

# Kambrijska eksplozija

---

Ivšić, Martina

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2011**

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/um:nbn:hr:217:822752>

Rights / Prava: [In copyright/Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEU ILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO - MATEMATI KI FAKULTET  
BIOLOŠKI ODSJEK

## **KAMBRIJSKA EKSPLOZIJA**

## **CAMBRIAN EXPLOSION**

### **SEMINARSKI RAD**

Martina Ivšić

Preddiplomski studij znanosti o okolišu  
(Undergraduate Study of Environmental Sciences)

Mentor: doc. dr. sc. Goran Kovacić

Zagreb, 2011.

# SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
2.	KAMBRIJSKA EKSPLOZIJA.....	2
2.1.	EDIKARIANSKA FAUNA .....	4
2.2.	KAMBRIJSKA FAUNA.....	6
3.	POVIJESNI PREGLED.....	8
4.	FILOGENIJA .....	9
5.	UZROCI.....	11
5.1.	RASPAD SUPERKONTINENTA.....	11
5.2.	POVIŠENJE KONCENTRACIJE KISIKA .....	12
5.3.	OSCILACIJE KONCENTRACIJE UGLIKA .....	12
5.4.	LEDNA DOBA.....	13
5.5.	MASOVNA IZUMIRANJA.....	13
5.6.	KOZMIČKO ZRAČENJE .....	14
5.7.	AKTIVNO UČENJE .....	15
5.8.	STRES.....	17
6.	KAMBRIJSKA EKSPLOZIJA KAO ARGUMENT PROTIV EVOLUCIJE .....	18
7.	ZAKLJUČAK.....	19
8.	LITERATURA .....	20
9.	SAŽETAK .....	22
10.	SUMMARY.....	22

## **1. UVOD**

Cilj ovog rada je objasniti i predstaviti dosadašnje znanje i teorije u vezi jednog zanimljivog događaja u Zemljinoj prošlosti, kambrijske eksplozije. Stratigrafskim analizama utvrđena je pojava mnogobrojnih organizacijskih skupina životinja (phyla) u relativno kratkom vremenu (od prije 550 milijuna godina u trajanju od oko 50 milijuna godina). Bilježi se pojava razvijenih organizama u velikom broju bez dokaza o njihovim posljednjim zajednickim precima. Molekularna evolucija koristi se suvremenim metodama za utvrđivanje srodnosti između živih生物.

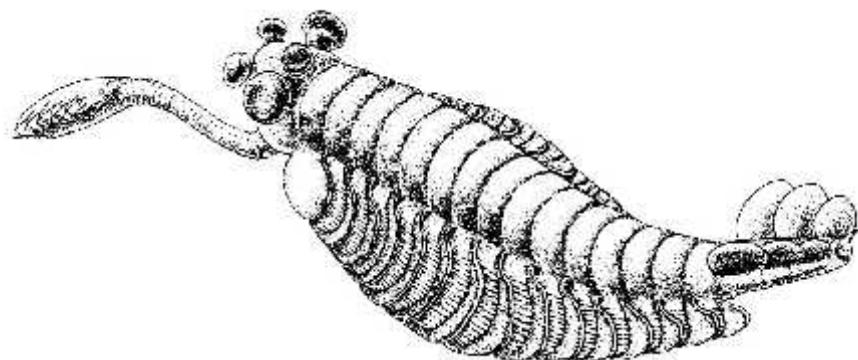
Osim pojave mnogobrojnih životinja, kambrijsko razdoblje obilježeno je klimatskim, atmosferskim, geološkim, tektonskim i drugim posebitostima. Kroz ovaj rad pokušat će se povezati abiotični i biotični uvjeti kambrijskog razdoblja te utvrditi njihov međusobni odnos.

## 2. KAMBRIJSKA EKSPLOZIJA

Gledaju i današnji živu i svjet, sve kukce, mekušce, ribe, ptice i sisavce teško je zamisliti kako je pet šestina vremena od nastanka života pripadalo jednostani nim organizmima. Ali injenica je da se iz prvih prona enih tragova života od prije više od 3,5 milijardi godina tek prije 550 ili više milijuna godina javljaju višestani ni organizmi; sva današnja koljena i to gotovo istodobno. Ta *eksplozija* uistinu je trenuta na uzimaju i u obzir geološko vrijeme. Prema tome, fosilni ostaci indiciraju da je rani kambrij (prije 545 mil.god.) obilježen velikim periodom morfološke evolucije.<sup>3</sup>

Povod za to su iznenadna pojava skeleta i mnogobrojnost o uvanih tragova - dobro o uvanih za razliku od predkambrijskog razdoblja.<sup>12</sup> Upravo na po etku kambrija pojavljuju se fosili o uvanih vanjskih ljuštura što ukazuje na sposobnost tadašnje faune za inkrustaciju minerala poput kalcijeva karbonata i kalcijeva fosfata u svojim organizmima. Tu sposobnost nazivamo biominerizacija, a pojavila se u kambriju u gotovo 40-tak razreda životinja.<sup>9</sup>

Najpoznatije nalazište fosila iz kambrijskog razdoblja je u kanadskoj provinciji Britanska Kolumbija na podru ju Burgess Shalea. Bogatstvo nalazišta uvjetovali su procesi i okoliš tog razdoblja: svi organizmi bi zajedno s muljem skliznuli niz klif te završili u anoksi nim uvjetima gdje bi bili dobro i brzo o uvani. Tamo su otkriveni organizmi koji su se promijenili od kambrija do današnjeg vremena, ali i nepoznati organizmi koji ne nalikuju niti jednom živu em organizmu i teško ih je uvrstiti u neku od postoje ih skupina. Me u poznatima, prona ene su alge, spužve, ramenonošci, mnogo etinaši, lankonošci (trilobiti), bodljikaši i svitkovci.



**Slika 1.** *Opabinia regalis*.<sup>13</sup>

**Napomena:** Literarni navodi nalaze se u fusnotama.

Naj udniji nalaz je vrsta *Opabinia regalis* (Sl. 1.). Smatra se da su pripadnici te vrste bili predatori, veli i ne do 7 cm, imali su neobičan nastavak za hranjenje, fleksibilno segmentirano tijelo, tri plodice na kaudalnom dijelu tijela i pet očiju. Danas životinje imaju uparene nastavke za lov za razliku od vrste *Opabinia regalis*, a više o očju nalazimo unutar skupine kukaca. Zbog tih posebnosti bilo ju je teško svrstati u neku od postojećih skupina. Prvotno su je svrstali u razred Crustacea, zatim među trilobite da bi se zaključilo da nije lankonožac, već neki daljnji predak od kojeg su se razvili koluti avci i lankonošci.

Neka od znanih nalazišta su i ona u Kini iz Chengjanga i Kailija koja su postojanje tih novih tjelesnih organizacija pomaknula za 10 milijuna godina u prošlost. Time se pokazalo kako se kompleksnost novih struktura trebala razviti u kratkom intervalu, što je tom događaju pridonijelo na vrijednosti, kao i pridodalo nadimak *eksplozija*.<sup>13</sup>

Nasuprot tome, neki smatraju kako je kambrijska eksplozija isključivo tvorevina fosilizacije. To temelje na injenici kako su postanku morfološki kompleksnih organizama pronađeni iz ranog kambrija zasigurno bili potrebni jednako toliko napredni preci. Ti preci su vjerojatno bili male veličine i nisu imali nikakve komponente (npr. ljuštice) koji bi mogli biti sačuvani do danas.<sup>5</sup> Događaj je postavio mnoga pitanja od kojih su najbitnija:

- a) Je li kambrijska eksplozija biološki događaj ili tvorevina nepotpune fosilizacije?
- b) Postoji li dugotrajna skrivena prošlost Metazoa prije pojave u fosilnim ostacima?
- c) Što je bio najveći „okidač“ koji je potaknuo eksploziju?
- d) Koja je povezanost između kambrijske eksplozije i formacije „drva životinja“ (Tree of Animal – TOA)?<sup>12</sup>

Još nisu utvrđene granice trajanja kambrijske eksplozije jer se na temelju novih nalazišta i njihovih analiza taj period uglavnom vremenski smanjuje što povećava ekstremnost samog događaja. Prije pedeset godina smatralo se da je kambrijska radijacija životinskog svijeta trajala oko 100 milijuna godina, što se zaključilo na temelju stratigrafskih istraživanja nalaza prve pojave trilobita (Marocco). Pronalazak prvih graptolita smanjio je razdoblje trajanja na 30 milijuna godina. Prema geološkom vremenu, frekvencija radijacije raznolikosti životinja u kambriju je dvadeset puta veća od cijelog mezozoika.<sup>9</sup>

Uglavnom se uzima srednja vrijednost trajanja od približno 50 milijuna godina. U kambrijskoj eksploziji dogodila su se tri veća evolucijska skoka; u edikarijanskom razdoblju, periodu Meishuchuan i Quangzusian.<sup>12</sup>

Većina pronađenih grupa *phyla*, prema fosilnim ostacima, sadrži mali broj vrsta što ukazuje na nedavno podrijetlo (možda već i po etkom edikarianskog razdoblja).<sup>7</sup>

Eldredge i Gould (1972) predložili su model evolucije koja bi odgovarala kambrijskim događajima. Pojavljivanje brzih promjena u kratkom vremenu nazvali su punktuacijom. Punktuacija je proizvod specijacije i nagli je odgovor na novonastale uvjete dok se organizam ostatak vremena ne mijenja. Ovo pravilo nije primjenjivo na sve organizme, ali se ne može zanemariti.<sup>13</sup>

**Tablica 1.** Geološka skala vremena kraja prekambrija i ranog kambrija bitnih za kambrijsku eksploziju. Imena razdoblja su prema kineskoj i ruskoj podjeli. Preuzeto i prilagođeno na temelju literturnih izvora<sup>7, 15.1 i 15.7</sup>.

PALEOZOIK		KASNI		
KAMBRIJ (544-500 mil.god.)		SREDNJI		
RANI		longwangmiaoan	toyonian	513-510 mil.god.
		changlapanuan	botomian	520-513 mil.god.
		quangzusian	atdabanian	527-520 mil.god.
		meischuan	tommotion	530-527 mil.god.
			manacayan	544-530 mil.god.
PREKAMBRIJ		edicarian (vendian) (650-544 mil.god.)		

## 2.1. EDIKARIANSKA FAUNA

Edikarianska fauna veoma je različita od kambrijske. Ime je dobila prema nalazištu Ediacara Hills na jugu Australije iako to nije bilo prvo mjesto gdje je pronađen fosil edikarianske faune. Prije nalaza u Australiji, edikarianski megafosil pronađen u gradu Leicestershire u Engleskoj se dugo smatrao anorganskim. Većina autora smatra kako su to bili višestanići organizmi mekog tijela bez prepoznatljivih ljuštura. Najranije opisan fosil edikarianske faune potječe iz 1872. godine. To je *Aspidella terranovica* (Sl. 2.), a opisao ju je E. Billings iz Newfoundlanda.

Fosili organizama i tragova edikarianske faune pronađeni su na svim kontinentima osim Antarktika. Neka od važnijih nalazišta su: Edicara Hills, Charnwood Forest, Leicestershire of

England; Namibija; Bijelo more, Sibir; Newfoundland, isto na Kanada; brojni lokaliteti u Australiji i značajni u Kini.<sup>12</sup>



**Slika 2.** *Aspidella terranovica*.<sup>15.1.</sup>



**Slika 3.** *Cloudina sp.*<sup>15.7.</sup>

Na temelju fosila mogu se uočiti šest različitih tipova okoliša koje nastanjuju: dubokomorska staništa, plitka morska deltna uša, plitke ravne obale, plitkovodna područja uvana u sedimentnim stijenama, duboka mirna morska staništa naseljena makroskopskim bentim i algama i biominerализirani tip *Cloudina sp.* na karbonatima (Sl. 3.).

Tradicionalno se shvaće organizacijskog sustava edikarianske faune po kojem se brojni nalazi fosila edikarianske faune ne mogu svrstati u postojeće skupine životinja, jest ono po kojemu neki organizmi pripadaju izumrlom koljenu Petalonamae. Seilacher ih izdvaja pod nazivom Vendobionta i smatra ih „neuspjelim eksperimentom“ u evoluciji života, ali prihvata mogunost da su pronađeni tragovi fosila od bilateralnog metazoa, što dovodi do zaključka da neki kambrijski organizmi potječu iz edikarskog razdoblja. Seilacher smatra da su se vendobionti prehranjivali kemosimbiozom (na način da ih je bakterija opskrbljivala energijom i nutrijentima) ili fotoautotrofijom što bi znalo da su u sebi sadržavali jednostani ne fotosintetičke alge. Ovo razmišljanje opovrgnuto je pronaštom *Pteridinium* u dubokomorskim sedimentima gdje fotosinteza nije moguća.

Rekonstrukcija drva života (Tree of Life - TOL) na temelju tradicionalne morfološke, molekularne i paleontološke metode, dovela je do podjete života na tri domene: Archaea, Bacteria i Eukarya. Istim metodama TOA je podijeljeno na tri podcarstva: Diploblasta, Protostomia i Deuterostomia, iju su podjelu uvjetovala četiri važna događaja: rana radijacija Metazoa, pojava bilateralnih organizama, pojava deuterostoma i kralješnjaka.<sup>12</sup>

Pojava višestanih organizama datira od prije 570 milijuna godina (Kina). Metazoa su pronađeni kao milimetarski ihnofosili zbog početka interakcije organizama i sedimenta

(ukopavanje). Edikarianski fosili u Australiji duga ki su oko 43 cm (*Dickinsonia rex*) kojom se potvr uje postojanje velikih organizama u to vrijeme (Sl. 4.).<sup>6</sup>



**Slika 4.** *Dickinsonia rex*.<sup>15.13</sup>

## 2.2. KAMBRIJSKA FAUNA

Nakon edikarianske faune, u ranom kambriju bujaju novi i „dora eni“ organizacijski sustavi životinja. To se smatra najve om radijacijom živoga svijeta. Najviše fosila dolazi iz meishucunianske faune.<sup>12</sup>

Kambrijska fauna zapo inje pojavom fosila *Treptichnus pedum* prije otprilike 543 milijuna godina. *T.pedum* (Sl. 5.) je crvolika životinja koja se najvjerojatnije ukopavala u sediment. Ne zna se kako je to no izgledala. Po evši s tim organizmom, zapo inje pronalazak ve eg broja organizama s ljušturama i ve ih dimenzija.<sup>14</sup>



**Slika 5.** *Treptichnus pedum*.<sup>15.10</sup>

Teško je rekonstruirati faunu najranijih Metazoa jer današnji organizmi koji imaju tvrdi skelet ine tek desetinu živoga svijeta. Za postojanje mnogih organizama, zbog nemogu nosti fosilizacije, nikada ne smo saznati.<sup>12</sup>

Prvo nalazište kambrijske faune je ve spomenuti Burgess Shale u Kanadi. Tamo se nalaze stijene tipi ne za srednji kambrij. Slobodnoplivaju i organizmi (nekton) prona eni su u malom broju, dok ve inu fosila ine benti ki organizmi u jednakom broju sesilni i pokretni. Gotovo dvije tre ine životinja koje su tamo živjele hranile su se organskim tvarima koje su pronalazile u muljevitom tlu, a približno jedna tre ina bili su filtratori. Ostatak od manje od 10% bili su predatori ili strvinari.<sup>12</sup>

Prvi opisani fosil iz Burgess Shale nalazišta je *Marella sp.* Iako je bilo o ito da je lankonožac, razlikovao se od svih do tada poznatih morskih lankonožaca po strukturi nogu i škrga, kao i u broju privjesaka na glavi.<sup>14,3</sup> Osim najranijih metazoa, prona eni su i organizmi bez vrstih struktura poput vrste *Thaumapton sp.* (Diploblasta), razli iti ramenonošci i vrste koljena Priapulida (Protostomia), bodljikaši i mogu i svitkovac *Pikaia sp.* (Deuterostomia).<sup>12</sup>

Najve a vrijednost nalaza Chengjiang fauna kambrijskog razdoblja u Kini su fosili vrste *Haikouichthys sp.* koja kasnije dobiva naziv *Myllorunmingia sp.* (Sl. 6.). Kod nje su prona ena obilježja kralješnjaka poput dorzalne i ventralne peraje, škržni otvori i škržni lukovi, miomere u obliku slova W, svitak i perikardijalna šupljina. Nalaz je popularno bio nazivan kao „ulov prve ribe“. Nakon ovog nalaza uslijedili su pronalasci brojnih drugih Cephalochordata, Urochordata, mogu i preci Hemichordata – Vetulicolia i Yunnanozoa.



**Slika 6.** *Myllorunmingia sp.*- „prva riba“. Preuzeto i prilago eno na temelju <sup>12</sup>.

Posebnost kambrijske faune predstavlja mnogobrojna pitanja koja se trebaju analizirati uz pomo molekularnih metoda ili pronalaskom novih fosila kako bi se popunjavaala prazna mjesta na filogeneti kim stablima.<sup>12</sup>

### 3. POVIJESNI PREGLED

Nekoliko geologa primijetilo je kako se u jednom trenutku Zemljine prošlosti dogodila dramati na promjena u prona enim fosilima, me u njima najzna aniji bio je William Buckland (1778. –1856.). Bavio se kemijom i mineralogijom te je prou avao mnogobrojne fosile amonita i dinosaura, ali i prapovijesne ihnofosile i koprolite (Sl.7.). Bio je primjer mnogima kako se detaljno mogu raditi znanstvene analize i rekonstruirati doga aji davne prošlosti. Svoja opažanja o iznenadnoj pojavi mnogobrojnih organizama sažeо je u knjizi „*Geology and mineralogy considered with reference to natural theology*“ (1836).<sup>15.6</sup>

Nakon objave Darwinova rada zapo inju sve eš e rasprave o doga ajima na po etku kambrija. Godine 1948. ameri ki paleontolog i geograf Preston Cloud (1912.-1991.)<sup>15.5</sup> ovom doga aju dodijeljuje naziv „kambrijska eksplozija“ koji se zadržao do danas (Sl.8.).<sup>12</sup>



**Slika 7.** William Buckland (1778. –1856.).<sup>15.6</sup>



**Slika 8.** Preston Cloud (1912.-1991.).<sup>15.5</sup>

## 4. FILOGENIJA

Filogenija je znanstvena disciplina koja proučava razvitak živih bića kroz Zemljinu prošlost i njihove srodstvene odnose, a može se iskazati filogenetskim stablima. Filogenetsko stablo pokazuje evolucijske odnose između raznih vrsta ili različitih taksonomskih skupina za koje se prepostavlja da imaju zajedničke pretke.

Molekularna istraživanja dovela su do zaključka kako je kambrijska eksplozija kumulativan sljed povećanja frekvencija inovacija, tzv. ključnih inovacija. Kladističkom analizom filogenetskih odnosa izumrlih fosilnih Arthropoda s današnjim vrstama pokazala su kako većina njih može svoje karakterne osobine (kao i ključne inovacije) od matične linije dovesti do živih životinja. Npr. divovski predator *Anomalocaris sp.* pokazao je visoku srodnost grupi koja se smatra primitivnom sestrinskom grupom Arthropoda (Sl. 9. i 10.).

Zanimljivo je kako su trilobiti već zauzimali različita geografska područja, što zahtjeva raniju kladističku diverzifikaciju od prvog pojavljivanja u fosilima. Najvjerojatnije je da je diverzifikacija nastala prije, moguće u prekambriju te bila nepoznate duljine trajanja. A kambrijsku eksploziju doživljamo kao eksploziju zahvaljujući i ubrzanim razvitetu skeleta koji je omogućio fosilizaciju.



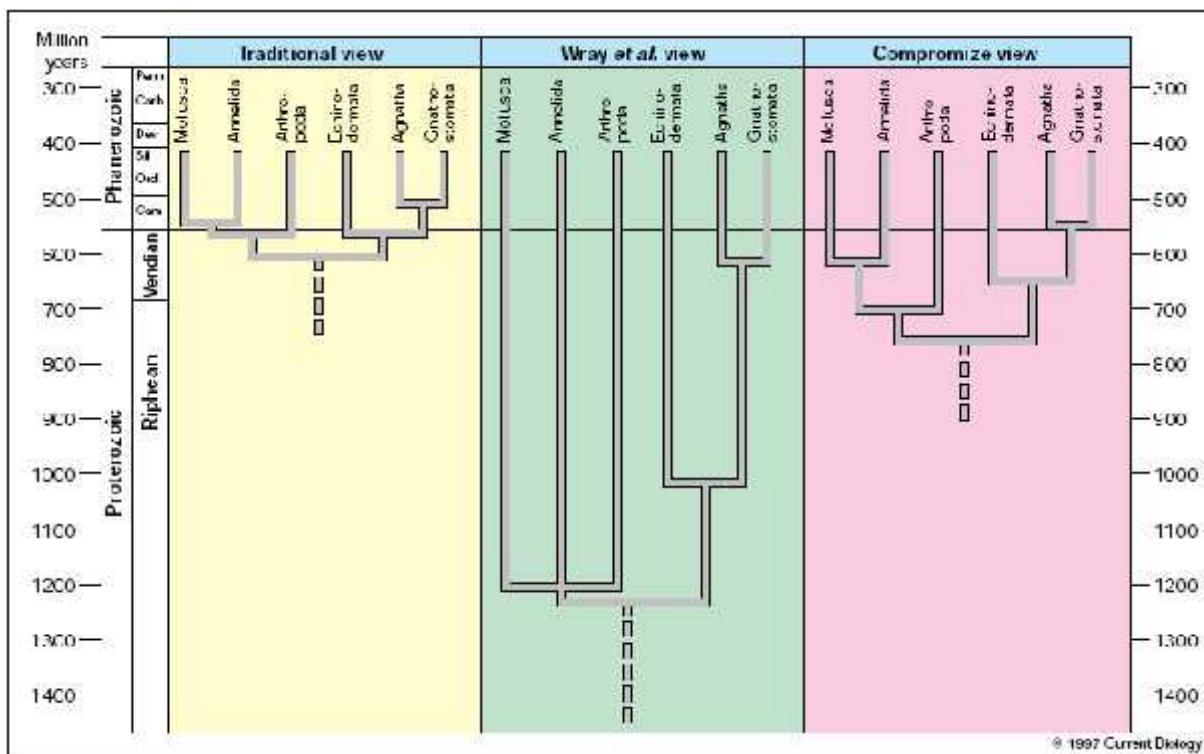
**Slika 9.** Umjetna rekonstrukcija vrste *Anomalocaris sp.*<sup>15.8</sup>



**Slika 10.** Fosil vrste *Anomalocaris sp.*<sup>15.12</sup>

Kambrij je vremenska granica od koje počinje razvitak skeleta, povećanje veličine i povećanje fosilizacijskog potencijala. Time o precima kambrijskih organizama možemo

zaključiti samo na temelju kladističkih analiza. Na Slici 11. prikazana su tri filogenetska stabla. Prvo prikazuje tradicionalno shvaćanje na temelju fosilnih dokaza gdje se sva razgranjenja dogodaju na kraju edikarianskog razdoblja i po etkom kambrija. Drugi prikaz je filogenetsko stablo temeljeno na Wreyevim molekularnim satovima koji indiciraju postojanje dubokih korijenja prvog pretka metazoa. Treće stablo je kompromisno rješenje između prva dva.<sup>1</sup> Wreyev model ukazuje na to kako se prava eksplozija dogodila puno prije kambrija, a ono pronađeno u fosilima samo je odjek te bitne, ali nama zagonetne diverzifikacije života.<sup>3</sup>



**Slika 11.** Tradicionalni, Wreyev i kompromisni modeli filogenetskog stabla za datiranje prvog zajednog pretka metazoa.<sup>3</sup>

## **5. UZROCI**

### **5.1. RASPAD SUPERKONTINENTA**

Kambrijsko i predkambrijsko razdoblje popravno je ekstremnim uvjetima: Zemlja je u pokretu, njena kora, plašt, oceani i atmosfera s fluktuacijama ugljika i temperature (-40°C do +40°C). Po etak kambrijskog razdoblja obilježen je raspadom superkontinenta Rodinia (Sl.12.) koji je sadržavao većinu Zemljina kopna u razdoblju prije 1100 do 750 milijuna godina. Tektonske promjene dovele su do povećane vulkanske aktivnosti. Mnogobrojnim erupcijama, u atmosferi su završile ogromne količine dima, prašine i plinova od kojih je najzastupljeniji ugljikov dioksid koji nije znatno udio staklenih plinova. Nema sumnje da su te promjene utjecale na tadašnji živi svijet. Novonastali uvjeti omogućili su izumiranje, odnosno preživljavanje pojedinih vrsta.<sup>10</sup>

Pomicanje tektonskih ploča rezultiralo je promjeni i stabilizaciju oceanskih struja koje dovode kisik u dublja područja oceana i mora. Povećanje broja područja obogaćenih kisikom pogodovali su razvoju većih organizama i višestanih vrsta.<sup>11</sup>

Za vrijeme kambrija kopno je bilo raspoređeno po cijeloj Zemlji, takva izolacija omogućila je razlike evolucijske pravce, što je znatno za biogeografiju tog razdoblja. Kopno nije nakon raspada neće mirovati, prije 250 milijuna godina dolazi do formacije novog superkontinenta Pangeae. Uz razdoblja glacijacije, ovi su procesi uzrokovali brojna „uska grla“ i izumiranja.<sup>15,4</sup>

Jednim od problema prilikom razjašnjavanja događaja kambrijske eksplozije smatraju se mnogobrojni fosili istih vrsta koji su se gotovo istodobno pronađeni na različitim dijelovima Zemlje. Mnogi znanstvenici se slažu kako su se razvijali na superkontinentu Rodinia te su njegovim raspadom nastavljeni svoj razvoj izolirani jedni od drugih.

Na primjer, ustanovilo se da su trilobiti podrijetlom s područja Sibira (prije 580 mil. god.), podgrupa Redlichiidae završila je u Mawson oceanu, a Olenellida na rubu Iapetan i Mirovian oceansa koji su međusobno dosta udaljeni. Ovime se ide u korist teorije da je kambrijska eksplozija zapravo bila 50-70 mil. g. prije svog pojavljivanja u fosilima.<sup>11</sup>

## **5.2. POVIŠENJE KONCENTRACIJE KISIKA**

Kambrijski su organizmi najvjerojatnije bili maleni, slični današnjim ili inkama planktona. Moguće je da je izgradnja većih organizama i tvrdih dijelova tijela bila potaknuta povišenjem razine kisika. Vjerojatno je postojala razina kisika koja je prije toga spriječavala rast skeletnih dijelova. Prelaskom te granice organizmi su bili sposobni evolucijski napredovati.

Razina kisika se povećava tijekom predkambrijskog razdoblja zahvaljujući fotosintetskim organizmima. Većom koncentracijom kisika moguće je se zadovoljavati potreba većih organizama za prijenos kisika između okoliša i unutrašnjeg metaboličkog tkiva. Također, veća koncentracija kisika moguće je sintezi kolagena za formiranje vrstih struktura ljuštura, kutikula ili akcijskih mišića.<sup>15,11</sup>

## **5.3. OSCILACIJE KONCENTRACIJE UGLJIKA**

Unutar velike kambrijske slagalice još jedna od zagonetki jest stalna i uestala oscilacija ugljikova dioksida. Stratigrafskim datiranjem  $^{13}\text{C}$  otkriven je nagli pad ugljika koji korespondira s pojmom vrste *T.pedum*. Nakon toga slijedi rast u koncentraciji prekinut s nekoliko oštrih padova kako bi došlo do etaka razdoblja tommotian došlo do naglog rasta. Nekoliko daljnjih oscilacija, rast u srednjem i gornjem kambriju, govore kako je trajanje pojedinog rasta ili pada bilo od nekoliko stotina do milijuna godina. U drugim razdobljima najkratke oscilacije su trajale 15 do 20 milijuna godina.<sup>9</sup>

Gledajući individualno, primjećuje se kako je svaki nagli pad ili rast, u vezi s biološkom evolucijom. Prvi pad razine ugljika prven je pojmom vertikalnog ukopavanja organizama u sediment. Smatra se kako je sediment ranog kambrija bilo glinovito i vrsta te je bilo potrebno mnogo energije da ga se probije.<sup>4</sup> Nadalje, porast je popravljen radijacijom makušaca. Primjećen je manji porast kroz tommotiansko razdoblje s pojmom lankonožaca, bodljikaša i Archaeocyatha, životinja nalik današnjim spužvama koji izumiru krajem tommotiana kada se javlja i nagli pad ugljika.

Nije sigurno kako ove specifične promjene u koncentraciji ugljika utječu na živi svijet. Prva hipoteza kaže da su ciklusi ugljika pod utjecajem povećanja i smanjenja biosfere, a druga da su oni odgovor na velike klimatske i geološke promjene Zemljine površine, a biosfera odgovara na takve podražaje. Iz ovoga nije moguće zaključiti koji bi to bio imbenici utjecali na prirodni odabir.<sup>9</sup>

#### **5.4. LEDENA DOBA**

Ledinim dobom se smatra ono razdoblje u kojem postoje dijelovi Zemljine površine koji su stalno pod ledom. Prema tome, i danas se Zemlja nalazi u ledenom dobu, tj. me uledenom dobu – razdoblju zatopljenja. U kasnom proterozoiku Zemlja je bila dva puta smrznuta, to su Marionan i Sturtian razdoblje. Glacijacija je trajala milijunima godina dok CO<sub>2</sub> nije stabilizirao albedo odbijaju i dio Sun eve radijacije.

Dvije spomenute glacijacije uzrokovale su takvo zahladnjenje da je Zemlja bila zale na ekvatorskim širinama do razine mora što ju je u inilo nalik ogromnoj snježnoj grudi (Snowball Earth). Smatra se kako je topljenje bilo popra eno lomljenjem ledenjaka i odnošenjem materijala u oceane. Takvo bogatstvo nutrijenata vjerojatno je omogu ilo razvoj edikarianske faune koja prethodi kambrijskoj eksploziji. Nutrijenti su se nagomilali u plitkoj foti koj zoni i pogodovali razvoju raznolikosti živog svijeta omogu ivši precipitaciju elemenata i izgradnju vrstih skeleta.

Ovoj teoriji ne suprotstavlja se injenica da se topljenjem ledenjaka povisuje razina mora i onemogu uje stvaranje takvih plitkih foti kih zona. Naprotiv, raspadom superkontinenta Rodinije morska voda se poela uva iti u plašt te je razina morske vode pala. Tada je kopno inilo 30% Zemljine površine.

Postoji teorija kako su se istim procesima nutrijenti nakupljali u kopnenim vodama. Stijene koje okružuju neko jezero mogu su glacijalnim procesima završiti u vodi i promijeniti kemiju okoliša. Metazojskim organizmima poput vertebrata potrebni su Ca, Fe<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub>, P, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, V, Mo i drugi elementi kako bi si izgradili vrste dijelove, a ti elementi su se mogli otapati iz okolnih stijena poput granita. Tadašnja jezera nalikovala su današnjim jezerima afri kog rifta ili Mrtvome moru.<sup>10</sup>

Na kraju, ledena su doba stvarala uvjete koji su za ve inu organizama pogubni, niske temperature i manje hrane. Ali ipak, postoje brojni dokazi o kompleksnim mikroorganizmima koji su u relativno velikom broju nastanjivali „Snowball Earth“, ime možemo potvrditi kako glacijacije nisu bile katastrofalne za živi svijet, ve samo vrlo zna ajne.<sup>2</sup>

#### **5.5. MASOVNA IZUMIRANJA**

Evolucija života nije konstantno pove anje bioraznolikosti. Postoje doga aji koji zna ajno smanjuju broj vrsta, što nazivamo masovnim izumiranjima. Smatra se kako je edikarianska

fauna nestala takvim doga ajem. Biostratigrafski nalazi pokazuju naglu promjenu u svom sadržaju, tako da se time završava jedno, a po inje novo geološko razdoblje. Masovna izumiranja i sli ne promjene podloga su za utvrivanje razdoblja neke ere.

Iznenadan nestanak brojnih vrsta omogu uje preživjelima da popune sada prazne ekološke niše. Nestankom velikog broja predatora i kompetitora, odre ena vrsta e imati mogunost boljeg napredovanja.

Masovnom izumiranju mogu prethoditi brojni događaji, kao što su glacijacija i promjena u geološkoj građi Zemlje. (A zna se kako su u predkambrijskom dobu bili takvi uvjeti.) Nakon izumiranja, uzrok masovnih izumiranja ne pogoduje u potpunosti preživjelim organizmima. Moguće je da zbog pomicanja kontinenata nastaju brojni vulkani koji atmosferu zagađuju brojnim esticama i tako smanjuju Sunčevu radijaciju. Te će posljedice biti dugotrajnije, ali višestani ni organizmi su stabilniji po svojoj strukturi i moguće je da im je to bila prednost koja im je omoguila bujanje u kambrijskom razdoblju.<sup>13</sup>

Znanstvenik Cavalier-Smith polazi od stajališta kako je teško vjerovati da su se novi organizmi mogli brzo razvijati dok su jedina fotosintetizirajuća živa bića na Zemlji bile bakterije, ali pravjenjem filogenetičkog stabla napravljenog na temelju proteina, primijetio je kako su baze životinjskog i biljnog stabla vremenski veoma blizu. Kao što se već spomenulo, u to vrijeme događale su se brojne geološke i klimatske promjene. Zabilježenim oscilacijama ugljika smatra se kako su i oscilacije u fotosintezi u tadašnje vrijeme bile aktualne. Smatra se da se plastid razvio nakon topljenja leda, te nije bilo potrebe za objašnjavanjem o njegovim strategijama preživljavanja. Plastid i formiranje biljnog carstva obogaćivali bi atmosferu kisikom i time potpomogli evoluciju metazoa. Tako er, Cavalier-Smith smatra kako se za vrijeme glacijacije prije 750 do 680 milijuna godina razvio kloroplast, a odgodio razvoj odvedenijih eukariota poput životinja.<sup>14</sup>

## 5.6. KOZMIKO ZRAJENJE

Kineski znanstvenici podijelili su događaje koje prethode kambrijskoj eksploziji u četiri faze. (I) Prije 900-600 milijuna godina Veliki Magellanov oblak, galaksija u blizini naše, prošao je veoma blizu naše galaksije i uzrokovao promjenu u izgaranju zvijezda čime se povećala koncentracija kozmičkog zrajenja na Zemlju. (II) Zbog intenzivnog zrajenja i slabljenja geomagnetizma Zemlju je zahvatilo ledeno doba u više navrata. (III) Razdvajanje superkontinenta uzrokuje upwelling nutrijenata kroz pružanje rasjeda. Na tome mjestu se danas nalazi južna Kina gdje su i pronađeni prvi višestani ni organizmi. (IV) Zrajenje

uzrokuje eše mutacije koje omoguju duplicitanu kopiju gena, razvijajući novu funkciju poput biomineralizacije. (V) Povećanje kisika i okoliš obogaćen nutrijentima omogućuje intenzivniji razvoj kambrijskih životinja.<sup>10</sup>

## 5.7. AKTIVNO U ENJE

Na izraelskom sveučilištu znanstvenici Ginsburg i Jablonka uzrok kambrijske eksplozije ne traže u geološkoj građi ili klimi koja je zadesila Zemlju, već se okređuju u izravnoj ekološkoj povezanosti između predatora i plijena. Za njih je najveća uloga odigrala interspecijski odnos u kombinaciji s promjenom u fiziologiji tadašnjih organizama.

Njihovo polazište je pretpostavka kako su preci kambrijskih organizama bili bilateralni organizmi koji su se razvili u razdoblju prije (za njih nema fosilnih dokaza, ali smatraju kako nisu imali ljuštare koja bi mogla biti sačuvana). Na temelju molekularnih analiza i nekoliko komparativnih metoda, zaključili su kako su bilateralni organizmi „izronili“ tijekom razdoblja edikarianske faune što je uzrokovalo „ekološka i evolucijska pravila“ koja su popratila kambrijsku eksploziju.

Ono što je najteže objasniti jest iznenadna pojava raznolikosti u životinjskom svijetu, takav bilateralan predak trebao je biti okarakteriziran izrazitom plastinom u razvoju, a ta plastina je proizvod samoorganizirajućih svojstava kako reagiraju na promjene u okolišu.<sup>5</sup>

U Tablici 2. mogu se vidjeti neki ekološki i genetički uvjeti koji doprinose kambrijskoj eksploziji. Razvoj aktivnog uenja smješten je među ekološke jer je pod najvećim utjecajem odnosa s drugim vrstama.

Kada se aktivno uenje razvilo, dovelo je do povećanja mozga i diferencijacije i impregnacije među njegovim dijelovima.

Autori ove hipoteze smatraju kako je aktivno uenje važna evolucijska „povratna petlja“ za kambrijsku metazojsku radijaciju. Poboljšanje novih predatorskih vještina povlači za sobom nove i kompleksnije antipredatorske sposobnosti. U prednosti su bili oni koji su imali bolji kapacitet za razvijanje novih vještina. Time objašnjavaju izumiranje organizama edikarijanske faune koja se dogodila u ranom kambriju. Rast u populaciji bilateralnih „sposobnijih“ organizama vjerojatno je desetkovala svoje konkurențe.

Smatra se kako je povećana koncentracija kisika potpomogla razvoju aktivnog uenja pošto je živo tkivo metabolički „skupo“ i zahtjeva puno kisika. Pamjenje uenja omogućuje dulji život u kojem se, povratno, i isplati imati pamjenje. A dulji život može biti

u vezi s pove anjem tijela. Prirodnom selekcijom kapacitet u enja se pove ava i omogu ava nastanjivanje novih niša u kojima se postavljaju novi zakoni selekcije.

Eksplozija novog ponašanja i novih ekoloških prilika koje prate razvoj aktivnog u enja bili bi pra eni eksplozijom novih morfoloških adaptacija.<sup>5</sup>

**Tablica 2.** Razvojni i geneti ki preduvjeti kambrijskih organizama i njihov doprinost dalnjem razvoju.

Preuzeto i prilago eno na temelju literaturnog izvora<sup>5</sup>

UZROK INOVACIJE	DOPRINOSI KAMBRIJSKOJ EKSPLOZIJI
<b>RAZVOJNI/EKOLOŠKI PREDUVJETI</b>	
Makroskopska predacija	Utrka u naoružavanju izme u predatora i plijena dovela je do pojave zakopavanja i evolucije vrstih dijelova tijela.
Evolucija anusa i usmjerenog kretanja	Poboljšanje u razvrstavanju hrane i otpada, anteriono-posteriornog kretanja; dolazi do diverzifikacije Metazoa.
Pojava živ anog sustava	Poboljšane motori ke sposobnosti: u enje je dovelo do ekološke kompleksnosti.
Pojava vizualne percepcije	Mogu nost nastanjivanja novih ekoloških niša.
Kopanje	Miješanje estica tla promijenilo je njegov sastav, to dovodi do recikliranja organske tvari i zakopavanja fosfata i drugih minerala; tako er omogu uje bolju fosilizaciju.
Raširenost aktivnog u enja	Nastanjivanje novih niša, poboljšanje napada i obrane te suradnje me u organizmima, zadobivanje iskustva.
<b>GENETI KI PREDUVJETI</b>	
Neurohormonalni stres koji aktivira epigeneti ku destabilizaciju	Pove ava genetsku varijabilnost, osobito one u mozgu.
Akumulacija microRNA	Pove ava preciznost regulacije gena.
Horizontalni prijenos gena	Dobivanje novih gena, npr. za razvitak vrstih dijelova tijela.
Opsežna hibridizacija	Pove ava sposobnosti genoma i morfoloških mogu nosti; dovodi do pojave li inki.
Duplikacija gena/genoma	Duplicirani geni mogu obavljati novu funkciju.

## **5.8. STRES**

Poboljšano pam enje uzrokovalo je mnoge odgovore na predatorsko i antipredatorsko ponašanje. U takvim slu ajevima jedinka je izrazito koncentrirana na opažanje mogu e prijetnje te u nekim slu ajevima dolazi do pretjerane reakcije. Takvi slu ajevi se nazivaju „princip detektora dima“ u kojima je odgovor bijegom energetski manje zahtjevan negoli suo avanje s „vatrom“. Reakcija je okida mnogih procesa u organizmu koji uklju uju neuroendokrini i imunološki sustav. Izlaganje organizma estim stresnim uvjetima i odgovorima na te uvjete dovodi do destabilizacije.

Mogu e da se takva destabilizacija dogodila u ranom kambriju u samom genomu organizama i dovela do trajne, rasprostanjene i nasljedne promjene u ekspresiji gena u živ anom sustavu i gametama. Utvr eni su dokazi koji govore da stres inducira promjene u nasljednim genima, mijenjaju i mitoti ko, mejoti ko i kromosomsko sparivanje, sprje avaju i popravke mutacija ili ih uzrokovati.<sup>5</sup>

## **6. KAMBRIJSKA EKSPLOZIJA KAO ARGUMENT PROTIV EVOLUCIJE**

Ne postoji to no odre ena brzina evolucije, ve se samo podrazumjeva kako je ona dugotrajan proces postupnih razlika u organizaciji, svojstvima i ponašanju živih bi a. Za kambrijsku eksploziju se smatra da nije spora koliko bi to evolucija trebala biti. Upravo zbog toga ova kambrijska eksplozija upada u o i svojim naglim skokom u evolucijskom procesu. Pojava velikih i glavnih organizacijskih skupina životinja u relativno kratkom vremenu svojom velikom rasprostranjenosti i bez nekih vrših dokaza za njihovo postojanje u vremenu prije, suprotstavlja se Darwinovu objašnjenju da su svi organizmi potekli iz istog zajedni kog pretka.<sup>15.2</sup> Nedosljednost u geološkim zapisima je najve i argument protiv teorije evolucije.<sup>8</sup> Zagovaratelji tog argumenta ne nije u postojanje fosilnih zapisa o životu prije kambrija ve naglašavaju kako je vrijeme za takav skok u naprednosti sustava prema dotadašnjim pravilima prekratko. A nepostojanje dokaza o zadnjem zajedni kom pretku ukazuje na to da ga nema.

Darwin je bio svjestan ove nepodudarnosti sa svojom teorijom, ali smatrao je kako e se napretkom znanosti prona i odgovor na ovo veliko pitanje.

Uzimaju i u obzir kako su fosili jedni od najve ih dokaza za evoluciju, fosili kambrijskog razdoblja gotovo izdajni ki tvrde suprotno. Kako su to injenice, ne smije se zanemariti ni takvo kriti ko razmišljanje.<sup>15.2</sup>

## 7. ZAKLJUČAK

Na temelju predloženih uzroka kambrijske eksplozije može se zaključiti kako ne postoji jedan razlog koji ju je uzrokovaо. Svaki od navedenih imao je svoj udio u nastanku tog doga aja. Među bitnije doga aje stavila bih masovna izumiranja, promjene u atmosferi i tektoniku, dok mi se neka i manje vjerojatnim, poput kozmičkih zračenja koji je najnepouzdaniјa teorija te zahtijeva daljnja istraživanja.

Možda bi bilo zanimljivo provesti postoji li neki kritični uzrok bez kojeg razdvajanje na nove phyle ne bi bilo moguće. Ukoliko je prije 550 milijuna godina došlo do situacije u kojoj se biološki skok u razvoju, bez obzira na abiotične uvjete, *moraće* dogoditi, onda ne bi bilo ni važno nabrajati sve ove teorije. Nadalje, izostankom samo jednog od ovih doga aja, moguće je da bi se evolucija odvijala u nekom drugom pravcu.

Uglavnom smatram kako su svi ovi uvjeti kambrijskog razdoblja i razdoblja koja mu prethode, međusobno povezana: tektonika i glacijacija s izumiranjem, izumiranje s razvojem i u enjem; te ih je teško odvojiti. Zbog toga mislim kako je kambrijska eksplozija, zajedno sa svim ovim podprocesima, zapravo jedan proces koji je omogućio značajan evolucijski događaj.

Na kraju, sa sigurnošću možemo ustvrditi da se kambrijska eksplozija dogodila, budući da se posljedice te eksplozije vidljive i danas u raznolikosti živoga svijeta. Moguće je kako su u tom razdoblju postojanjem sveobuhvatnih pogodnosti, katastrofalnih događaja poput klimatskih i geoloških promjena, ili drugih, poput učenja i povećanja koncentracije kisika, uvjetovali mogućnost razvoja i stvaranja biosfere kakvu danas poznajemo. Za sada je taj događaj jedinstven, ali u budućnosti možda ponovno dođe razdoblje kada će se poklopiti različiti procesi i događaji i omogućiti nastanak novih sustava života.

## 8. LITERATURA

1. Cavalier-Smith, T. The phagotrophic origin of eukaryotes and phylogenetic classification of Protozoa. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **52**, 297 -354 (2002).
2. Conway-Morris, S. The Cambrian “explosion” of metazoans and molecular biology: would Darwin be satisfied? *The International journal of developmental biology* **47**, 505-515
3. Cooper, A. & Fortey, R. Evolutionary explosions and the phylogenetic fuse. *Trends in Ecology & Evolution* **13**, 151-156 (1998).
4. Dzik, J. Behavioral and anatomical unity of the earliest burrowing animals and the cause of the “Cambrian explosion.” *Paleobiology* **31**, 503-521 (2005).
5. Ginsburg, S. & Jablonka, E. The evolution of associative learning: A factor in the Cambrian explosion. *Journal of Theoretical Biology* **266**, 11-20 (2010).
6. Giribet, G. Current advances in the phylogenetic reconstruction of metazoan evolution. A new paradigm for the Cambrian explosion? *Molecular Phylogenetics and Evolution* **24**, 345-357 (2002).
7. Gould, S. *Dinosaur in a Haystack*. (Harmony Books: New York, 1995).
8. Gould, S. *The panda’s thumb: more reflections in natural history*. (Norton: New York, 1992).
9. Kirschvink, J.L. & Raub, T.D. A methane fuse for the Cambrian explosion: carbon cycles and true polar wander. *Comptes Rendus Geosciences* **335**, 65-78 (2003).
10. Maruyama, S. & Santosh, M. Models on Snowball Earth and Cambrian explosion: A synopsis. *Gondwana Research* **14**, 22-32 (2008).
11. Meert, J.G. & Lieberman, B.S. The Neoproterozoic assembly of Gondwana and its relationship to the Ediacaran–Cambrian radiation. *Gondwana Research* **14**, 5-21 (2008).
12. Shu, D. Cambrian explosion: Birth of tree of animals. *Gondwana Research* **14**, 219-240 (2008).
13. Stearns, S. & Hoekstra, R. *Evolution*. (Oxford University Press: New York, 2005).

14. Valentine, J.W., Jablonski, D. & Erwin, D.H. Fossils, molecules and embryos: new perspectives on the Cambrian explosion. *Development* **126**, 851 -859 (1999).
- 15.1. [http://www.ask.com/wiki/Aspidella\\_terranea](http://www.ask.com/wiki/Aspidella_terranea)
- 15.2. <http://www.darwinstodilemma.org/pdf/faq.pdf>
- 15.3. [http://www.en.wikipedia.org/wiki/Burgess\\_Shale\\_type\\_fauna](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Burgess_Shale_type_fauna)
- 15.4. <http://www.en.wikipedia.org/wiki/Pannotia>
- 15.5. [http://www.en.wikipedia.org/wiki/Preston\\_Cloud](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Preston_Cloud)
- 15.6. [http://www.en.wikipedia.org/wiki/William\\_Buckland](http://www.en.wikipedia.org/wiki/William_Buckland)
- 15.7. <http://www.geomuseum.uni-goettingen.de/research/exzellenzinitiative/index.shtml>
- 15.8. <http://www.isaacbickerstaff.wordpress.com/2010/02/06/on-prehistoric-life/>
- 15.9. [http://www.learning.berkeley.edu/astrobiology/dickinsonia.jpg.](http://www.learning.berkeley.edu/astrobiology/dickinsonia.jpg)
- 15.10. <http://www.lpgms.org/newsletters/2008/april.html>
- 15.11. [http://www.sapientfridge.org/cambrian/science\\_papers/Did%20oxygen%20trigger%20Cambrian%201997.pdf](http://www.sapientfridge.org/cambrian/science_papers/Did%20oxygen%20trigger%20Cambrian%201997.pdf)
- 15.12. <http://www.trilobites.info/species.html>
- 15.13. <http://www.ucmp.berkeley.edu/vendian/dickinsonia.jpg>

## **9. SAŽETAK**

Prema fosilnim nalazima, prije 550 milijuna godina došlo je do iznenadne pojave raznih organizacijskih skupina životinja i višestaninosti. Nikada prije kambrija nije zabilježen takav nagli evolucijski pomak. Smatra se da je trajao oko 50 milijuna godina što je, geološki gledano, kratko vrijeme, te je ovaj događaj dobio popularni naziv kambrijska eksplozija.

Cilj seminara je predstaviti brojne teorije kojima se želi objasniti uzrok te eksplozije kao što su pomicanje tektonskih ploča, promijene u klimi i sastavu atmosfere, masovna izumiranja, kozmičke zrake, stres i ekološki uvjeti. Nije moguće izdvojiti niti jedan od ovih imbenika kao glavni uzrok, već se svaki od ovih uvjeta imao svoj udio u nastanku ovog jedinstvenog događaja.

## **10. SUMMARY**

According to the fossil records, there was a sudden appearance of various organizational groups and animal multicellularity 550 million years ago. Such a sudden evolutionary shift has never been recorded before the Cambrian period. It is believed to have lasted about 50 million years, which is a short time, geologically speaking, so this event is popularly called the Cambrian explosion.

Goal of this seminar is to introduce number theories explaining the cause of this explosion such as the movement of tectonic plates, the changes in climate and atmospheric composition, mass extinctions, cosmic rays, stress and ecology. It is not possible to point out anyone of them as a single main cause, while each of these conditions had its part in creation of this unique event.