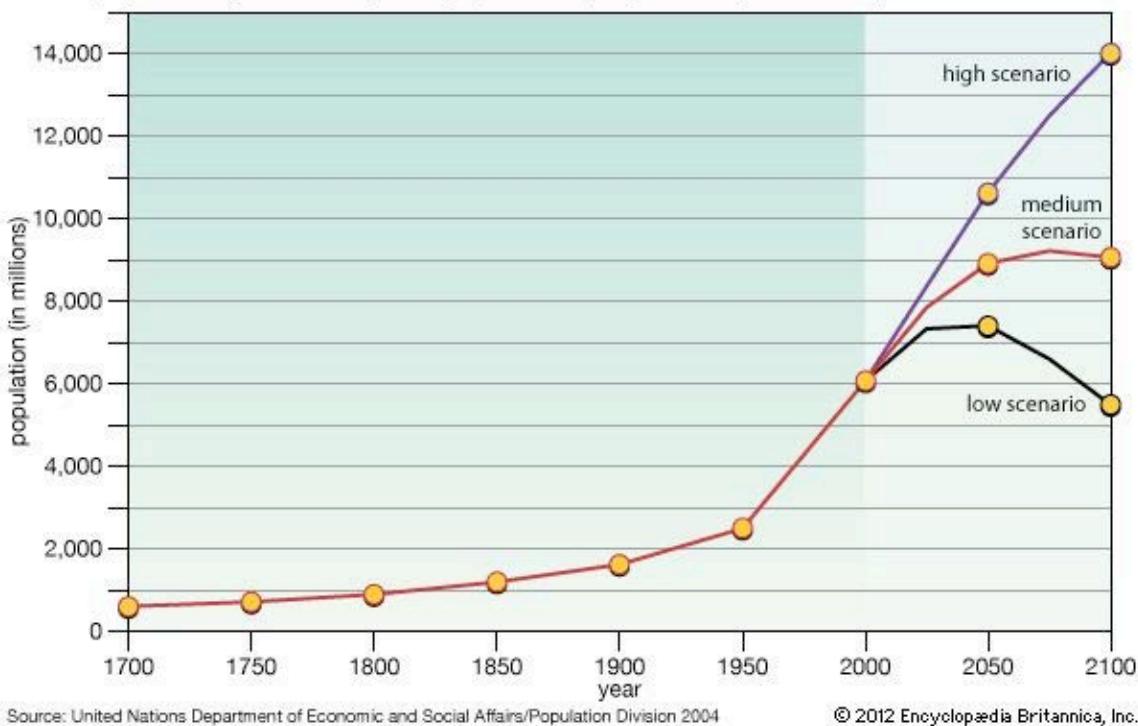
S obzirom na sve pojave što su ključne za možebitno uvođenje epohe antropocen kao službene geološke jedinice, izuzetno je važna činjenica da se ljudska populacija počela razmjerno naglo povećavati. Evo nekih podataka (WRIGHT, 2014). „*Na početku gornjega paleolitika bilo nas je možda tristotinjak tisuća, uvrh glave. Prije približno 10 000 godina uoči pojave poljoprivrede i nakon što smo se proširili svim naseljivim kontinentima, broj nam je porastao na gotovo 3 milijuna; prije 5000 godina kad se poljoprivreda stabilizirala u svim utemeljitelskim regijama, a u Sumeru i Egiptu se do kraja razvila civilizacija, brojnost nam je dosegla 15 i 20 milijuna diljem Svijeta. Po razmjerima posljedica, ni jedan ljudski izum ne može se mjeriti s poljoprivredom. Poljoprivredna revolucija rezultirala je posve novim načinom života koji je do danas ostao temeljem svjetske ekonomije (slika 4). Usjevi desetak drevnih naroda hrane 6 milijardi (danasa i 7) ljudi ma Zemlji (Bliski Istok pšenica, ječam, ali i ovce te koze; Daleki Istok-riža i proso; Srednja Amerika-kukuruz, mahunarke, buća, amaranta, rajčice; Andska regija-krumpir i ostalo gomolje, buća, pamuk, kvinoja i dr.“.*



**Slika 4:** Prizor jednostavne zemljoradnje u Indiji (**poveznica 6**) i današnji pejzaž suvremene obradbe zemlje u Hrvatskoj - Lika (foto J. VELIĆ)

Daljnje podatke o porastu broja ljudi iznijela je i poveća skupina autora u često citiranom radu ZALASIEWICZA i još 20 koautora (2008). Tu se navodi da je oko tisuće godine živjelo 300 milijuna, tisućupetstote 500 milijuna, a 1750. već 790 milijuna ljudi (**slika 5**).

### World population (1700–2000) and population projections (2000–2100)



Source: United Nations Department of Economic and Social Affairs/Population Division 2004

© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

**Slika 5:** Približan broj ljudi od 1700. do 2000. godine s procjenom do 2100. po tri scenarija (poveznica 7)

Povećanje broja ljudi postupno je dovelo do sve brže transformacije planeta Zemlja u mnogim aspektima. Oni se mogu načelno podijeliti na **fizičke, kemijske i biološke, no, pretežno se radi o njihovoj kombinaciji**. Valja naglasiti da se neki učinci vremenom gube, ali ima i onih koji ostaju trajniji; ostaju kao možebitni geološki „markeri“ antropocena za neke buduće geologe. Pitanje je o koliko godina se radi?

Prvo će biti riječi o tvarima, što je pretežno **fizički** aspekt učinaka, što su uvelike obilježile trajan ljudski trag/utjecaj na Zemlju, kako na zrak, tako i na vodu i tlo. Današnje tlo će postupno tijekom (geološkoga) vremena postati stijena i zahvaljujući zemljinoj dinamici dospjeti u dubinu ili biti izdignuto.

\*Ljudi su stvorili ili načinili što izravno što neizravno brojne **nove minerale** ili tvari kojih inače u prirodi nikada nije bilo. To su dugotrajni metali tzv. „**tehnofosili**“, često kao spojevi karbonata, silikata i oksida (**poveznica 8**). Do sada ih je identificirano 208 koji su uglavnom nastali pod utjecajem ljudskih aktivnosti. To je okruglo 4 % od ukupno do sada otkrivenih 5200 minerala službeno prihvaćenih od *International Mineralogical Association (IMA)*. Veći broj tih „umjetnih“ minerala potječe iz rudničkih stovarišta, ili su nastali i trošenjem šljake (troske), zatim po zidovima tunela, iz rudničkih voda i rudničkih podgrada ili pod utjecajem požara u rudnicima. Ima ih nastalih u procesima izradbe keramike, porculana (mulit je prisutan u

porculanu u obliku iglica) i cementa (etricit, hilebrandit, portlandit). Postali su najčešći na površini terena od sredine 20. stoljeća (**slika 6** i **slika 7**). Više o tome može se naći na stranicama s **poveznicom 8**.



**Slika 6:** Bijelo su filamenti mulita uokolo osumulita.

Osumilit je vrlo rijetak mineral-silikat (ciklosilikat) kalija, natrija, željeza, magnezija i aluminija (**poveznica 8**).



**Slika 7:** Simonkoleit  $[Zn_5(OH)_8Cl_2 \cdot H_2O]$  je antropogeni

mineral pronađen u rudniku bakra Rowley, Maricopa County, Arizona (**poveznica 8**)

\***Aluminij** se vrlo rijetko u prirodi pojavljuje kao čist (**poveznica 9**). Nije bio izoliran u elementarnom stanju sve do 1825. godine Ljudi su proizveli od 1945. godine čistoga aluminija u 500 tisuća tona (folije, konzerve, omoti od cigareta, mali kućanski aparati) (**slika 8**) i on kao takav ulazi u sastav sedimenata. Tom količinom folije mogla bi se prekriti cijela površina SAD.



*Slika 8: Aluminijski proizvodi što uglavnom završavaju u smeću (foto J. VELIĆ)*

\***Volframov karbid** je novi spoj. Jedan je od najtvrdih tvari i glavni proizvod na bazi volframa. Volframov karbid ima tvrdoću 9,5 na Mohsovoj ljestvici od 10 (za dijamant) i talište pri 2870 °C. Koristi se za izradbu brzoreznih (**slika 9**) alata ili kao nanos na alatima iz tvrdoga sinterovanoga metala (vidi metalurgija praha) kao što su bušilice ili drobilice u rudarstvu i naftnoj industriji (**poveznica 10**).



*Slika 9: Kirurški alati i svrdla izrađeni od volframova karbida (poveznica 10)*

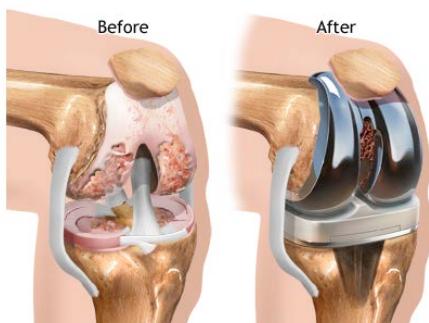
\***Zubi s metalnim i plastičnim plombama** također su jedna od tvari koja se nakuplja na površini zemlje (zasada, a u budućnosti će vjerojatno na nekim mjestima dospiji i u dubinu!), te će predstavljati ljudski trag ili signal za antropocen. Amalgam, kao sredstvo za ispunu karijesom oštećenih zubi, rabi se već dugi niz godina (**slika 10**). Plombe izrađene od amalgama poznate su i kao "srebrne plombe". Stare amalgamske (tzv. metalne, crne, srebrne...) plombe sadrže u svom

sastavu velike količine **žive** (Hg) i do 50 %, **olova** (Pb), **nikla** (Ni), **srebra** (Ag), **kositra** (Sn), **bakra** (Cu), **cinka** (Zn) i još mnoštvo drugih kovina. Neki stomatolozi daju im prednost jer su mehanički otpornije i dvostruko trajnije od bijelih zubnih ispuna. Bijele plombe koje nisu opasne po zdravlje sastoje se od kvarca i različitih minerala u smolastoj bazi (**poveznica 11**).



*Slika 10: Amalgamske plombe (poveznica 11)*

\***Umjetni kukovi i koljena** su također proizvodi čiji će ostaci budućim geologima jasno ukazivati na antropocen. Godišnje se u svijetu obavi nekoliko stotina tisuća zamjena oštećenoga zgloba kuka umjetnim (**slika 11**). Proteze koje se danas upotrebljavaju su izradene iz različitih materijala. Trup totalne proteze kuka je izgrađen iz **titanske legure**, **kobaltne legure** ili **čelične legure**. Glavica i čašica proteze kuka su izgrađene iz **polietilena** visoke gustine i **keramike** (**poveznica 13**).



*Slika 11: Umjetno koljeno (poveznica 12)*

Staklo i plastika predstavljaju skupinu **mineralida**. \***Plastika** je također tehnofosil prisutan u težini svih 7 milijarda ljudi. Plastika je naziv za različite umjetne ili polu-umjetne polimerske materijale. Do 1945. godine jedine plastične masu su bili šelak, umjetna svila *rajon* i bakelit. Poznato je da opstaje vrlo dugo. Plastike ima doslovce svuda: ima je u oceanima i morima, posvuda po kopnu. Jedu je životinje, poglavito morske, te se nakon njihova uginuća gomila i nadnima oceana. Nakuplja se i kao mikro-plastika iz odjeće. Američki zavod za zaštitu okoliša procjenjuje da je godišnja svjetska potrošnja između 500 i 1000 milijardi plastičnih vrećica. Njihova praktičnost postupno je izazvala masovnu proizvodnju i korištenje diljem Svjijeta. Više od milijun morskih ptica i više od sto tisuća sisavaca i kornjača ugiba svake godine zbog gutanja plastičnih ostataka koje često zamjenjuju za hranu misleći da je, primjerice, meduza. Najčešće se to odnosi na morske sisavce kao što su kitovi, dupini i tuljani. Plastični predmeti oblikom i

bojom često se čine kao plijen te ih životinje gutaju. Pročitajte više na stranicama **poveznica 14** i **poveznica 15**.

Životinje prolaze agoniju gušći se plastičnim otpadom koji im onemogućava disanje ili dopire u njihove probavne organe (**slika 12**). Prilikom razgradnje polietilena, od kojeg su načinjene plastične vrećice, nastaju mikroskopske otrovne čestice koje prodiru u hranidbeni lanac, kontaminirajući ekosustave te posljedično, hranu i vodu (**slika 13.**). Plastika na poljima zaustavlja prolaz kisika i uzrokuje neplodnost tla (**poveznica 15**).



**Slika 12:** Sadržaj utrobe uginulih ptica te primjeri gušenja sisavaca i ptica (poveznica 16)



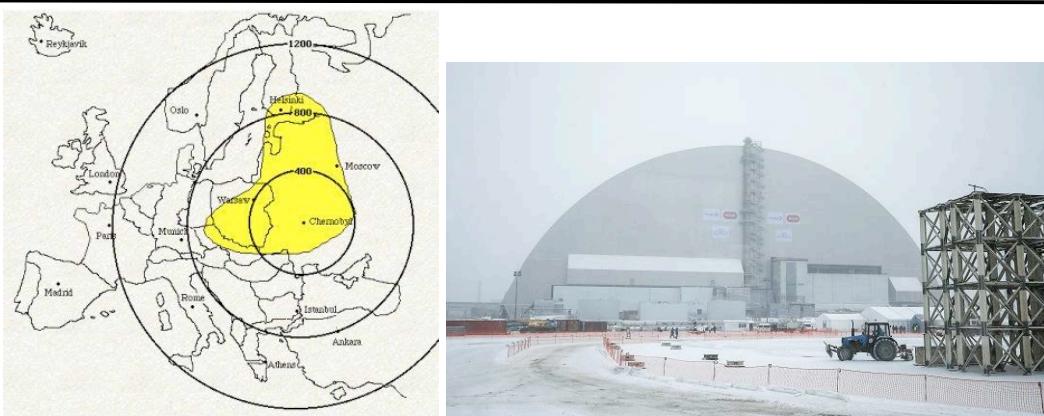
**Slika 13:** U procesu kompostiranja nalaze se i plastični predmeti čime sitne čestice polietilena ulaze u sastav tla a zatim i u prehranu (foto J. VELIĆ)

Evo još jednoga recentnog primjera kako plastika ubija i najveće morske životinje. Zoolozi su u Oslu ovih dana (vijest od 5. veljače 2017.) pronašli trideset plastičnih vrećica i drugoga plastičnog otpada u želucu kita koji se nasukao na jugozapadnu obalu Norveške. Kit težak dvije tone bio je u lošem stanju te je morao biti eutanaziran. Eto „humanoga“ rješenje!

\***Kemijski aspekt** se može predočiti spoznajama o radioaktivnim česticama, dimu, ili stakleničkim plinovima na pr. **Radioaktivne čestice** od atomskih bombi i pokusa s njima, nalaze se u ledu, na dnima jezera i mora (**slika 14**, **slika 15**). Do sada je znanstvena zajednica bila uvjerenja da se u visokim dijelovima planetarne atmosfere može naći samo zanemariv broj radioaktivnih izotopa nastalih u više od 2000 eksplozija nuklearnih i hidrogenskih bombi koje su se događale od 1943. do danas. Izotopi plutonija i cezija se još uvijek nalaze u začuđujuće velikim koncentracijama u određenim dijelovima atmosfere. Voditelj znanstvenoga istraživanja, dr. JOSE COROCHO ALVARADO s Instiuta za radijacijsku fiziku iz Lausanne i njihove sveučilišne bolnice u Švicarskoj, je rekao da većina radioaktivnih izotopa nestane u nekoliko godina nakon nuklearne eksplozije, no dio zračenja ostane u stratosferi. Takve čestice ostaju u atmosferi od nekoliko desetljeća pa do nekoliko stotina tisuća godina. JOSE COROCHO ALVARADO nadalje tvrdi da su koncentracije radioaktivnih izotopa u stratosferi veće za 1000 do 1500 puta od količina koje se nalaze u troposferi. Apsorbiraju ih živa bića pa kad uginu, padaju na dno/tlo te se tako radioaktivne čestice akumuliraju (**poveznica 17**).



*Slika 14: Prizor atomskoga pokusa (poveznica 17)*



**Slika 15:** Doseg širenja radioaktivnih čestica nakon eksploziji 1986. u ukrajinskoj atomskoj centrali u Černobilu i sanacija pomoću goleme betonsko-čelična neprobojne kupole koja natkriva ostatke reaktora koji je izgubio svoj krov, izazvavši najgoru nuklearnu katastrofu u svijetu (**poveznica 18**)

\***Urbanizacija** (*lat. urbs*: grad) je proces porasta gradskog i preobražaj seoskih naselja u gradska, odnosno širenje gradskog načina života na druga gradska ili seoska područja. (**poveznica 19**). A. CURRY (2017) iznosi teza o povezanosti osnivanja trajnih naselja i proizvodnje alkoholnih pića od raznih usjeva već na početku razvoja civilizacije. Tijekom ritualnih obredi u kamenom dobu (početak pleistocena – otprije 2,588 milijuna godina) pio se alkohol čime je promijenjena svijest poticala kreativnost, razvoj jezika, umjetnosti i religije. Za temu o urbanizaciji svakako je „vesela“ ideja da se hranjivim svojstvima piva može zahvaliti za razvoj pisma i osnivanje nekih od najstarijih gradova Svijeta kao što je primjerice Jerihon (Palestina) utemeljen 9.000 godina prije Krista, odnosno za početak povijesti.

Vjerojatno je najveći grad na Zemlji dugi niz godina bio antički Rim s, pretpostavljeno, oko milijun stanovnika. To je bilo višestruko više u odnosu na tadanje gradove u Kini ili Meksiku. Milijunski gradovi nastali su razmjerno tek nedavno budući da porast broja stanovnika umnogome ovisi o mehaniziranom i javnom prijevozu. Kad je kraljica Viktorija preminula na Svijetu je bilo tek 16 gradova s milijun ili više stanovnika, a recentno ih je barem 400 (WRIGHT, 2014), (**slika 16.** i **slika 17.**). Urbanizacija je narasla samo u prošlom stoljeću deseterostruko.



**Slika 16:** Peking ima oko 25 milijuna stanovnika (poveznica 20)



**Slika 17:** Središte Toronta, grad ima gotovo 3 milijuna stanovnika (poveznica 19)

\***Beton** je kompozitni građevinski materijal dobiven miješanjem agregata (obično šljunka i pjeska) i cementa.. Nešto o povijesti betona: Stari Rimljani su poznavali i koristili beton. Oko 300. godina prije Krista betonom su izgrađeni mnogi rimske putevi i toplice, Colosseum i Pantheon u Rimu, kao i akvedukt Pont du Gard u južnoj Francuskoj. Danas se u svijetu proizvodi više od šest milijardi kubika betona čiji sastav ovisi o vrsti konstrukcije u koju se ugrađuje i o načinu ugradnje. Pritom treba znati da u novije vrijeme na Kinu otpada gotovo 45 posto svjetske proizvodnje cementa. Prava je revolucija započela kada je beton armiran čeličnim šipkama. Tako ojačan, armirani je beton postao upotrebljiv i u onim segmentima gradnje o kojima graditelji do tada nisu ni sanjali (**poveznica 21**). Do danas je proizvedeno betona u količini dovoljnoj da se

pokrije čitav Svijet s po 1 kg na 1 m<sup>2</sup>. Ogromne mase betona su ugrađene u razne objekte kao što su ceste, brane ili zgrade. Fragmenti betona, opeke i keramike nastali tijekom ljudske povijesti stvaranja i obnavljanja naselja, leže ispod današnjih naselja i gradova svjedočeći o masovnoj potrebi tijekom svekolike izgradnje (**slika 18.**).



**Slika 18:** Beton i betonski proizvodi (poveznica 22)

Prema podatcima iz 2002. godine u državama EU godišnje nastaje 181 milijun tona građevinskog otpada od čega se prosječno 62 % reciklira. U njemu se nalazi 70 % mineralnoga udjela (**slika 19.** i **slika 20.**). Iz ovoga podatka je razvidno da taj materijal uvelike mijenja prirodnji sastav površinskih slojeva zemlje (**poveznica 23**).

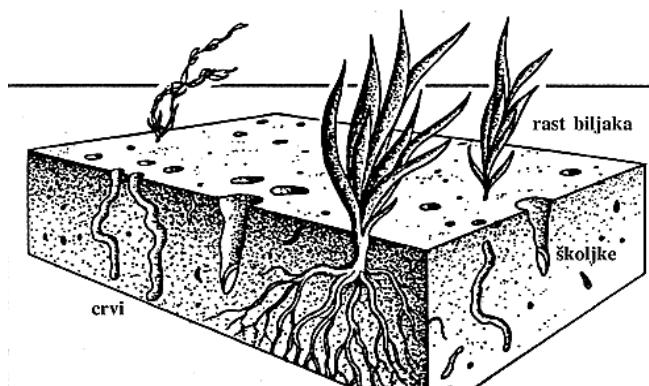


**Slika 19:** Građevinski otpad u okolini Zagreba (foto J. VELIĆ)



**Slika 20:** Ilegalno odlagalište otpada u kojem se nalazi plastika, keramika, porculan, beton i drugi umjetno stvoreni materijali-buduće sastavnice tla a zatim i stijena (foto J. VELIĆ)

\***Miniranjem, prekopavanjem, prokopavanjem, nasipavanjem** i slika pomaknuto je tri puta više stijena i tla nego što ih putuje vodom svih rijeka Svijeta (erozija). Prema VITOUSEK et al. između 30 – 50% površine zemljišta preinačeno je ljudskim djelovanjem.



**Slika 21:** Shematski prikaz djelovanja biljaka i životinja na dno mora.

Bioturbacije su fosilno očuvane promjene u sedimentu nastale životnom aktivnošću biljnih i životinjskih organizama (**slika 21.**) – uzrokuju razaranje primarnih sedimentnih tekstura (**poveznica 24**). U geološke transformacije treba eventualno uključiti i „bioturbacije“ nastale ljudskom aktivnošću koje se mogu nazvati „anthroturbation“, a obuhvaćaju učinke od površine zemlje pa do dubokih dijelova litosfere, mnogo većega učinka i dosega od bilo koje prirodne pojave bioturbacija (**slika 22.**). Tu su uključene od vrlo jednostavnih pojedinačnih *antroturbacije* do višekilometarskih mreža tunela u podzemlju ( u usporedbi s ubušivanjima nekih crva ili školjaka od nekoliko centimetara do više metara). Otkopavanje stijena iz podzemlja može rezultirati slijeganjem ili naglim propadanjem čime se mijenja reljef. I crpljenje raznih fluida iz

podzemlja (nafta, plin, voda), uključujući promjene nivoa podzemnih voda, pH, salinitet i dr. također su pojave geoloških transformacija. Nadalje, metamorfoze stijena uslijed nuklearnih pokusa u podzemlju također spadaju u geološke učinke. Sve ove promjene počele su u ranom ili srednjem holocenu s početkom rudarenja, ali se najviše uočavaju s nastupom industrijske revolucije (oko 1800.godine), a najjače s tzv. „Velikim ubrzanjem“ „Great Acceleration“ oko 1950.godine (ZALASIEWICZ i dr., 2014).



*Slika 22: Primjer potpovršinskih radova iz Australije i Hrvatske – okolica Šibenika (poveznica 25)*

Pridobivanje mineralne sirovine na **površinskom kopu** (**slika 23**) izvodi se u obliku etaža koje su prilagođene uvjetima ležišta, dimenzijsama otkopnih strojeva, konfiguraciji terena, veličini i obliku rudnog tijela. Površinski kopovi imaju veliki postotak iskorištenja ležišta, sigurnije i povoljnije uvjete rada u odnosu na podzemne kopove. Velika mana površinskih kopova je neminovna devastacija površine terena.



*Slika 23: Površinski kop ugljena u Kolubari (Srbija) i boksita u Hercegovini*

Kao noviji primjer kako ljudi mijenjaju značajke površine zemlje jesu velike količine smeća koje izgledom sliče prirodnim brdašcima, tj. humcima. To je slučaj s odlagalištem u Jakuševcu

(slika 24). No, ima i tragičnih situacija kao što je urušavanje smeća na naselju koliba u Adis Abebi (slika 25).



*Slika 24: Brdo u Jakuševcu (Zagreb) koje je hrpa smeća, nedavno sanirano ali još uvijek u uporabi (foto J. VELIĆ)*



*Slika 25: Urušavanje smetlišta u Adis Abebi 12. 03. 2017.*

Sljedeći je primjer Aralsko jezero (slika 26.). To je slano jezero na granici Kazahstana i Uzbekistana površine od oko  $33.800 \text{ km}^2$ . Jezero je bilo prilično veće, ali se zadnjih 50 godina smanjuje zbog smanjenog dotoka koji je uzrokovan hidrološkim radovima na rijekama pritokama Amu Darji i Sir Darji. Naime, od 60-ih godina 20. stoljeća vode ovih rijeka se koriste za navodnjavanje polja pamuka u Kazahstanu i Uzbekistanu. Oko  $20$  do  $60 \text{ km}^3$  vode se godišnje izdvoji za navodnjavanje. Zbog toga, nivo jezera opadne za  $20$  do  $60$  centimetara godišnje.

Zapremina jezera se od 1960. smanjila za 80%, dok je narasli salinitet uništio skoro sve oblike života u jezeru (**poveznica 26**).



*Slika 26: Posljedice procesa irigacije prijete potpunim isušivanjem nekada velikoga i poznatoga Aralskoga jezera (poveznica 26)*

\***Čada** o je amorfni ugljikov prah (crna prašina) s česticama kuglastog promjera 10-80 nm. Proizvod je nepotpuna izgaranja ili toplinskoga raspada organskih tvari na visokim temperaturama. Osim ugljika, proizvedena čada sadrži i male udjele kisika, vodika i sumpora, već prema uvjetima proizvodnog procesa. Godišnja svjetska proizvodnja čade iznosi više od 6 milijuna tona. (**poveznica 27**).

\***Dim** (**poveznica 28**) su sitne male inertne čestice nastale izgaranja fosilnih goriva, tj. **spaljivanja ugljena, nafte i plina** (fosilna goriva), koje u tlima ostaju kao trajni signal dima, tj. kao vrlo obilni kemijski signali (**slika 27.**).

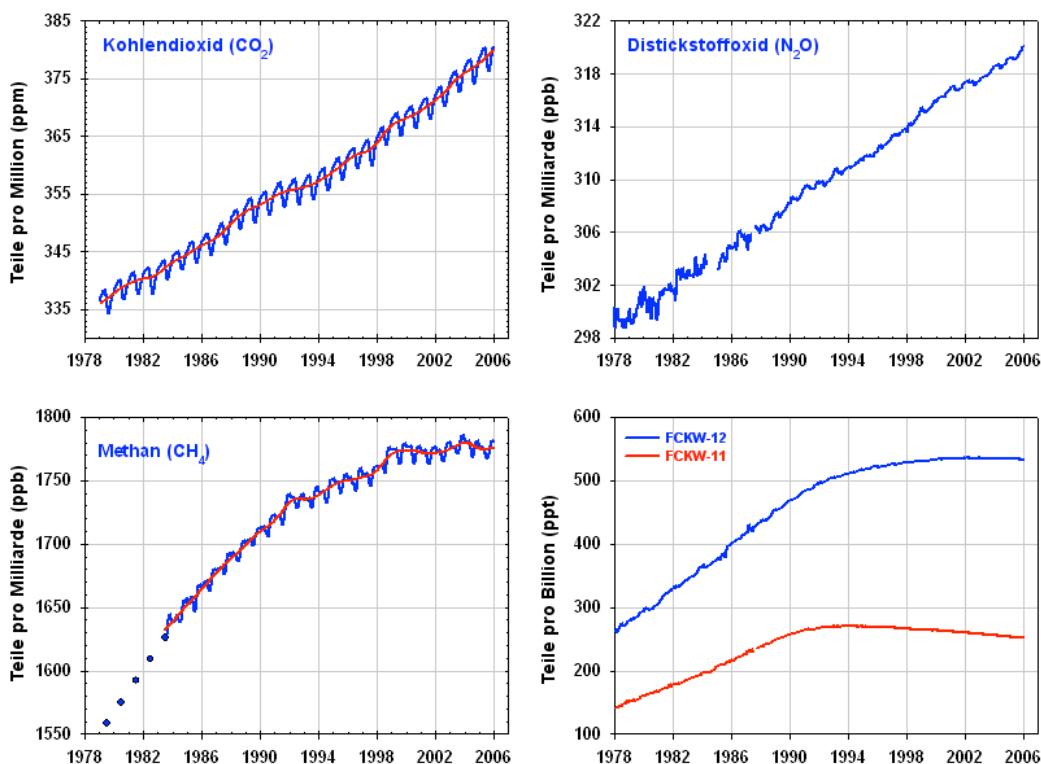


*Slika 27: Dim (foto J. VELIĆ)*

\***Koncentracija plinova s efektom staklenika** u uskoj je korelaciji s globalnim zatopljenjem. Dio znanstvenika smatra da zbog značajnog povećanja koncentracije stakleničkih plinova u atmosferi, prvenstveno ugljikovoga(IV) oksida, zbog sve većega izgaranja **fosilnih goriva** (**ugljena, nafta i prirodnog plina**) u posljednjih 250 godina, tj. od početka industrijske revolucije počelo globalno zatopljenje (**slika 28.**). Zadnjih godina čovječanstvo ispušta u atmosferu preko 8 milijardi tona CO<sub>2</sub> godišnje. Porast CO<sub>2</sub> je 100 puta veći od onoga na kraju pleistocena (podatci iz ledenjaka polarne kape). Najveći dio apsorbiraju oceani postajući tako kiseliji, a manji dio upijaju i šume. Zakiseljavanje mora uvelike šteti koraljima, općenito životu grebena. Ostatak se gomila u atmosferi, pojačavajući tako efekt staklenika. Ostali značajni staklenički plinovi su metan, dušikovi oksidi i halogenirani ugljikovodici. Velike količine metana stvaraju ogromna stada stoke svojim procesom probave, antropogeni dušikovi oksidi nastaju u proizvodnji umjetnih gnojiva, a halogenirani ugljikovodici u procesima proizvodnje polimera i specijalnih plinova za hlađenje.

Staklenički plinovi ostaju u atmosferi dugo – vjerovatno desetljećima. Od početka **industrijske revolucije**, prije 250 godina, količina CO<sub>2</sub> u atmosferi povećala se 35 %, a metana 148 %. Ispuštanje NO iz fosilnih goriva u atmosferu i izgaranja biomase je veće nego prirodni unosi što uzrokuje stvaranje formacije fotokemijskoga ozona („smoga“) diljem svijeta (**slika 29.**).

Kako je sastav zemljine atmosfere iz davne prošlosti prilično dobro poznat iz fosilnih uzoraka i iz uzoraka zraka iz mjeđurića zarobljenih u ledu na polovima, pokazalo se da su ugljikov (IV) oksid i metan u današnjoj atmosferi na najvišoj razini, barem u posljednjih 650.000 godina (**poveznica 29.**).



*Slika 28: Porast stakleničkih plinova u atmosferi (poveznica 29)*



*Slika 29: Smog u Sarajevu (poveznica 30)*

\***Umjetna su gnojiva** topljiva u vodi te od njihove ukupne količine u tlu veći dio iskoriste biljke. No, neiskorišteni dio tih gnojiva vodenim tokovima prenose u okoliš pa ga na taj način onečišćuju. Osobito je opasno miješanje tih voda s bunarskom ili drugim izvorima pitke vode. Zbog toga se vrsta i količina umjetnoga gnojiva koje se dodaje nekom tlu mora nužno prilagoditi

vrsti tla i potrebama biljne kulture koja se na tom tlu uzgaja (**poveznica 31**). Utjecaj umjetnih gnojiva, osobito dušika N<sub>2</sub>, (Haber-Bošov postupak proizvodnje gnojiva), može se dobro vidjeti u jezerima. Naime, kad su puna umjetnih gnojiva, cvate plankton, stvaraju se mrtve zone čime se devastira biologija jezera.

\***Biološki aspekt** antropocena posebno je tragičan, a u pojedinim primjerima i dirljiv.

**Izumrle ili su uništene brojne vrste zahvaljujući ljudima kao dominantnim grabežljivcima.**

U tom je smislu zanimljiv dio teksta iz knjige „Kratka povijest napretka“ (Wright, 2014):

*„Uskoro nakon što se čovjek pojavio u novoj zemlji –do prije 15 000 godina zahvaljujući seobama nakon zadnje oledbe, krupna je divljač počela nestajati. Mamuti i vunasti nosorozi povlače se na sjever te potom nestaju iz Europe i Azije. Divovski wombat, kao i ostali veliki tobolčari i kornjače velike poput volksvagena, nestaju iz Australije. Deve, mamuti, golemi bizoni, golemi ljenivac i konj izumiru diljem obiju Amerika. Smrad izumiranja slijedi Homo sapiensa oko svijeta. Ljudi iz gornjega paleolitika (vremenski okvir od prije 40 tisuća do prije 10 tisuća godina, kad je došlo do razvoja poljoprivrede, označava kraj paleolitika) ubijali su u mnogo većim razmjerima. Neka od mjesta njihovih masovnih ubijanja bila su industrijskih razmjera: tisuću mamuta odjednom, više od sto tisuća konja na drugom.“*

Ljudske aktivnosti povećale su izumiranje vrsta od tisuću na deset tisuća. Time se smanjuje **bioraznolikost**-mijenja se biološki krajolik, tj. postaje ujednačen. Tome svakako doprinosi „umjetno“ širenje biljnih i životinjskih vrsta iz njihovih prvotnih prirodnih staništa diljem Sviljeta. Budući će istraživači (geolozi?) pronalaziti ogromne količine kosti koje su rezultat globalnog širenja domaće kokoši, a to sigurno više ne će biti čak ni facijesni fosil, akmoli provodni!!! Mehanizirano **ljudsko predatorstvo** uništava 0,25 % ukupne biološke proizvodnje.

\***Šume mangrova** su šume stabala raznih vrsta mangrova, koje su vrlo otporne na sol morske vode, a rastu u obalnim područjima koja zahvaćaju plime i oseke. (**poveznica 32**). Šume mangrova su u velikim dijelovima Sviljeta ugrožene postavljanjem i sve većim širenjem "bazena" za intenzivni, industrijski uzgoj raznih vrsta kozica. Sljedeći problem predstavlja onečišćenja naftom (Panama, Perzijski zaljev), ali i isušivanje područja gdje rastu šume mangrova radi gradnje novih naselja što je uzrokovalo 50%-tним gubitkom svjetskih mangrova. (**slika 30.**)



**Slika 30:** Pogled iznad i ispod razine vode na rub šume mangrova (poveznica 32)

#### 4. PITANJE POČETKA ANTROPOCENA

\*Je li to uopće geološko pitanje? Ili je ponajviše ekološko ili povijesno ili arheološko?

\*Prije više tisuća godina kad je krenula akceleracija porasta broja stanovništva?

\*Ili tek za više tisuća godina ili za nekoliko milijuna godina kad budu formirani slojevi s fosiliziranim zapisima svekolike ljudske aktivnosti kako je u nekim detaljima spomenuto u prethodnom odjeljku?

\*U doba industrijske revolucije početkom 1800-tih kako predlažu CRUTZEN i STROEMER? Naime, njih su dvojica napisali sljedeće: „*Odrediti datum početka „antropogena“ čini se neuvjerljivim, ali ipak predlažemo drugi dio 18. stoljeća, premda smo svjesni da može biti i alternativnih prijedloga (neki mogu čak željeti uključiti cijeli holocen). Međutim, izabrali smo ovaj datum jer su tijekom protekla dva stoljeća globalni efekti ljudske aktivnosti postali jasno prepoznatljivi. To je period kad podatci iz leda pokazuju početak rasta atmosferske koncentracije nekoliko stakleničkih („greenhouse“) plinova“ naročito  $CO_2$  i  $CH_4$ . Taj datum početka podudara se s James WATT-ovim izumom parnoga stroja 1784. U to vrijeme biotičke zajednice u najvećem broju jezera počinju pokazivati najveće promjene“.*

\*Era fosilnih goriva će još dugo trajati i tako utjecati na trag ili sadržaj u naslagama. Treba li se i ova činjenica uzeti u obzir?

\*Je li prihvatljiva druga polovica 18. stoljeća kao početak antropocena ako se zna da je „atomsko doba“ počelo tijekom 1950-tih, točnije 16. srpnja 1945., kad je prvi puta načinjen pokus s atomskom bombom te su se počeli širiti radioaktivni elementi?

\*U nedavno objavljenom radu LEWIS & MASLIN (2015) su predložili dvije moguće granice ili početke holocena: 1610. godina povezano s kolonizacijom Amerike ili 1964. kad se pojavljuje prekomjerna količina radioaktivnoga ugljika kao signala testova atomskih bombi.

\* U međuvremenu Radna je skupina u kolovozu 2016. došla do zaključka da se Međunarodnoj komisiji za stratigrafiju (ICS) predloži da se antropocen proglaši epohom koja počinje 1950. godine (**poveznica 6**) (**slika 31**) budući se od te godine količina izotopa plutonija nastala nuklearnim pokusima nalazi u sedimentima u koncentraciji koja se može sigurno utvrditi.

**Quaternary Period with the Anthropocene Epoch**

Eonothem/ Eon	Erahem/ Era	System/ Period	Series/ Epoch	Stage/ Age	millions of years ago
Phanerozoic	Cenozoic	Quaternary	Anthropocene <sup>1</sup>		-1950 ce
			Holocene		-0.0117
			Pleistocene	Upper	-0.126
				Middle	-0.781
				Calabrian	-1.806
				Gelasian	2.588

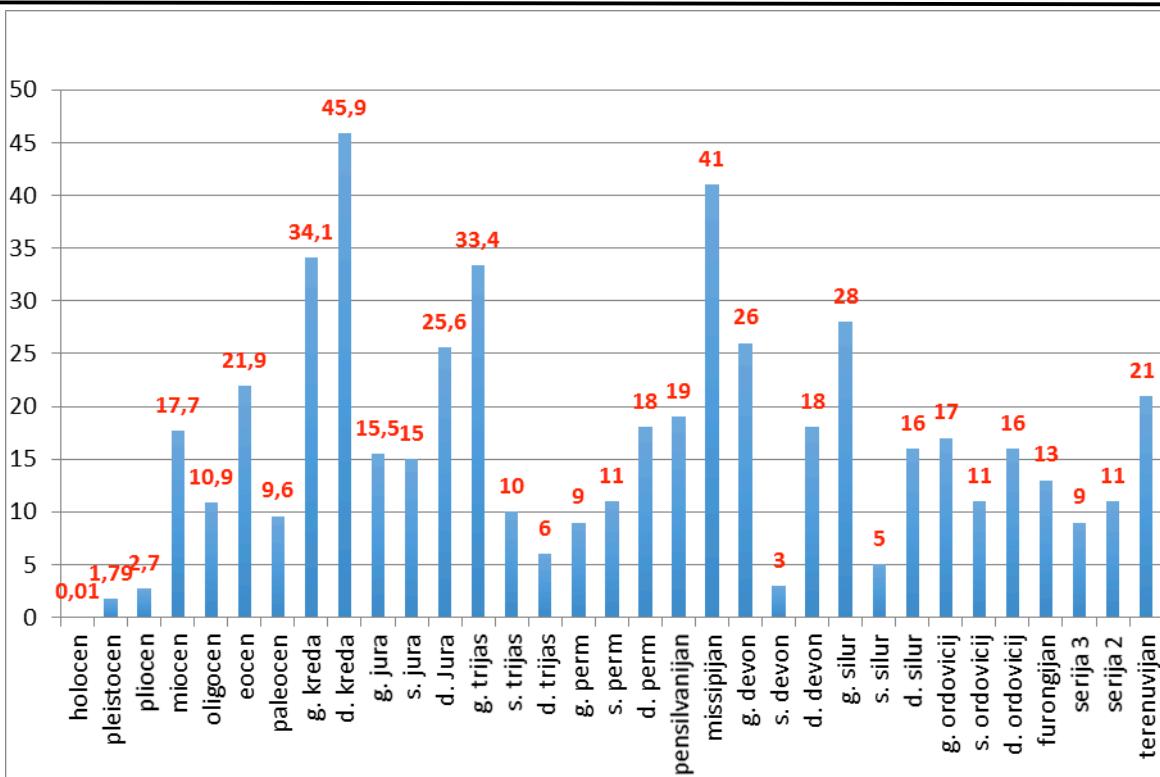
<sup>1</sup>In August 2016 the Anthropocene Working Group (AWG), a special body created within the International Commission on Stratigraphy (ICS), recommended that the Anthropocene Epoch be made a formal interval within the International Chronostratigraphic Chart. The AWG recommended that the year 1950 be used as the starting point of the Anthropocene Epoch.

© Encyclopædia Britannica, Inc.

**Slika 31. Tablica smještaja epoha antropocena (poveznica 6)**

Slika 31. predstavlja prijedlog AWG (*Anthropocene Working Group*) da antropogen počne 1950. godine kao epoha (**poveznica 6**).

\*Treba razmotriti pojам „epoha“. Spada u geokronološki sustav jedinica po kojemu je geološko vrijeme strukturirano tako da se prvo dijeli na **eone** (prekambrij pa fanerozoik), svaki od njih se dalje dijeli na **ere** (paleozoik, mezozoik, kenozoik), oni na **epohe** i najniža jedinica je **doba**. Prema **slici 32.** epohe traju od 46 milijuna godina (donja kreda) pa do 11 700 godina (holocen). Dakle, izuzetne su razlike u trajanju, kojih ima i u paleozoiku s srazmjerno kratkim epohama (srednji devon 3 milijuna godina i srednji silur 5 milijuna godina). Bi li bilo možda primjerenije antropocen smatrati dijelom holocena, dakle kao doba?



**Slika 32:** Prikaz trajanja epoha od terenuvija (kambrij) do holocena (kvartar) (načinio MALVIĆ, 2017, prema International Chronostratigraphic Chart, 2016/12)

## 5. ZAKLJUČAK

Koncept antropocena omogućuje združivanje svih ideja o promjenama okoliša, rekao je COLIN WATERS, geolog na Istraživačkom britanskom geološkom institutu. Tijekom antropocena započeo je rast ljudske vrste kao globalnoga čimbenika tj. **biogeofizičke sile** sposobne i važne u geološkim izvješćima. Ili drugim riječima, osviješten je pojam da su ljudi i geološka sila.

Razvijanje strategije širom Sviljeta koja vodi održivim ekosustavima nasuprot stresu izazvanome od ljudi, bit će jedan od velikih budućih zadataka čovječanstva što će zahtijevati izuzetne istraživačke napore i mudru primjernu znanja stečenog u „noöspheri“, bolje znanog kao *znanje informatičkoga društva*. Uzbudljiv, ali isto tako težak i zastrašujući zadatak je pred globalnom istraživačkom i inženjerskom zajednicom da vode čovječanstvo prema globalno održivom okolišnom gospodarenju.

Sljedeće dvije ili tri godine određivat će koji su znakovi za antropocen najsnažniji. Oni su izuzetno raznoliki s vrlo velikim brojem pojavnosti i s različitim početcima. Primjerice, usporedba rudarstva i atomskih pokusa!

Kada se svi potrebni podaci i mišljenja prikupe, i službeno će biti predano nadležnim tijelima kako bi se i službeno moglo usvojiti postojanje antropocena.

Jedan od kritičara uvođenja antropocena je C. RIVKIN. Evo nekoliko njegovih misli:*“Kao što sam 1992. napisao cijanobakterije su bile potpomognute oksigenizacijom atmosfere prije dvije milijarde godina. To je bio jasno značajniji utjecaj na središnju sastavnicu planetarnoga sustava nego što je ljudskim djelovanjem povećanje CO<sub>2</sub> od 40% od početka industrijske evolucije. Međutim, kako znamo, cijanobakterije niti su sjale od zadovoljstva niti su slavile to postignuće.*

*Nejasno je ovoga časa hoće li čovječji utjecaj trajati toliko da bi predstavlja jednu epohu ili će više naličiti „jednome događaju“ („**an event**“).*

*Izraz „antropocen“ poput fraze „globalno zatopljenje“ je dostatno neodređen da bi bio garancija kako će, od ljudi s različitim viđenjem svijeta, biti tumačen na izrazito različit način. Kako sam objasnio ovo je jednako istina za Nobelove laureate i za nas ostale.*

*Bez velikih katastrofa, poput (1)enormnih vulkanskih erupcija, (2)neočekivanih epidemija, (3)nuklearnoga rata, (4)asteroidnoga udara, (5)novoga ledenog doba ili (6)kontinuiranoga grabeža Zemljinih resursa primitivnom tehnologijom (dio ovih opasnosti može se izbjegći stvarnim funkcioniranjem „noösphere“) ljudski će rod ostati glavna geološka sila za nastupajuća milenija, možda i za milijune godina.*

*Inteligencija temeljena na siliciju bi možda krenula svojim putom ali ljudi time ne će upravljati (**slika 33.**).*



**Slika 33:** Budući vladari Svijeta nakon ljudske vrste???

## 6. LITERATURA

### 6.1. Objavljeni radovi

1. Crutzen, P. J. & Stoermer, E. F. (2000): The „Anthropocene“. IGBP NEWSLETTER, 41, 17-18.
2. Crutzen P. J. (2002): Geology of Mankind. *Nature* 415 (6867), p 23.
3. Curry, A. (2017): Ljubav stara 9000 godina. National Geographic. Hrvatska. 2, 14-37.
4. Herak, M. (1984): Geologija. Školska knjiga. 429 str.
5. Lewis, S. L. & Maslin, M. A.: (2015) Defining the Anthropocene. *Nature*, 519, 171–180.
6. Marsh, G. P. (1965): The Earth as Modified by Human Action. Belknap Press, Harvard University Press.
7. Vernadsky, V.I. (1926): The Biosphere. Translated and annotated version from the original of 1926. Copernicus, Springer, New York, 1998.
8. Zalasiewicza, J., Williams, M., Smith, A., Barry, T. L., Coe, A. L., Bown, P. R., Brenchley, P., Cantrill, D., Gale, A., Gibbard, P., Gregory, F. J., Hounslow, M. W., Kerr, A. C., Pearson, P., Knox, R., Powell, J., Waters, C., Marshall, J. Oates, M., Rawson, P. & Stone, P. (2008). Are we now living in the Anthropocene. *GSA TODAY*, 18, No 2, 4-8.
9. Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Williams, M. (2014): Human bioturbation, and the subterranean landscape of the Anthropocene. *Anthropocene*. 6, 3–9.
10. Wright, M. (2014): Kratka povijest napretka. Naklada Jesenski Turk. 171 str.

### 6.2. Mrežne poveznice

Poveznica 1: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Ekologija>

Poveznica 2: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2016-12.pdf>

Poveznica 3: [https://en.wikipedia.org/wiki/Eugene\\_F.\\_Stoermer](https://en.wikipedia.org/wiki/Eugene_F._Stoermer)

Poveznica 4:

<http://www.igbp.net/download/18.316f18321323470177580001401/1376383088452/NL41.pdf>

Poveznica 5: [https://en.wikipedia.org/wiki/Paul\\_J.\\_Crutzen](https://en.wikipedia.org/wiki/Paul_J._Crutzen)

Poveznica 6: <https://www.britannica.com/science/Anthropocene-Epoch>

Poveznica 7: [https://www.google.hr/?gws\\_rd=ssl#q=anthropocene+epoch+definition&](https://www.google.hr/?gws_rd=ssl#q=anthropocene+epoch+definition&)

Poveznica 8: <https://phys.org/news/2017-03-human-caused-minerals-bolsters-argument-declare.html#jCp>

Poveznica 9: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Aluminij>

Poveznica 10: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Volframov\\_karbid](https://hr.wikipedia.org/wiki/Volframov_karbid)

Poveznica 11: <http://alternativa-za-vas.com/index.php/clanak/article/amalgamske-plombe-otrov-u-vashim-ustima>

Poveznica 12: <http://obs.hr/v4/informacije-o-operativnim-zahvatima>

Poveznica 13:

[https://www.google.hr/search?q=umjetni+zglobovi&hl=hr&site=webhp&tbm=isch&imgil=wo9MmVD1TyCQwM%253A%253BP0j0ciNPsJ1Z6M%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fcentar-zdravlja-fizioturk.hr%25252Fugradnja-umjetnih-zglobova%25252F&source=iu&pf=m&fir=wo9MmVD1TyCQwM%253A%25252CP0j0ciNPsJ1Z6M%25252C\\_&usg=\\_1L1b6hI3lP0fJjn5pmohfbvsZS8%3D&biw=1482&bih=856&ved=0ahUKEwj79OXqtHSAhWI5xoKHWzkA9YQyjcIOW&ei=p2\\_FWK2AHIjPa-zIj7AN#imgrc=wo9MmVD1TyCQwM](https://www.google.hr/search?q=umjetni+zglobovi&hl=hr&site=webhp&tbm=isch&imgil=wo9MmVD1TyCQwM%253A%253BP0j0ciNPsJ1Z6M%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fcentar-zdravlja-fizioturk.hr%25252Fugradnja-umjetnih-zglobova%25252F&source=iu&pf=m&fir=wo9MmVD1TyCQwM%253A%25252CP0j0ciNPsJ1Z6M%25252C_&usg=_1L1b6hI3lP0fJjn5pmohfbvsZS8%3D&biw=1482&bih=856&ved=0ahUKEwj79OXqtHSAhWI5xoKHWzkA9YQyjcIOW&ei=p2_FWK2AHIjPa-zIj7AN#imgrc=wo9MmVD1TyCQwM)

Poveznica 14: <http://zdravakrava.24sata.hr/green-i-bio/plastika-u-moru-prijeti-nasem-okolisu-1971>

Poveznica 15: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Plasti%C4%8Dna\\_vre%C4%87ica](https://hr.wikipedia.org/wiki/Plasti%C4%8Dna_vre%C4%87ica)

Poveznica 16:

[https://www.google.hr/search?q=plastika+morske+ptice&tbm=isch&imgil=IT74M5XuYAwt7M%253A%253BJp8u2n\\_hsyrfjM%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fwww.telegram.hr%25252Fzivot%25252Fnovo-istratzivanje-otkrilo-tmurnu-buducnost-99-posto-morskih-ptica-ce-do-2050-godine-imati-plastiku-u-utrobi%25252F&source=iu&pf=m&fir=IT74M5XuYAwt7M%253A%25252CJp8u2n\\_hsyrfjM%25252C\\_&usg=\\_oIBPQWO9M5lFJndIyqIh5hMQC70%3D&biw=1482&bih=856&ved=0ahUKEwj91JiOnNSAhWEAxoKHZsOD8wQyjcIIg&ei=5WDFWL3OH4SHaJudvOAM#imgrc=gX9K3WJyla89fM](https://www.google.hr/search?q=plastika+morske+ptice&tbm=isch&imgil=IT74M5XuYAwt7M%253A%253BJp8u2n_hsyrfjM%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fwww.telegram.hr%25252Fzivot%25252Fnovo-istratzivanje-otkrilo-tmurnu-buducnost-99-posto-morskih-ptica-ce-do-2050-godine-imati-plastiku-u-utrobi%25252F&source=iu&pf=m&fir=IT74M5XuYAwt7M%253A%25252CJp8u2n_hsyrfjM%25252C_&usg=_oIBPQWO9M5lFJndIyqIh5hMQC70%3D&biw=1482&bih=856&ved=0ahUKEwj91JiOnNSAhWEAxoKHZsOD8wQyjcIIg&ei=5WDFWL3OH4SHaJudvOAM#imgrc=gX9K3WJyla89fM)

Poveznica 17: <https://matrixworldhr.com/2014/01/17/veliki-broj-radioaktivnih-cestica-iz-prvih-nuklearnih-testova-jos-uvijek-prisutan-u-atmosferi/>

Poveznica 18: <http://www.index.hr/vijesti/clanak/permalink/934889.aspx>

Poveznica 19: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Urbanizacija>

Poveznica 20: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_largest\\_cities](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_largest_cities)

Poveznica 21: <http://www.gradimo.hr/clanak/povijest-betona/37675>

Poveznica 22:

<https://www.google.hr/search?q=beton&tbo=isch&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwjFvuiIu9HSAhWGtBoKHZ0PDcwQsAQIVQ&biw=1482&bih=856&dpr=1#imgrc=BYsLA1Ufl4R5EM>

Poveznica 23:

[http://www.holcim.hr/fileadmin/templates/HR/doc/6.\\_HFOG\\_prezentacije/Gospodarenje\\_i\\_mogucnost\\_upotrebe\\_gradevinskog\\_otpada\\_-\\_Prof.dr.sc.\\_Bjegovic\\_Dubravka\\_i\\_Prof.dr.sc.pdf](http://www.holcim.hr/fileadmin/templates/HR/doc/6._HFOG_prezentacije/Gospodarenje_i_mogucnost_upotrebe_gradevinskog_otpada_-_Prof.dr.sc._Bjegovic_Dubravka_i_Prof.dr.sc.pdf)

Poveznica 24:

[https://www.google.hr/?gws\\_rd=cr&ei=GZtnUrCwIInRsgbS4oGACg#q=bioturbacija&\\*](https://www.google.hr/?gws_rd=cr&ei=GZtnUrCwIInRsgbS4oGACg#q=bioturbacija&*)

Poveznica 25: <https://www.scientificamerican.com/article/will-mines-tunnels-and-drilling-scar-earth-permanently/>

Poveznica 26: <http://www.bravacasa.rs/misterija-nestalo-jezero-velicine-srbije-ko-ga-je-ukrao/>

Poveznica 27: <https://hr.wikipedia.org/wiki/%C4%8Ca%C4%91a>

Poveznica 28: <https://hr.wiktionary.org/wiki/dim>

Poveznica 29: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Stakleni%C4%8Dki\\_plinovi](https://hr.wikipedia.org/wiki/Stakleni%C4%8Dki_plinovi)

Poveznica 30:

[https://www.google.hr/search?q=smog&tbo=isch&source=univ&sa=X&ved=0ahUK\\_EwipqemxkNbSAhWLbxQKHU78DdoQsAQIIw&biw=1106&bih=748#tbm=isch&q=smog+u+sarajevu&\\*&imgrc=7NTux\\_Dw4C4TzM](https://www.google.hr/search?q=smog&tbo=isch&source=univ&sa=X&ved=0ahUK_EwipqemxkNbSAhWLbxQKHU78DdoQsAQIIw&biw=1106&bih=748#tbm=isch&q=smog+u+sarajevu&*&imgrc=7NTux_Dw4C4TzM)

Poveznica 31: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Gnojivo>

Poveznica 32: [https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%A0uma\\_mangrova](https://hr.wikipedia.org/wiki/%C5%A0uma_mangrova)