

UDŽBENICI SVEUČILIŠTA U ZAGREBU
MANUALIA UNIVERSITATIS STUDIORUM ZAGRABIENSIS



Prof.dr.sc. Damir Bucković

eBook

HISTORIJSKA GEOLOGIJA 1

Prekambrij i Paleozoik

Zagreb, 2006.

ver. 31102023



Odlukom Senata Sveučilišta u Zagrebu klasa: 032-01/06-01/32, broj: 380-02/6-06-3, od 14. studenoga 2006., ovom rukopisu odobrava se korištenje naziva *Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu - Manualia universitatis studiorum Zagrabiensis*

PREDGOVOR

eBook ("*elektronička knjiga*") Historijska geologija 1 napisana je prema nastavnom planu predmeta Historijska geologija 1 sa preddiplomskog znanstvenog studija Geologije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Predstavlja prvi dio vrlo opširne materije Historijske geologije, a koji se odnosi na prekambrij i paleozoik.

Knjiga je nastala zbog potrebe studenata geologije Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu za objedinjenim udžbenikom na hrvatskom jeziku koji bi na jednom mjestu dao danas prihvaćene opće spoznaje o razvoju Zemlje i života na Zemlji tijekom prekambrija i paleozoika, a istovremeno i osnovne spoznaje o građi i razvoju gornjopaleozojskih naslaga sa prostora Republike Hrvatske. Ona nije originalno udžbeničko djelo, nego je kompilacija recentnih geoloških spoznaja iz nekoliko suvremenih američkih udžbenika, te iz nekoliko znanstvenih radova hrvatskih geologa koji se bave mlađepaleozojskom problematikom prostora Republike Hrvatske. Namjera ove knjige je omogućiti studentima i svim zainteresiranim čitateljima upoznavanje s glavnim zbivanjima i promjenama kroz koje je prolazila Zemlja od njena postanka do konca paleozoika, a i s onima iz mlađeg paleozoika sa današnjeg prostora Republike Hrvatske. Ovdje izloženo gradivo mjestimice i nadilazi nastavni plan iz predmeta Historijska geologija 1, no pri tome ne smatram da su te dodatne dionice teksta suvišne, nego naprotiv, one korisno mogu poslužiti kao dodatna informacija pri spremanju ispita iz komplementarnih predmeta preddiplomskog i/ili diplomskog studija geologije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Naravno, nemam iluzija da je u ovoj knjizi sveobuhvatno i najispravnije prikazan razvoj Zemlje tijekom prekambrija i paleozoika, te razvoj i građa mlađepaleozojskog prostora današnje Republike Hrvatske, no prednost je upravo ovakvih "*elektroničkih knjiga*" mogućnost lagano izvedivih i čestih nadopuna, dinamikom pojavljivanja novih spoznaja i dostignuća kako u svjetskoj, tako i u domaćoj znanosti.

Vjerujem da će i zainteresirani studenti srodnih fakulteta Sveučilišta u Zagrebu naći u ovoj knjizi niz korisnih informacija i pojašnjenja vezanih za osnove prostorne i vremenske dinamike Zemlje, a s kojom se u manjoj ili većoj mjeri susreću tijekom svojih studija.

Zahvalnost izražavam stručnim recenzentima Sveučilišta u Zagrebu:

dr.sc. Ivanu Blaškoviću, redovitom profesoru u miru Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta,
dr.sc. Zlatanu Bajraktareviću, redovitom profesoru Prirodoslovno-matematičkog fakulteta,
dr.sc. Davoru Paveliću, izvanrednom profesoru Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta,
dr.sc. Draženu Balenu, izvanrednom profesoru Prirodoslovno-matematičkog fakulteta,

koji su detaljnom analizom i nizom korisnih sugestija umnogome poboljšali prvotni tekst ove knjige. Isto tako, veliku zahvalnost dugujem i akademiku Ivanu Gušiću, redovitom profesoru Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, koji je kao "neformalni" stručni recenzent odvojio dosta vremena za čitanje ovog teksta, te dao prve i temeljne primjedbe i sugestije.

U radu na ovoj knjizi podržavala me nada da će ona pridonijeti poticanju i unapređenju nastave geologije na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Ukoliko to bude samo dijelom ispunjeno, onda sve ovo što slijedi u narednim poglavljima ima svoj pravi smisao.

SADRŽAJ

1. UVOD	6
2. POVIJEST HISTORIJSKE GEOLOGIJE	7
2.1. Nicolaus Steno	7
2.2. Abraham Gotlob Werner	8
2.3. James Hutton ("otac geologije")	8
2.4. William Smith	10
2.5. Georges Cuvier	10
2.6. Charles Lyell	11
2.7. Charles Darwin	11
3. METODE HISTORIJSKE GEOLOGIJE	13
3.1. Određivanje relativne starosti dokumenata geološke prošlosti	13
3.2. Određivanje apsolutne starosti dokumenata geološke prošlosti	14
3.2.1. Metode određivanja apsolutne starosti dokumenata geološke prošlosti	15
3.3. Stratotip, geološka vremenska ljestvica i stratigrafska klasifikacija	19
3.4. Interpretacija dokumenata geološke prošlosti	23
3.5. Interpretacija zbivanja u Zemljinoj prošlosti	24
4. HADIJ	26
4.1. Formiranje prve oceanske i kontinentalne kore	29
5. ARHAIK (ARHEOZOIK)	30
5.1. Kratoni i štitovi	31
5.2. Baltički štit	31
5.3. Sibirski kraton	32
5.4. Ostali Zemljini kratoni i štitovi	32
5.5. Arhajske stijene kratona i štitova	34
5.6. Arhajska tektonika	35
5.7. Arhajske pokrovne (sedimentne) stijene	36
5.8. Fosili iz arhajskih stijena	37
5.9. Postanak života	38
5.10. Laboratorijska sinteza života	39
5.11. Mjesto nastanka života	40
5.12. Prokarioti i Eukarioti	41
6. PROTEROZOIK (ALGONKIJ)	43
6.1. Atmosferski kisik i sedimentne stijene proterozoika	43
6.2. Život u proterozoiku	45
6.3. Proterozoik kanadskog štita	49
6.4. Proterozojske oledbe	50
7. FANEROZOIK	52
7.1. Stariji paleozoik (kambrij i ordovicij)	52
7.1.1. Život u starijem paleozoiku	53
7.1.1.1. Tomotijski kat kambrija	53
7.1.1.2. Posttomotijsko razdoblje kambrijskog života	54
7.1.1.3. Život u ordoviciju	57
7.1.2. Paleogeografija kambrija	59
7.1.3. Takonska orogeneza	61
7.2. Srednji paleozoik (silur i devon)	63
7.2.1. Život u srednjem paleozoiku	64
7.2.1.1. More	64

7.2.1.2. Kopno	69
7.2.2. Paleogeografija srednjeg paleozoika	73
7.2.3. Devonsko izumiranje	75
7.2.4. Stari crveni kontinent (Euramerica, Laurussia)	76
7.3. Mlađi paleozoik (karbon i perm)	79
7.3.1. Život u mlađem paleozoiku	80
7.3.1.1. More	80
7.3.1.2. Kopno	82
7.3.2. Permsko izumiranje	87
7.3.3. Paleogeografija mlađeg paleozoika	89
7.3.4. Karbonska ležišta ugljena	92
7.3.5. Evaporiti Ruske ploče i sjeverne Europe	94
7.3.6. Paleozoik Hrvatske	95
7.3.6.1. Stratigrafski slijed gornjopaleozojskih naslaga na Velebitu	96
7.3.6.1.1. Karbon	96
7.3.6.1.2. Perm	98
LITERATURA	101
LITERATURA - DODATAK (Porijeklo slika - izvori)	101
KAZALO	104

1. UVOD

Zemlja je formirana prije oko 4.6 milijardi godina i od onda kruži oko Sunca kao treći planet. Prije oko 300 tisuća godina na Zemlji se razvila vrsta primata nazvana *Homo sapiens*, a koja se od svih ranijih životinjskih vrsta razlikovala veličinom mozga, odnosno iznimnom inteligencijom. Stoga se ona, među ostalim, ubrzo počela interesirati i o postanku i razvoju kako sebe same, tako i o okolišu u kojem je živjela.

Pitanja tipa: "Kako je Zemlja stvorena"?, "Zašto se javljaju potresi"?, "Što se nalazi ispod tla na kojem živimo i ispod dna oceana"?, omogućila su razvoj nove znanosti - geologije, a koja upravo daje odgovore na ta i slična pitanja jer se bavi proučavanjem materije - stijena od kojih je Zemlja i izgrađena, proučavanjem fizičkih i kemijskih procesa koji djeluju na tu materiju, te proučavanjem povijesti Zemlje i njenih stanovnika.

U okviru svih tih proučavanja geolozi pred sebe postavljaju najrazličitije zadatke čije rješavanje zahtijeva znanja iz mnogih područja znanosti. Tako neki proučavaju sastav meteorita i Mjesečevih stijena, neki drugi proučavaju građu planinskih lanaca, mogućnosti potresa, vulkanskih erupcija, ili pak ponašanje ledenjaka, rijeka i podzemnih voda. Za modernu civilizaciju vrlo su bitna i neizostavna otkrivanja i proučavanja ležišta ugljikovodika i rudnih ležišta. Da bi mogli davati odgovore na sva pitanja koja se javljaju tijekom svih ovih proučavanja, geolozi moraju koristiti znanja astronomije, fizike, kemije, matematike i biologije. Po tome je geologija vrlo specifična. Naime, i unutar nekih drugih znanstvenih disciplina potreban je multidisciplinarni pristup istraživanjima, no kod geologije to je svakako najizraženije.

Uobičajeno, geologija se dijeli na dvije velike discipline od koje svaka udružuje niz specijalističkih poddisciplina. Jedna disciplina je Fizička geologija, a druga je Historijska geologija. Porijeklo, klasifikacija i sastav materijala koji izgrađuju Zemlju, kao i procesi koji na njih djeluju, kako na njenoj površini tako i u njenoj unutrašnjosti, objekti su proučavanja Fizičke geologije. S druge strane, porijeklo Zemlje, njena evolucija, tj. promjene položaja kopna i mora, rast i nestajanje planinskih masiva, razvoj biljaka i životinja tijekom Zemljine prošlosti, objekti su proučavanja Historijske geologije.

Historijski geolog proučava vidljivi i opipljivi stijenski "zapis" događanja u prošlosti i mora se u svojim razmišljanjima "vratiti" u prošlost da dokuči uvjete i način njegova nastanka. Prikupljanjem niza podataka iz tog zapisa stvara hipotezu kojom taj zapis nastoji interpretirati, a zatim daljnjim istraživanjima nastoji tu hipotezu i potvrditi.

2. POVIJEST HISTORIJSKE GEOLOGIJE

Počeci historijske geologije sežu daleko u prošlost sve tamo do antičke Grčke. Kao i u drugim znanostima, napredak Historijske geologije temeljen je na stalnoj akumulaciji znanja ranijih generacija istraživača. Među mnogima mogu se izdvojiti Nicolaus Steno, Abraham Werner, James Hutton, William Smith, Leopold Cuvier, Charles Lyell i Charles Darwin.

2.1. Nicolaus Steno



sl.1

Pravim imenom Niels Stensen (1638-1687) (sl.1 - *Nicolaus Steno*), danski liječnik. Na prostorima je sjeverne Italije, kroz istraživanja unutar sedimentnih stijena, ustanovio tri osnovna principa Historijske geologije: princip superpozicije, princip izvorne horizontalnosti i princip izvornog bočnog kontinuiteta.

1) Princip superpozicije - Steno je zaključio da su u neporemećenim slijedovima naslaga najstariji slojevi na početku tog slijeda, odnosno u njegovom donjem dijelu, a najmlađi su u njegovu vrhu (sl.2).

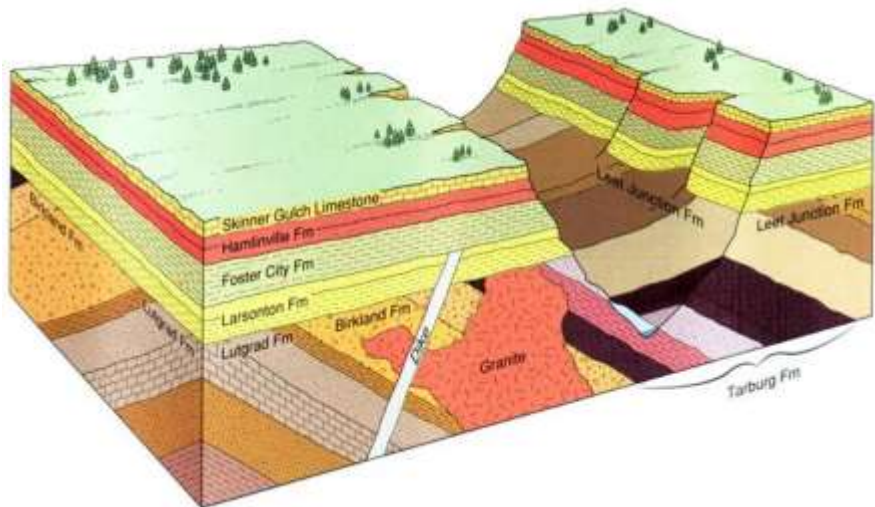
2) Princip izvorne horizontalnosti - Steno je također uočio da su slojevi danas obično nagnuti na jednu stranu, a budući da je poznao zakone fizike, brzo je shvatio da su se čestice koje izgrađuju sedimentne stijene morale taložiti pod utjecajem gravitacije, čime moraju nastati slojevi

koji su barem približno horizontalni, odnosno paralelni površini na koju se talože (sl.2 - *Blok dijagram predstavlja teren sličan Grand Canyon-u*).

3) Princip izvornog bočnog kontinuiteta - Steno je zaključio da se slojevi tijekom taloženja protežu u svim smjerovima i da njihov bočni kontinuitet može prestati tek ili isklinjavanjem na rubovima taložnog prostora, ili nailaskom na neku barijeru koja sprječava daljnje taloženje u tom smjeru, ili pak mogu postupno preći u sloj drugačije građe.

Danas su ovi Stenovi principi ključni za stratigrafiju, koja proučava uslojene stijene, njihove tekture, sastav, međudnose, te ih uspoređuje (korelira)

na širem prostoru (lat. stratum = sloj; grč. grafein = pisati, opisivati). Kako stratigrafija time omogućava geolozima smještanje sedimentnih zapisa s različitih mjesta i pozicija u



sl.2

ispravne slijedove po vremenu njihova nastanka, ona je u stvari osnovni "ključ" za tumačenje povijesti Zemlje.

2.2. Abraham Gotlob Werner

Iako po specijalnosti mineralog, nijemac Abraham Gotlob Werner (1749-1817) (sl.3 - *Abraham Gotlob Werner*) ostao je poznatiji po svom doprinosu u interpretacijama geološke povijesti Zemlje. Werner je zagovarao hipotezu da su sve stijene koje izgrađuju Zemlju nastale iz jednog oceana koji je u najranijem razdoblju postojanja Zemlje prekrivao čitavu njenu površinu. Prema zagovaranju te hipoteze, Werner i svi njegovi sljedbenici poznati su pod nazivom neptunisti (Neptun = rimski bog mora). Taj ocean je, prema Werneru, bio vruć i u njemu su bili otopljeni svi minerali iz kojih su nastale najstarije stijene. Te stijene on je nazvao "prastare stijene" ili "Urgebirge", a danas ih mi poznamo kao magmatske i metamorfne stijene.

Nadalje, prema Werneru, taj se ocean postupno hladio i tada su se taložile sedimentne stijene s mnogobrojnim fosilima. To su bile "prijelazne stijene" ili "Übergangsgebirge" koje su taložene tijekom prijelaznog razdoblja od organizmima nenaseljene, ka organizmima naseljenoj Zemlji. Danas te stijene mi poznamo uglavnom kao paleozojske sedimentne stijene.

Iznad "prijelaznih stijena", Werner je zapazio pojave pločastih pješčenjaka, šejlova, ugljena, fosilifernih vapnenaca i bazalta. Ove stijene, danas uglavnom poznate kao stijene mezozoika, Werner je nazvao "Flötzgebirge". Iznad njih još se nalazio i "aluvij", a koji predstavlja nekonsolidirane pjeske, šljunke i glinu današnjeg pleistocena (ova Wernerova podjela stijena, u stvari, predstavlja prvi početak stratigrafije).

Iako je ovakva Wernerova hipoteza o postanku stijena u prvo vrijeme naišla na velika odobravanja, ubrzo je doživjela kritike. Naime, njegova teorija nije objašnjavala odakle tolika voda koja bi tvorila taj rani ocean koji je prekrivao sve kontinente. S druge strane, još je veći problem bio u činjenici što je Werner smatrao da se bazaltna lava unutar Flötzgebirge-a formirala na isti način kao što su se formirali i vapnenci i šejlovi iz tih naslaga. Tako, bilo je jasno već mnogim Wernerovim suvremenicima da je bazaltna lava ipak bila vulkanskog porijekla. Zagovaratelji te suprotne ideje o nastanku bazalta (i svih ostalih magmatskih stijena), postali su poznati pod imenom plutonisti (Pluton = rimski bog podzemnog svijeta).



sl.3

2.3. James Hutton ("otac geologije")

Škotski liječnik i farmer James Hutton (1726-1797) (sl.4 - *James Hutton*) bio je vatreni plutonist, no osim toga značajan je i po svom doprinosu razumijevanju kako geološki procesi mijenjaju Zemljinu površinu. On je smatrao da je Zemlja dinamično, stalno mijenjajuće

mjesto gdje nove stijene, kopno i planine, stalno nastaju kao ravnoteža njihovoj stalnoj eroziji. Za razliku od Wenera koji je zagovarao statički model Zemljina razvoja, uz tek neznatne promjene od njena nastanka do danas, Hutton je zagovarao ciklički model njena razvoja. Također, uočavanjem struktura valnih brazdi u recentnim obalnim pjescima, te zatim njihovim uočavanjem i u stijenama različite starosti koje danas mjestimice izgrađuju kopno, Hutton je došao do zaključka da se događaji iz Zemljine prošlosti mogu objasniti usporedbom s današnjim događajima, a što je kasnije od strane William Whewell-a nazvano "principom uniformizma". Ovaj je princip geolog Archibald Geike (1835-1924) opisao izričkom "*the present is the key to the past*" ("sadašnjost je ključ prošlosti"). Mnogi geolozi umjesto termina uniformizam radije koriste termin aktualizam kojim kažu da zakoni prirode vrijede i za prošlost i za sadašnjost.



sl.4

No ipak, treba imati na umu da su zbivanja u Zemljinoj geološkoj prošlosti ponekad ili bila drugačija ili su se odvijala u bitno drugačijim uvjetima. Npr.:

- a) na oblikovanje Zemljine površine prije 3 milijarde godina bitnu ulogu su imala stalna meteoritska bombardiranja,
- b) u tim najranijim razdobljima Zemljina postojanja nije bilo atmosfere današnjeg sastava, tako da su se kemijske reakcije na njenoj površini odvijale u drugačijim uvjetima no danas,
- c) život koji je tada postojao morao je biti otporan na djelovanje UV zraka,
- d) nekoliko puta u Zemljinoj prošlosti globalna morska razina bila je znatno niža ili viša nego danas, a što je pak uzrokovalo ili izrazitiju eroziju kontinentalnih prostora, ili pak bitno manju površinu kopnenih prostora nego što je to danas slučaj,
- e) nekoliko puta u Zemljinoj prošlosti bilo je neuporedivo izrazitije vulkanske aktivnosti nego danas,
- f) današnji ledeni pokrovi zauzimaju, s jedne strane, bitno manju površinu, a s druge strane pak, i bitno veću nego što je to bio slučaj u nekim drugim razdobljima Zemljine prošlosti.

Znači sadašnjost jest ključ rješavanja prošlosti, no treba ipak imati na umu da se broj promjena i intenzitet procesa koji su djelovali na Zemlji, najčešće bitno razlikovao od onih kojima mi danas svjedočimo, a također, i da neki od tih procesa nemaju današnjih analoga.

U svojoj knjizi "*Theory of the Earth*" Hutton opisuje kako stijene sadrže zapise događaja iz Zemljine prošlosti i da je Zemlja prošla kroz nekoliko epizoda izdizanja, tj. okopnjavanja, razdvojena epizodama njena preplavlivanja. Prema njemu to je "*Succession of former worlds*" ("*Slijed ranijih svijetova*"), tj. Zemlja se ciklički mijenja u takvom beskonačnom slijedu. Ovaj njegov rad bio je pojednostavljen za čitanje 1802. od strane matematičara John Playfair-a koji ga je nazvao "*Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth*". Hutton je umro 5 godina prije objavljivanja ovih "Ilustracija".

Hutton je na području Škotske prvi opisao i objasnio kutnu diskordanciju (između naslaga silura i devona), a uspješno je i prepoznavao litološki istovrsne naslage na odvojenim područjima koje je istraživao smatrajući ih istovremenim. No ipak, nije bio siguran da li i one

s odvojenih područja koje nisu litološki slične, mogu biti iste starosti. Ovaj problem riješio je William Smith.

2.4. William Smith



Engleski inženjer William Smith (1769-1839) (sl.5 - *William Smith*) u sklopu svog osnovnog posla projektiranja kanala za drenažu močvarnih terena i za transport ugljena od rudnika do luka, istraživao je i kartirao naslage na području Engleske. Tijekom tog rada napravio je i prvu cjelovitu geološku kartu Velike Britanije, a koja je vrlo slična modernoj geološkoj karti Velike Britanije. Uočio je da neke stijenske jedinice sadrže određenu fosilnu zajednicu, a što mu je omogućilo praćenje i prepoznavanje tih jedinica na širem prostoru, pa i onda kada im je litologija bila različita. Ta spoznaja dovela je do uspostave "principa biološke sukcesije" koji kaže da su životne forme iz svakog razdoblja Zemljine prošlosti, karakteristične samo za to razdoblje. Taj princip omogućava danas geolozima prepoznavanje istovremenih naslaga po čitavoj Zemlji, bez obzira na njihovu litologiju. No ipak, Smith nije dokučio zašto stijene iz određenih razdoblja Zemljine prošlosti sadrže baš tako

određenu fosilnu zajednicu, a što je 60 godina kasnije objasnio Charles Darwin.

2.5. Georges Cuvier

Istražujući na prostoru Francuske, Georges Cuvier (1769-1832) (sl.6 - *Georges Cuvier*) i njegov suradnik, botaničar Alexander Brongniart (1770-1847), potvrdili su Smithove zaključke, a također su uočili i da su velike stijenske jedinice često odvojene površinama diskonformiteta, tj. prekida taloženja, nakon kojih u krovinskim naslagama dolazi do dramatičnih promjena u fosilnom sadržaju. Stoga njih dvojica zaključuju da je razvoj života često bivao prekidan velikim katastrofama; ili poplavama ili okopnjavanjima. Takav pogled na razvoj života poznat je pod imenom katastrofizam. Posljednja takva katastrofa bio je "veliki potop" koji je „preživio samo Noa sa svojom arkom“. Prema Cuvieru svaka takva katastrofa rezultirala je potpunim izumiranjem svih organizama, da bi se nakon toga život počeo obnavljati, ali u novim oblicima.

Ipak, neki drugi istraživači iznosili su mišljenje da je razvoj života bio postupan, uniforman, te su se ti zagovornici uniformizma

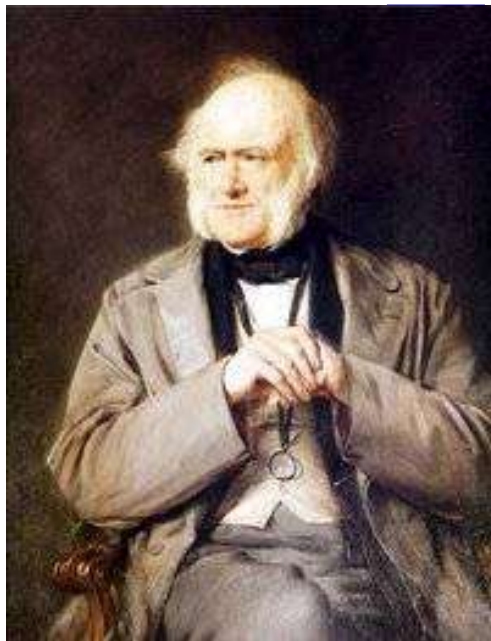


sl.6

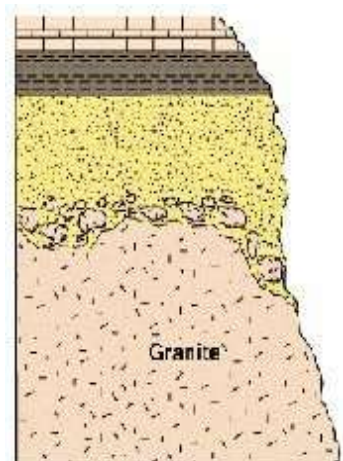
često "sukobljavali" s katastrofistima, kao što je ranije postojao "sukob" neptunista i plutonista. Uniformisti su nasuprot katastrofistima zastupali mišljenje da su nagle promjene u fosilnom sadržaju bile posljedica stratigrafskih praznina, odnosno izostanka dijela naslaga unutar nekog stijenjskog slijeda.

Ipak, Cuvierovo mišljenje o potpunom obnavljanju života nakon svake katastrofe i nije bilo u potpunosti pogrešno. Naime, danas je poznato da je nekoliko puta tijekom Zemljine prošlosti bilo masovnih izumiranja koja su preživjele samo neke skupine organizama.

2.6. Charles Lyell



Početkom 19. stoljeća, engleski geolog Charles Lyell (1797- 1875) (sl.7 - *Charles Lyell*) u svom radu "*Principles of Geology*", u kojem prihvaća ideje Huttona i predstavlja tada najnovija geološka dostignuća. Među ostalim objašnjava i "princip kosog presjecanja" (sl.2) koji kaže da geološki objekt (npr. rasjed, magmatska intruzija) koji presijeca druge stijene mora biti mlađi od njih. Također, Lyell uočava da stijenjska masa koja je u kontaktu s nekom drugom stijenjskom masom, a sadrži njene fragmente (inkluzije), mora biti mlađa od te druge stijenjske mase. To je "princip uklopaka" (sl.8 - *Princip uklopaka*).

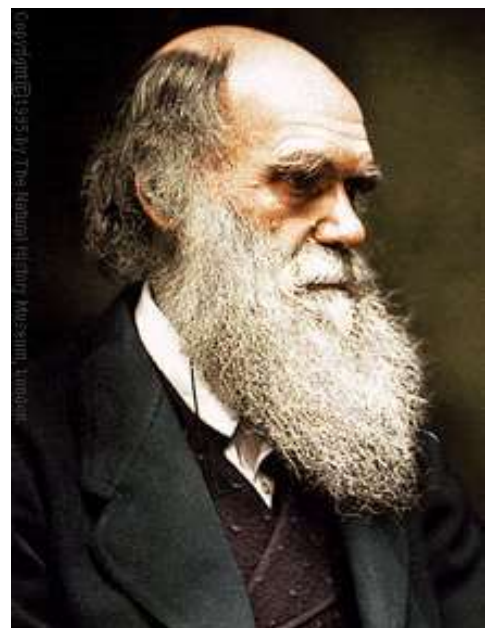


sl.8

sl.7

2.7. Charles Darwin

Kao što je već rečeno, William Smith i njegovi sljedbenici uočili su da sedimentne stijene iz različitih razdoblja Zemljine prošlosti sadrže karakteristične fosilne ostatke, te da se u vertikalnom slijedu naslaga, idući ka sve mlađim nivoima, fosilni ostaci sve više mijenjaju približavajući se izgledom modernim skupinama organizama. Charles Darwin (1809-1882) (sl.9 - *Charles Darwin*) svojom teorijom evolucije temeljem prirodne selekcije, objašnjava zbog čega se to dešava. Naime, Darwin je u svom radu "*On the Origin of Species*" (1859) zaključio da sve jedinke jedne generacije organizama ne uspijevaju preživjeti, nego da to uspijevaju samo one koje su svojim tek neznatno drugačijim morfološkim i fiziološkim karakteristikama bolje prilagođene okolišu u kojem



sl.9

žive. Te jedinke preživljavaju i te svoje dodatne osobine prenose na svoje nasljednike, dok ostale jedinke te skupine imaju sve manje potomaka, pa ubrzo izumiru. Kako tada nije bila poznata genetika, Darwin nije znao uzroke nastanka morfoloških i fizioloških različitosti kod pripadnika jedne skupine organizama, iako je ta spoznaja morala biti ključna u njegovoj teoriji. Tek je nakon njegove smrti genetika dala odgovore da do toga dolazi zbog "pogrešaka" u prepisivanju genetskih informacija koje se javljaju u fazi stvaranja novog života, a što onda dovodi do genetskih mutacija i stvaranja tih nekih dodatnih morfoloških i fizioloških karakteristika.

U prvom trenu, nakon svojih istraživanja po svijetu s kojih se vratio 1836., Darwin nije htio objaviti ovu svoju teoriju bojeći se reakcija javnosti, no kada je 1858. svoj rad na recenziju Darwinu poslao Alfred Russel Wallace, Darwin je shvatio da je taj mladi prirodoslovac radeći u Indoneziji došao do istog zaključka kao i on. Stoga je Darwin konzultirajući se s Lyellom odlučio što prije uobličiti svoju teoriju i objaviti je prije Wallacea što je i učinio 1859. U njoj iznosi dvije glavne ideje; 1) organizmi su se razvijali i mijenjali tijekom Zemljine prošlosti, 2) organizmi se mijenjaju temeljem prirodne selekcije. Ova Darwinova knjiga (rad) zbog svojih znanstvenih dosega smatra se jednom od najvećih knjiga (radova) svih vremena.

3. METODE HISTORIJSKE GEOLOGIJE

Stijene s fosilima ili bez njih jedini su dokumenti geološke prošlosti koji su dostupni istraživanju. Zato ih je potrebno proučavati s obzirom na njihovu starost, uvjete postanka i naknadne poremećaje. Time se otkrivaju prilike koje su vladale tijekom pojedinih geoloških razdoblja na užem ili širem prostoru. Budući da su stijene nosioci tragova geoloških zbivanja, potrebno je odrediti njihovu starost. Starost stijena može biti relativna i apsolutna. Relativnom starosti određujemo samo redosljed zbivanja, ali ne i njihovu brzinu, tj. trajanje, dok se apsolutnom starošću preciznije određuje starost minerala koji izgrađuju stijene.

3.1. Određivanje relativne starosti dokumenata geološke prošlosti

U praksi, danas geolog starost naslaga određuje na temelju iskustva prepoznavajući u njima tipične litološke i paleontološke značajke koje su vrlo karakteristične za određena razdoblja Zemljine (geološke) prošlosti. Svrstavanjem naslaga u određene vremenske odsječke Zemljine prošlosti, bavi se znanstvena disciplina stratigrafije koja se zove geokronologija. Njeni začeci sežu još tamo u vrijeme sredine 17. stoljeća kada je danski znanstvenik Nicolaus Steno, proučavajući slijedove sedimentnih stijena u Italiji, prvi definirao osnovne principe stratigrafske geologije, a pomoću kojih se lako može odrediti relativni vremenski slijed taložnih zbivanja u smislu koje su se naslage taložile prije, a koje kasnije. To su:

- 1) Princip originalne horizontalnosti naslaga
- 2) Princip superpozicije.
- 3) Princip originalnog bočnog pružanja

Tridesetih godina 19. stoljeća engleski geolog Charles Lyell u svom je djelu "Principles of Geology" naveo još dva principa:

- 4) Princip kosog presjecanja
- 5) Princip uklopaka

Sve ove principe još su i prije Lyellovih "Principa Geologije", tj. krajem 18. stoljeća, u svom terenskom radu primjenjivali William Smith i njegovi sljedbenici. Dodatno su uočili da neke stijenske jedinice sadrže strogo određenu fosilnu zajednicu, a što im je onda omogućilo praćenje i prepoznavanje tih jedinica na širem prostoru, pa i onda kada je litologija na tim drugim lokalitetima bila različita. Iz toga su izveli:

- 6) Princip biološke sukcesije

koji kaže da su životne forme iz svakog razdoblja Zemljine prošlosti karakteristične samo i upravo za to razdoblje, iz čega onda proizlazi da su se međusobno udaljene naslage s istovrsnim fosilnim sadržajem u stvari taložile istovremeno. Zaključili su da se organizmi razvijaju iz jednostavnijih formi u složenije, tako da su jednostavnije fosilno očuvane životne zajednice starije od složenijih. Do tog su zaključka došli određujući relativnu starost naslaga pomoću osnovnih principa stratigrafije kada su vidjeli da relativno starije naslage uvijek sadrže jednostavniju fosilno očuvanu životnu zajednicu, a mlađe složeniju.

I litološke karakteristike stijena, kao što su npr. boja, lom, kemijski sastav, stupanj dijagenetskih promjena, mogu se iskoristiti za uspoređivanje i određivanje relativne starosti stijena, ali pod pretpostavkom da su jednake ili slične stijene ujedno i istovremene. Međutim, to je nepouzdan postupak ako se na taj način pokušavaju odrediti šire korelacije jer litološka obilježja naslaga ne ovise o vremenu postanka nego o mjestu i uvjetima u kojima su nastale.

Konceptom određivanja redosljeda naslaga relativnim datiranjem, odredio se samo slijed taloženja, odnosno zbivanja u Zemljinoj prošlosti (što je bilo prije, a što poslije), a ne i točno vrijeme prije koliko godina su se ta zbivanja dešavala.

Za odredbu "točnog" vremena kada su se neke stijene formirale, trebalo je pričekati početak 20. stoljeća, odnosno otkriće radioaktivnosti, čime su geolozi dobili svojevrsan "sat" pomoću kojeg se to vrijeme moglo točno odrediti. Tako, u 20. stoljeću svaka je izdvojena jedinica već tada postojeće geološke (relativne) vremenske ljestvice, dobila svoj točan vremenski okvir u Zemljinoj prošlosti izražen u brojevima godina, odnosno postalo je jasno prije koliko je milijuna godina u Zemljinoj prošlosti pojedina jedinica geološke vremenske ljestvice započela, a prije koliko je godina završila.

3.2. Određivanje apsolutne starosti dokumenata geološke prošlosti

Još od vremena Huttona, znanstvenici su bili svjesni činjenice da je Zemlja znatno starija od približno 6000 godina kako je to učila biblija. No ipak, ti najraniji geolozi na tadašnjem su nivou znanosti mogli jedino promatranjem trajanja recentnih procesa u prirodi kalkulirati i o trajanju istovrsnih procesa u geološkoj prošlosti.

Tako npr. određujući trajanje evolucije nekih vrsta morskih mekušaca tijekom pleistocena, Lyell je pokušao procijeniti i trajanje evolutivnog razvoja njihovih predaka od početka kenozoika, čime je nastojao dobiti vrijeme početka kenozoika. Došao je do rezultata od oko 80 milijuna godina, a što je, s obzirom na metodu istraživanja, bilo i prilično točno.

Neki drugi geolozi smatrali su da je dovoljno, da se debljina nekih naslaga samo podijeli s iznosom prosječne godišnje brzine taloženja u današnjim uvjetima, čime se može dobiti vrijeme taloženja tih naslaga. No ipak, naslage geološke prošlosti često su u znatnoj mjeri bile erodirane, ili su pak bile metamorfozirane, ili su pak bile konzumirane u zonama subdukcija, pa su takvi proračuni za starost čitave Zemlje davali rezultate raspona od 1 milijuna do nešto preko 1 milijarde godina.

Još jedan pokušaj za odredbu starosti Zemlje razradio je Edmund Halley (1656-1742) (koji je ipak poznatiji po kometu). On je smatrao da su Zemljini oceani nastali neposredno nakon nastanka Zemlje, a čime su bili tek neznatno mlađi od nje. Ti oceani prvotno nisu bili slani nego su to postali tek nakon što je sol u njih bila donešena trošenjem s kopna. Stoga, ako se zna današnja ukupna količina soli u oceanima, a i godišnji unos soli u njih, lako je izračunati starost Zemlje. Ovu Halleyevu ideju u praksi je 1899. isprobao irski geolog John Joly. Poznavajući salinitet oceana, volumen vode sadržan u njima i godišnji unos soli u oceane, temeljem formule "količina soli u oceanima/godišnji unos soli u oceane", dobio je rezultat od 90 milijuna godina.

Joly je znao da taj podatak nije točan jer je bio svjestan da su elementi koji tvore soli bili vezani u različitim mineralima gлина, dio ih je bio vezan u kopnenim evaporitima, a dio je bio donasan s kopna iz ranijih marinskih sedimenata itd. Ipak, ove proračune su podržavali mnogi geolozi jer su oni jasno pokazivali da starost Zemlje iznosi preko nekoliko desetaka milijuna godina, a što je bilo i u skladu s razmišljanjima mnogih biologa kojima je tako velika starost bila potrebna da mogu objasniti dugotrajne evolutivne promjene živog svijeta geološke prošlosti, a koje su jasno vidljive u fosilnom sadržaju stijena.

Mišljenje geologa i biologa o velikoj starosti Zemlje zainteresiralo je i fizičare. Tako je William Thomson, kasnije poznat kao lord Kelvin, vodeći fizičar 19. stoljeća, pokušao odrediti starost Zemlje na temelju vremena koje je bilo potrebno da se Zemlja ohladi iz prvotno užarenog i otopljenog do današnjeg stanja. Temeljem svojih proračuna došao je do spoznaje da je za to bilo potrebno vrijeme od 24 - 40 milijuna godina. Geolozi i biolozi s tim se njegovim rezultatima baš i nisu slagali, ali ništa nisu mogli protiv njegovih egzaktnih fizikalno-matematičkih proračuna, dok su oni svoja mišljenja temeljili jedino na nepotpunim i netočnim proračunima, a što je i njima bilo vrlo jasno.

Tako je tek otkrićem radioaktivnosti (Henri Becquerel, 1896) dobiven alat za točnu odredbu starosti stijena od kojih je građena Zemlja. No ipak, teško je odrediti potpuno točnu - apsolutnu starost, a to zbog manjih ili većih nesavršenosti pri samim metodama mjerenja. Stoga je bolje reći radiometrijska starost.

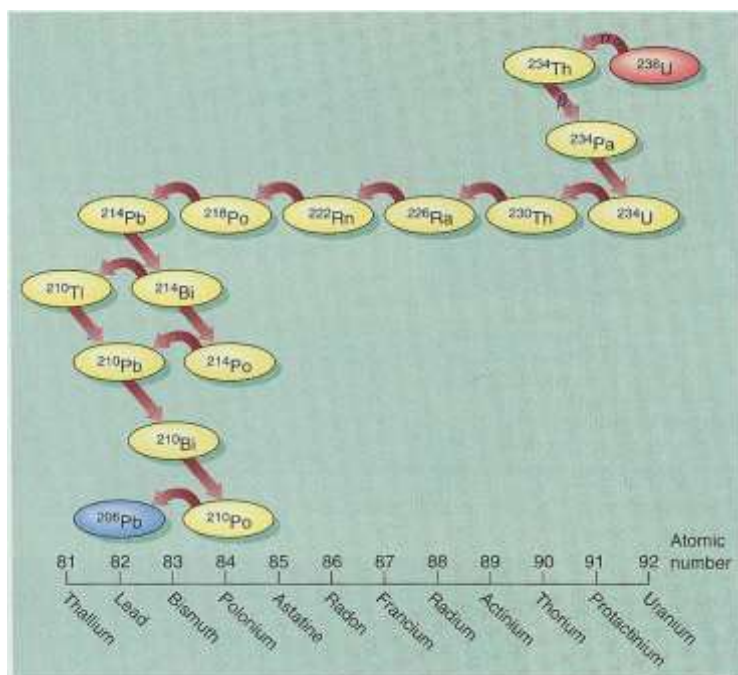
3.2.1. Metode određivanja apsolutne starosti dokumenata geološke prošlosti

Radioaktivnost je pojava kada se nestabilni (radioaktivni) izotopi raspadaju na atome manjeg atomskog broja (broj protona u jezgri atoma), odnosno atomske mase (zbroj protona i neutrona u jezgri atoma). Izotopi su atomi nekog kemijskog elementa koji se po atomskoj masi razlikuju od drugih atoma tog elementa jer u atomskoj jezgri imaju drugačiji broj neutrona. Većina kemijskih elemenata smjesa je različitih izotopa, a samo 23 kemijska elementa nemaju nikakve izotope. Izotopi mogu biti stabilni ili pak nestabilni (radioaktivni) kada se raspadaju. Svi kemijski elementi teži od olova u periodnom sustavu su radioaktivni, te se postupno raspadaju, tako da u dalekoj budućnosti na Zemlji više neće biti kemijskih elemenata atomskog broja višeg od olova (82). Do raspada radioaktivnih izotopa dolazi povremenim emitiranjem čestica kao što su alfa i beta čestice, te gama zračenje.

Alfa čestice su u stvari pozitivno nabijene jezgre helija. Atomska im je masa 4, a atomski broj 2. Emitiranjem alfa čestice novi atom će zadobiti manji i maseni i atomski broj. Beta čestice predstavljaju elektrone koji nastaju u jezgri atoma raspadom neutrona na proton i elektron. Pri tome nastaje dodatni proton čime se povećava atomski broj elementa, no masa mu ostaje ista. Gama zračenje je elektromagnetsko zračenje atomske jezgre, čime se mijenja njeno energetska stanje.

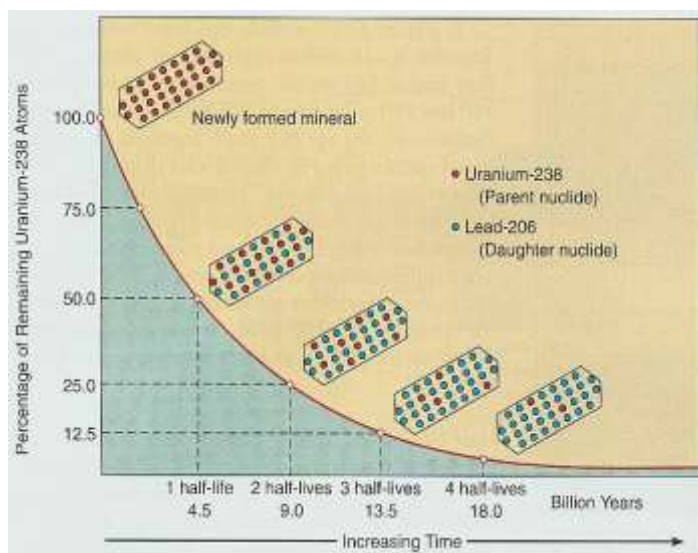
Brzina radioaktivnog raspada nekog kemijskog elementa je stalna i ne ovisi o nikakvim vanjskim faktorima (pritisku, temperaturi, kemijskom okruženju) jer se odvija na nivou atomske jezgre i kao takva nije im podložna, a svaki radioaktivni element ima svoj karakteristični način i brzinu raspada (sl.10 - Radioaktivni raspad serije ^{238}U - ^{206}Pb).

Tijekom vremena, radioaktivnim raspadom količina prvotnog elementa u stijeni postupno opada, a povećava se količina od njega nastalog novog elementa. Vrijeme početka raspada nekog elementa,



sl.10

sl.11



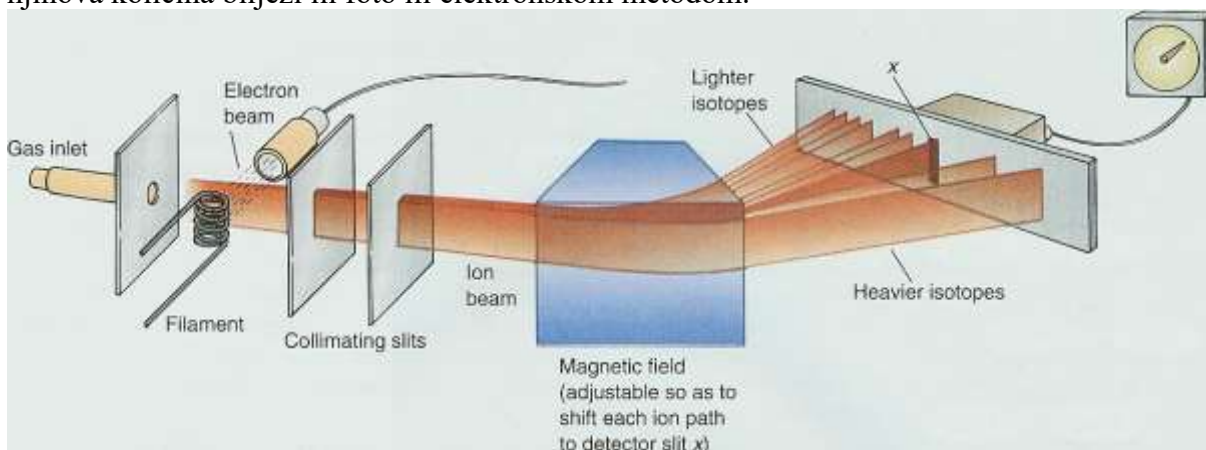
odnosno vrijeme nastanka neke stijene koja sadrži taj radioaktivni element, moguće je odrediti poznavanjem vremena njegova poluraspada.

Vrijeme poluraspada je vrijeme potrebno da se prvotna količina nekog radioaktivnog elementa smanji na pola, odnosno to je trenutak kada se u stijeni još nalazi samo polovina prvotne količine tog radioaktivnog elementa. Ukupna prvotna količina tog radioaktivnog elementa u stijeni određuje se zbrajanjem količina trenutno prisutnog radioaktivnog elementa i

trenutno prisutnog novog elementa - proizvoda njegova raspada.

Npr. vrijeme poluraspada ^{238}U je 4,5 milijardi godina, što znači ako se u istraživanoj stijeni nalazi 50 % ^{238}U i 50 % ^{206}Pb , stijena je stara 4,5 milijardi godina. Tih 50 % ^{238}U i dalje se raspada, pa će u stijeni nakon još jednog vremena poluraspada od 4.5 milijardi godina, tog urana biti još samo 25 %, a olova će biti 75 %, čime će se ustanoviti starost te stijene od 9 milijardi godina (sl.11 - Brzina radioaktivnog raspada ^{238}U u ^{206}Pb).

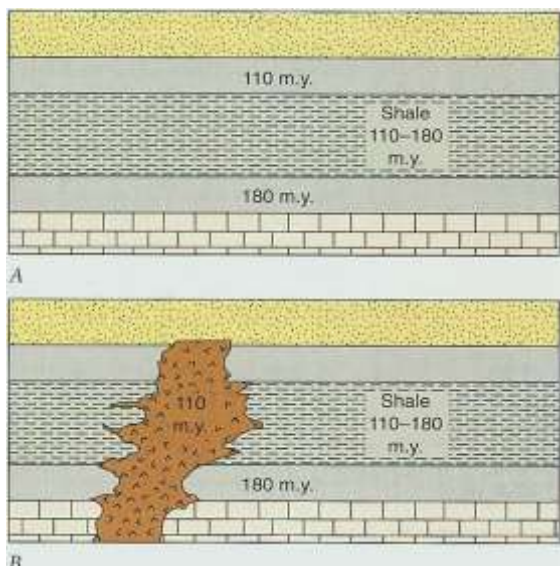
Odredba odnosa količine radioaktivnog elementa i proizvoda njegova raspada u nekoj stijeni, odvija se upotrebom Masenog spektrometra (sl.12 - Shema masenog spektrometra). U njemu se uzorak stijene koja se ispituje isparava, te se ta para bombardira elektronima. Ovim bombardiranjem u pari prisutni atomi raznih elemenata koji izgrađuju tu stijenu, ostaju bez elektrona, te time ti atomi postaju pozitivno nabijeni. U takvom stanju oni prolaze kroz magnetsko polje koje ih skreće pod kutem koji ovisi o njihovoj masi, te time te različito teške atomske jezgre "udaraju" u različita mjesta mjernog polja u masenom spektrometru, a gdje se njihova količina bilježi ili foto ili elektronskom metodom.



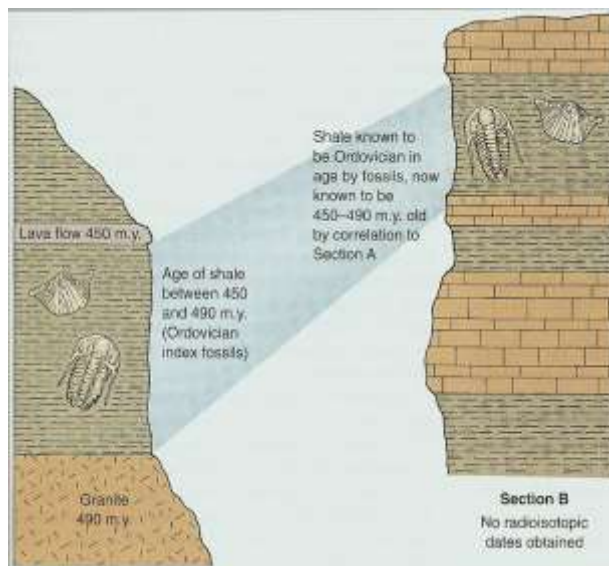
sl.12

Od triju osnovnih skupina stijena; magmatskih, metamorfnih i sedimentnih, magmatske su najbolje za određivanje radiometrijske starosti. To stoga jer "svježi" odlomci magmatskih stijena nisu mogli pretrpjeti nikakav gubitak novonastalih elemenata nastalih tijekom radioaktivnog raspada, a što je ključno za što točniju odredbu starosti stijene. Sedimentne stijene mogu dati samo podatak o starosti minerala koji izgrađuju tu sedimentnu stijenu, tj. one su uvijek mlađe od minerala koji ih izgrađuju. Također i metamorfne stijene su nepoгодne za odredbu starosti, jer daju podatak samo o vremenu metamorfoze, tj. o vremenu

kada su metamorfozom nastali novi minerali koji ih izgrađuju, a ne o vremenu nastanka prvotne stijene. Odredbom radiometrijske starosti neke stijene, dobiva se mogućnost odredbe približne starosti i stijena u njenoj podini i krovini. Ako se u "sendviču" između dvaju magmatskih stijena nalaze neke sedimentne stijene, lako se može odrediti vrijeme njihova taloženja. Npr. ako je donja magmatska stijena stara 180 milijuna godina, a gornja 110



sl.13



sl.14

milijuna godina, onda je sedimentna stijena između njih taložena u intervalu između ta dva vremena (sl.13 - Radiometrijski datirane magmatske stijene kao pomoć pri odredbi starosti sedimentnih stijena). U tom slučaju zna se i starost fosilnog sadržaja te sedimentne stijene. Nalaskom istovrsnog fosilnog sadržaja u nekim sedimentnim stijenama drugdje na Zemlji, odmah se zna i njihovo vrijeme taloženja (sl.14 - Starost stijena koja se ne može odrediti radiometrijski, može se odrediti korelacijom).

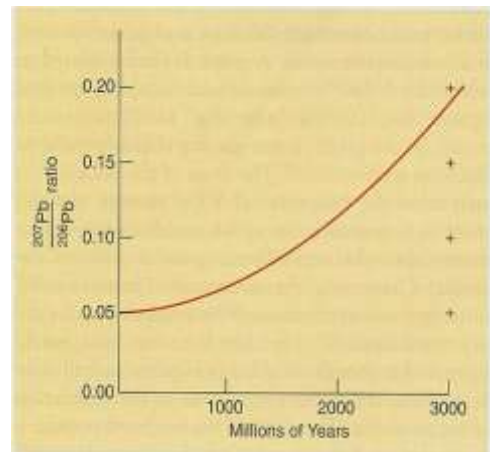
Rano u geološkoj prošlosti na Zemlji je bilo više radioaktivnih elemenata nego danas. Međutim, neki od njih su imali kratko vrijeme poluraspada, te su prešli u stabilnije elemente. Na sreću, u stijenama ima i elemenata koji imaju vrlo dugo vrijeme poluraspada od kojih su najupotrebljiviji (sl.15 - Neki od najkorištenijih radioaktivnih elemenata za radiometrijsko datiranje):

ISOTOPES		HALF-LIFE OF PARENT (YEARS)	EFFECTIVE DATING RANGE (YEARS)	MINERALS AND OTHER MATERIALS THAT CAN BE DATED
PARENT	DAUGHTER			
Uranium-238	Lead-206	4.5 billion	10 million-4.6 billion	Zircon Uraninite
Potassium-40	Argon-40	1.3 billion	50,000 - 4.6 billion	Muscovite Biotite Hornblende Whole volcanic rock
Rubidium-87	Strontium-87	47 billion	10 million - 4.6 billion	Muscovite Biotite Potassium feldspar Whole metamorphic or igneous rock
Carbon-14	Nitrogen-14	5730	100 - 70,000	Wood, charcoal, peat Bone and tissue Shell and other calcium carbonate Groundwater, ocean water, and glacier ice containing dissolved carbon dioxide

sl.15

Među radioizotopnim metodama određivanja starosti stijena, najkorištenije su:

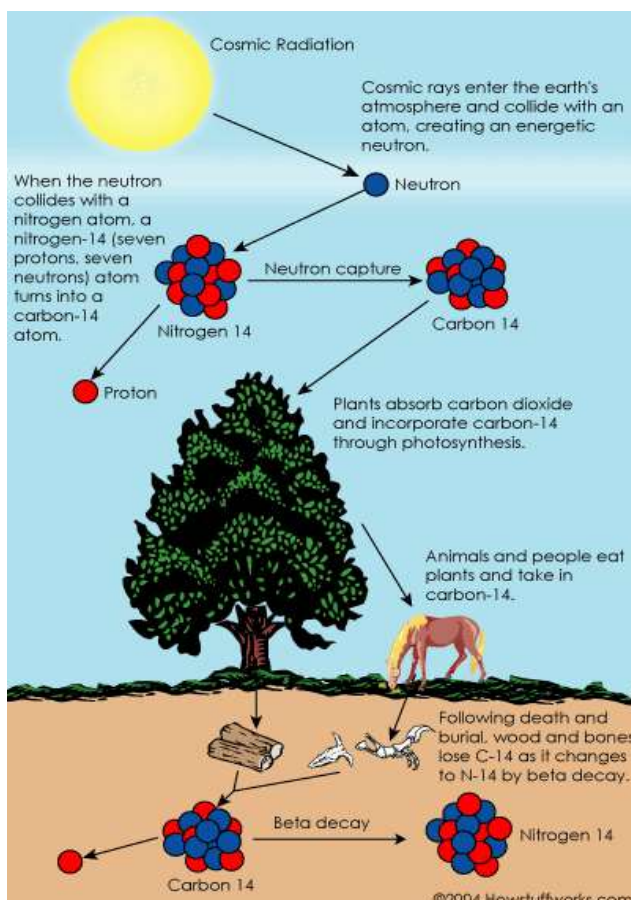
1) Metoda uran-olovo ($^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ i $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$) - pri odredbi radiometrijske starosti ovom metodom u stijeni je bitno razlikovati olovo nastalo radioaktivnim raspadom urana, od onog prisutnog kao originalni sastojak stijene iz vremena njena nastanka (inače dolazi do bitnih grešaka). Da bi se sa što većom sigurnošću ustanovila starost, obično se u istom uzorku kombiniraju odredbe starosti metodama $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ i $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$. Poluraspad ^{235}U je bitno brži (704 milijuna godina), pa se uočavanjem promjena odnosa ^{207}Pb i ^{206}Pb u stijeni, također može određivati njena starost (sl.16 - Odnos ^{207}Pb i ^{206}Pb može se iskoristiti za odredbu radiometrijske starosti).



sl.16

2) Metoda uran-torij ($^{234}\text{U}/^{230}\text{Th}$) - uranski izotop ^{234}U također je pogodna za odredbe radiometrijske starosti, jer se često nalazi u kalcitnim skeletima grebenotvornih koralja, dok mu je vrijeme poluraspada u ^{230}Th relativno kratko. Ovom metodom starosti grebena mogu se određivati u rasponu od nekoliko tisuća, pa do 300 tisuća godina.

3) Metoda kalij-argon ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$) - ova metoda je pogodna jer mnogi minerali koji izgrađuju magmatske stijene sadrže kalij (npr. feldspati). Također, nastali proizvod raspada - argon, inertan je plin koji se ne voli vezati s drugim elementima, pa često ostaje "zarobljen" u stijeni u onoj količini u kojoj je i nastao kao proizvod raspada kalija. Međutim, ukoliko se ispitivana stijena s kalijskim feldspatima zagrije iznad 125 stupnjeva, u proračunima se javljaju greške, jer na tim temperaturama argon počinje isparavati iz stijene.



sl.17

4) Metoda rubidij-stroncij ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$) - ova metoda često se koristi kao pomoćna pri $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ metodi, jer je rubidij uglavnom prisutan u mineralima u kojima je prisutan i kalij, a stroncij pak nije osjetljiv na visoke temperature kao argon.

5) Metoda ugljika - ^{14}C kontinuirano nastaje u gornjim slojevima atmosfere u trenucima sudara kozmičkih zraka (uglavnom protona) s prisutnim atomima različitih plinova. Ti protoni razbijaju atomske jezgre atoma tih plinova, čime nastaju slobodni neutroni koji također razbijaju okolne atomske jezgre. Kada takav jedan neutron udari jezgru atoma ^{14}N , iz nje biva izbačen proton, a u njoj ostaje vezan taj dodatni neutron čime nastaje ^{14}C (sl.17 - ^{14}C nastaje od dušika u atmosferi). Taj se ^{14}C odmah veže s kisikom te nastaje CO_2 . CO_2 koriste biljni organizmi za fotosintezu, a jedući biljke, u sebe ga unose i životinje. Kako se za života nekog živog bića CO_2 stalno unosi u organizam, njegov raspad ne utječe na smanjenje njegove količine u organizmu,

te je njegova količina u organizmu stalna. Ipak, treba imati na umu da je proizvodnja ^{14}C u atmosferi varirala u zadnjih nekoliko tisuća godina, pa je vrlo bitno da se za određeno razdoblje to uzme u obzir kako bi se izbjegle pogreške.

Nakon uginuća nekog organizma novi ^{14}C više se ne unosi u organizam, te se njegova količina zbog radioaktivnog raspada počinje smanjivati. Tako, ako ga npr. u nekom organskom uzorku ima još samo 25 % prvotne količine, to znači da su već prošla dva vremena poluraspada, svako od 5730 godina, tj. organizam od kojeg potječe taj organski uzorak uginuo je prije 11 460 godina.

6) Metoda "*fission tracks*" - čestice koje nastaju radioaktivnim raspadom urana ^{238}U "ispaljuju" se kroz tvar (stijenu) koja sadrži uran, čime u toj tvari nastaju tunelski tragovi ("*fission tracks*"). Ovi tragovi su "atomske" širine i vidljivi su jedino elektronskim mikroskopom. Da bi bili vidljivi i običnim mikroskopom, uzorak koji se ispituje na "*fission tracks-e*" uranja se u posebnu, kiselu ili lužnatu, otopinu koja prodire u "*fission tracks-e*", te ih širi. Formiranje ovih tragova je spor i jednoličan proces, stoga se "*fission tracks*" koriste za određbu vremena kada je neka tvar koja sadrži uran, nastala. Najprije se određuje broj uranovih atoma koji su već dezintegrirani, do čega se dolazi brojanjem već prisutnih "*fission tracks-a*", a zatim se određuje početni broj uranovih atoma, do čega se dolazi bombardiranjem uzorka neutronima, čime se raspadaju i preostali još cijeloviti uranovi atomi. Ukupan broj "*fission tracks-a*" daje početni broj uranovih atoma. Kada se sada zna koliko je ukupno bilo uranovih atoma pri nastanku stijene, a koliko ih ima u stijeni kao posljedici njihovog prirodnog radioaktivnog raspada, a kolika je proizvodnja uranovih "*fission tracks-a*" u određenom vremenu, lako se odredi starost ispitivane stijene. Ovom metodom moguće je određivati starosti stijena u rasponu od nekoliko stoljeća, pa sve do nekoliko milijardi godina, a naročito je pogodna za određbe starosti između 50 tisuća i 1 milijun godina kada druge metode nisu učinkovite.

7) Metoda termoluminiscencije - datiranje metodom termoluminiscencije koristi se za određivanje apsolutne starosti stijena, minerala i keramičkih arheoloških nalaza starosti između 800 000 - 10 000 godina. Zasniva se na činjenici da su svi prirodni minerali termoluminiscentni (zrače hladnu svijetlost pod utjecajem visoke temperature). Kako od trenutka nastanka nekog minerala (kvarca, feldspata, dijamanta, kalcita) i/ili sedimentne stijene koja ih sadrži, oni apsorbiraju radioaktivno zračenje koje proizvode okolni radioaktivni izotopi prisutni u manjoj ili većoj mjeri u svakom sedimentu, potrebno je izmjeriti ukupnu količinu apsorbiranog radioaktivnog zračenja u nekom ispitivanom mineralu. Ukupna količina zračenja dobije se njegovim postupnim zagrijavanjem na temperature između 100 i 400 stupnjeva kada mineral izbacuje apsorbiranu energiju u vidu hladnog svijetla, tj. on luminiscira. Djeljenjem ove na taj način izmjerene ukupne količine zračenja (mjerenje luminiscencije) s prosječnim godišnjim radioaktivnim zračenjem na mjestu uzetog uzorka, dobiva se broj godina od kada je taj mineral i/ili stijena nastala. Ipak, s obzirom da je ova metoda još u fazi razvoja, apsolutna starost nekog minerala i/ili stijene određuje se ovom metodom tek s 20 % točnosti.

3.3. Stratotip, geološka vremenska ljestvica i stratigrafska klasifikacija

Godine 1833., koristeći princip biološke sukcesije, Charles Lyell je prvi podjelio naslage kenozoika na pet manjih cjelina koje su se međusobno razlikovale po svom fosilnom sadržaju (sl.18 - *Lyellova shema podjele kenozoika uspoređena sa modernijom shemom*). To je bio jedan od najranijih pokušaja određivanja relativne starosti stijena na temelju njihova fosilnog sadržaja. Znači, 30-ih godina 19. stoljeća počela se oblikovati geološka vremenska ljestvica koja je sadržavala određene cjeline naslaga, odnosno stijenske jedinice karakterističnog

fosilnog sadržaja vertikalno poredane prema svojoj relativnoj starosti odozdo prema gore. Sve ranije geološke vremenske ljestvice bazirale su se na litološkim značajkama naslaga, no kako su litološke značajke često vrlo promjenjive unutar istovremenih naslaga na različitim dijelovima Zemlje, to upotreba takvih geoloških vremenskih ljestvica nije pogodna za širi prostor

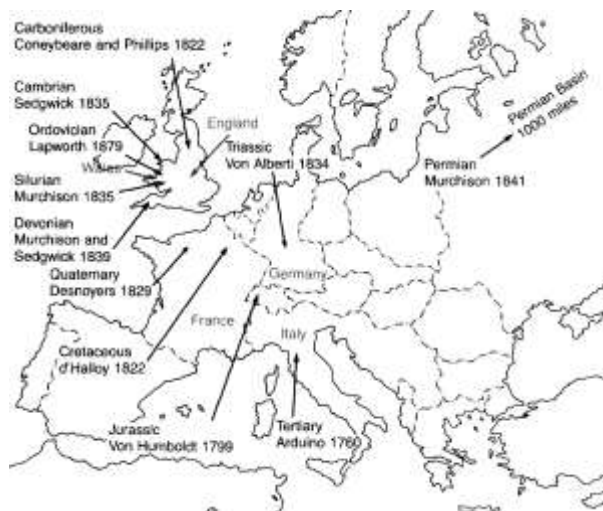
Era	Period	Lyell's Scheme	Modern Usage		(Age in Ma)
CENOZOIC (1841)	QUATERNARY (1829)	Recent (time since first appearance of humans)	QUATERNARY (1829)	Holocene (1885)	0.01
		New Pliocene (1833) 90% living species		Pleistocene (1839)	1.8
	TERTIARY (1760)	Older Pliocene (1833) 33–50% living species	NEOGENE (1853)	Pliocene	5.3
		Miocene (1833) 18% living species		Miocene	24.0
		Eocene (1833) 3.5% living species	PALEOGENE (1866)	Oligocene (1854)	37.0
				Eocene	58.0
				Paleocene (1874)	65.0

sl.18

Ti najraniji geolozi nisu mogli znati koliko bi jedinica mogla imati kompletna geološka vremenska ljestvica, odnosno ljestvica Zemljine prošlosti, niti koliko bi još novih do tada neotkrivenih jedinica moglo biti negdje drugdje pronađeno, niti koji bi fosili u njima mogli biti prisutni. Stoga se geološka vremenska ljestvica izgrađivala postupno i nesistematski. Nove jedinice bile su imenovane kako su bile otkrivane i opisivane, a imena su dobivale nekad po geografskim lokalitetima gdje su istraživane, nekad po nekim pradačnim plemenima, a nekad po tipu naslaga koje ih izgrađuju. Danas jedinice međunarodne geološke ljestvice definira i određuje Međunarodno povjerenstvo za stratigrafiju (ICS) (sl. 22).

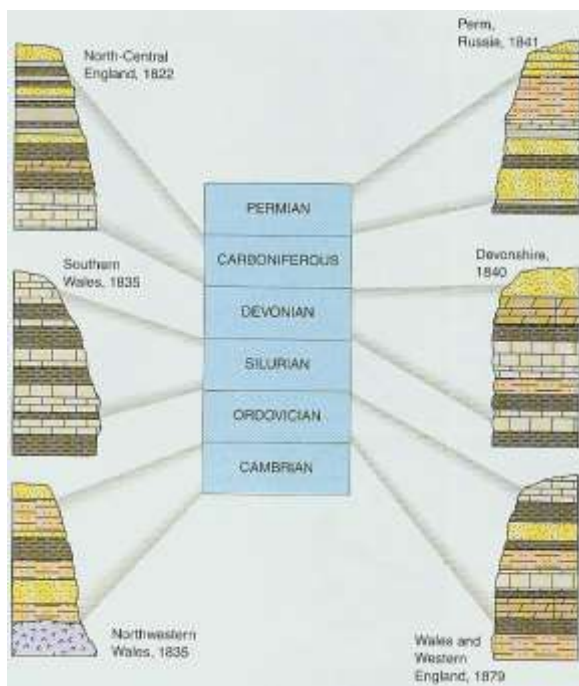
Odredba neke jedinice započela je korištenjem navedenih osnovnih principa stratigrafske geologije, čime se najprije odredila njena relativna vremenska pozicija, a zatim i njen fosilni sadržaj, pa se ta jedinica mogla prepoznavati i na mnogim drugim mjestima. Takva jedna prva opisana, te karakteristično razvijena jedinica naziva se standardni profil ili stratotip, i predstavlja "ključ" za prepoznavanje jedinica iste relativne starosti drugdje na Zemlji (sl.19 - *Pozicije i vremena odredbe stratotipova*; sl.20 - *Paleozojski stratotipovi*). Kako nigdje na Zemlji nije prisutan kompletan slijed naslaga čitave geološke prošlosti Zemlje, tipični stratotipovi određivni su na mnogim mjestima na Zemlji i s njima se danas uspoređuju istovremene jedinice s bilo kojeg dijela Zemlje.

Napretkom znanosti, tijekom 19. stoljeća, američki i engleski geolozi ustanovili su mnogo jedinica različitih naziva, kategorija, vremenskih pozicija i trajanja. Sve je to uskoro



sl.19

sl.20



postalo konfuzno i neprikladno za širu upotrebu, pa je tijekom prve polovine 20. stoljeća postalo očito da je potrebno uskladiti nazivlja, kategorije, vremenske pozicije i trajanja svih tih jedinica kako bi ih se uniformno moglo koristiti po čitavoj Zemlji. Stoga je 1961. osnovana "Međunarodna unija geoloških znanosti" (IUGS) čija "Komisija za stratigrafiju" (ICS) promiče i koordinira međunarodnu suradnju te uspostavlja i održava standarde u stratigrafiji. ICS, među ostalim, definira i načela stratigrafske klasifikacije, terminologije i postupaka, te njihovo objavljivanje u vodičima (npr. "Međunarodni stratigrafski vodič") i rječnicima. Stratigrafska klasifikacija ima za cilj određivanje sustava pomoću kojeg se može dati vremenski slijed geoloških dokumenata (stijena) i zbivanja, ujednačeno za čitav prostor Zemlje. Tako,

postoji litostratigrafski, biostratigrafski, kronostratigrafski i geokronološki sustav koje izgrađuju različite jedinice.

U litostratigrafskom sustavu osnovna jedinica je formacija. Pod tim pojmom podrazumjeva se skupina stijena koja je vertikalno i horizontalno više ili manje ujednačena sastava, što ukazuje da je nastala u jednoličnim okolišnim uvjetima ili pak uvjetima koji su se pravilno izmjenjivali. Pri tome, bitno je da se jedna formacija po svom litološkom sastavu razlikuje od formacije u svojoj podini ili krovini. Ukoliko formacija nije litološki homogena sastoji se iz članova i slojeva kao nižih litostratigrafskih jedinica, a ukoliko je litološki homogena sastoji se samo iz slojeva kao nižih litostratigrafskih jedinica. Više formacija čini višu litostratigrafsku jedinicu koja se naziva grupa, a dvije ili više grupa čine supergrupu (sl.21 - Jedinice litostratigrafskog sustava). Analogno, svaka grupa po svojim se litološkim obilježjima razlikuje od grupe (ili formacije) u svojoj podini ili krovini.



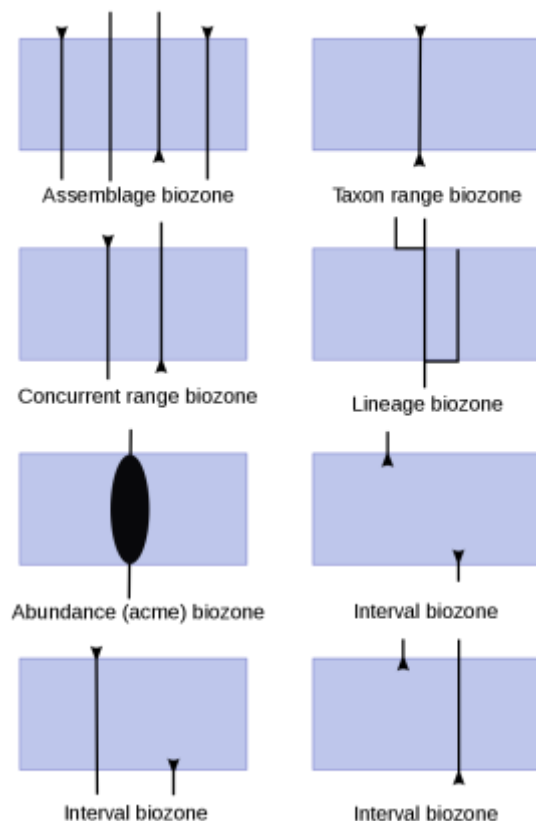
sl.21

U biostratigrafskom sustavu osnovna je jedinica biozona. Postoji različiti tipovi biozona, ovisno o kriteriju koji ih definira (sl.22 - Jedinice biostratigrafskog sustava). Tako npr. cenozona (zajednička biozona, assemblage biozona) obuhvaća slijed slojeva koji sadrže određenu zajednicu fosilno očuvanih organizama (vrsta). Po tome se jedna cenozona razlikuje od cenozone u svojoj podini i krovini. Rasponska biozona (akrozona, taxon range biozona) je ona zona koja sadrži fosile neke određene vrste od početka njenog nastanka pa do njenog izumiranja. Biozona koju definira neki evolucijski niz organizama, na nivou više sistematske kategorije od vrste, predstavlja filozonu (lineage biozona). Vršna zona (epibola, abundance,

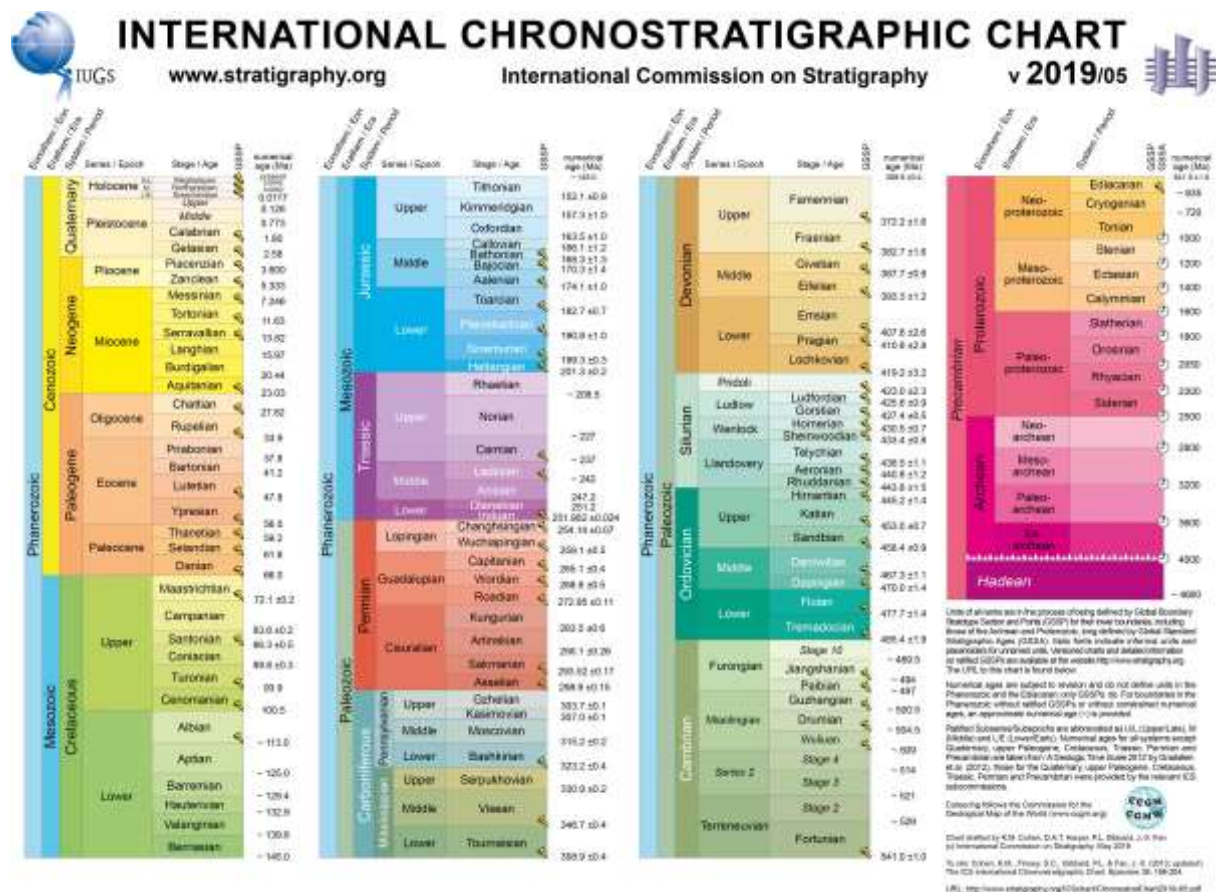
acme biozona) obuhvaća slijed slojeva u kojima je vidljiv maksimalni razvoj neke skupine organizama.

Intervalna zona (interval biozona) obuhvaća slijed slojeva; (a) između završetka pojave jedne i početka pojave druge vrste, a koji nisu biostratigrafski značajni, ili (b) slijed slojeva između zadnjih pojava dvaju vrsta, ili (c) slijed slojeva između prvih pojava dvaju vrsta, Konkurentna zona (concurrent range biozona) obuhvaća slijed slojeva između početka pojave neke prve vrste i završetka pojave neke druge vrste.

Što se tiče vremenske kategorije, odnosno vremenskih jedinica, postoje jedinice geokronološkog i jedinice kronostratigrafskog sustava (Sl. 22a - Jedinice geokronološkog i/ili kronostratigrafskog sustava). Vremenski odsječci Zemljine prošlosti u kojima su se taložile neke stijenske jedinice nazivamo geokronološkim jedinicama, dok te same stijenske jedinice nazivamo kronostratigrafskim jedinicama. Znači, kronostratigrafske jedinice u stvari predstavljaju naslage koje su istaložene u okviru nekog vremena, odnosno u okviru geokronoloških jedinica. Za najveću



sl.22



sl.22a

geokronološku jedinicu Zemljine prošlosti geolozi su predložili naziv eon, trajanja između nekoliko stotina milijuna godina, do nekoliko milijardi godina. U geološkoj prošlosti Zemlje ustanovljena su četiri eona; hadij, arhaik (arheozoik), proterozoik (algonkij) i fanerozoik. Razdoblja hadijskog, arhajskog i proterozojskog eona neformalno se i uobičajeno nazivaju prekambrij. Eoni se dijele na ere, u geološkoj prošlosti ima ih 10, a trajanja su od nekoliko stotina milijuna godina.

Fanerozojski eon je podjeljen na tri ere:

- 1) paleozoik (iz grčkog jezika i znači „stari život“)
- 2) mezozoik (iz grčkog jezika i znači „srednji život“)
- 3) kenozoik (iz grčkog jezika i znači „novi život“)

Svaka era dijeli se na periode, svaki period na epohe, a svaka epoha na doba

Periodi su najkorištenije jedinice u geološkoj govornoj praksi, trajanja su od nekoliko desetaka milijuna pa do maksimalno 100 milijuna godina. U geološkoj prošlosti ima ih 22.

Epohe uglavnom nemaju svoja posebna imena nego se njihov naziv formira na način da se ispred imena perioda doda riječ donja/starija(i), srednja(i), ili gornja/mlađa(i). Ipak, neke epohe imaju svoja posebna imena. To su epohe silurskog, karbonskog, permskog, paleogenskog i neogenskog perioda. Trajanja su od nekoliko desetaka milijuna godina i u geološkoj prošlosti ih ima 34.

Doba su najniže jedinice geokronološke klasifikacije trajanja od nekoliko milijuna godina. U geološkoj prošlosti ih ima 99.

Da bi bolje razumjeli odnose geokronoloških i kronostratigrafskih jedinica možemo uzeti za primjer fanerozojski eon. Tako npr. kažemo da su se tijekom fanerozojskog eona istaložile naslage fanerozojskog eonotema, gdje je eonotem najviša kronostratigrafska jedinica. Nadalje fanerozojski eon podjeljen je na tri ere; paleozoik, mezozoik i kenozoik, pa možemo reći da su se npr. za vrijeme mezozojske ere istaložile naslage mezozojskog eratema, gdje je eratem druga po veličini kronostratigrafska jedinica. Slijedeća niža geokronološka jedinica jest period, pa kažemo npr. da su se za vrijeme jurskog perioda istaložile naslage jurskog sistema, gdje je sistem treća po veličini kronostratigrafska jedinica. Analogno, slijedeća niža geokronološka jedinica jest npr. starije jurska epoha tijekom koje su se istaložile naslage donjojurske serije, gdje je serija četvrta po veličini kronostratigrafska jedinica. Dakle, ukoliko se ne spominju naslage (kronostratigrafska klasifikacija), nego samo vrijeme (geokronološka klasifikacija), valja reći starija (ili rana, eng. early) jura, odnosno, mlađa (ili kasna, eng. late) jura, primjerice, tijekom starije jure, tijekom mlađe jure, a ukoliko se spominju naslage, tada se koriste termini donja, odnosno gornja, primjerice, donjojurske naslage, gornjojurske naslage... . Najniža geokronološka jedinica jest doba, pa možemo reći npr. da su se tijekom hetangijskog doba istaložile naslage hetangijskog kata, gdje je kat najniža kronostratigrafska jedinica. Iz ovog se vidi da geokronološke jedinice imaju ista imena kao i kronostratigrafske jedinice (npr. jurski period = jurski sistem). No kada se govori o naslagama geološke prošlosti, uobičajeno se koristi geokronološka terminologija, iako je to u biti pogrešno (npr. obično se kaže „naslage jurskog perioda“, a ispravno je „naslage jurskog sistema“, a ispravno je i "naslage istaložene tijekom jurskog perioda" i sl.).

3.4. Interpretacija dokumenata geološke prošlosti

Određivanjem starosti stijena obavljeno je samo njihovo vremensko razvrstavanje. No, što ti dokumenti mogu reći o vremenu iz kojega potječu ? Za odgovor na to pitanje vrlo su važni fosilni ostaci. Naime, pojedine skupine organizama vezane su za točno određene okolišne uvjete. Ima ih koji žive samo na suhom kopnu, drugi žive u slatkovodnim uvjetima, treći samo u morima. Stoga, svaka skupina organizama jasno svjedoči o prilikama u vremenu

svog postojanja. Kako je najveći dio sedimentnih stijena taložen u moru, za analizu su najvažniji upravo organizmi morskih prostranstava.

Organizmi mogu živjeti pričvršćeni na morskom dnu (sesilni bentos), mogu se kretati po morskom dnu (vagilni bentos), mogu plivati (nekton), ili pak mogu lebdjeti, nošeni morskim strujanjima (plankton). Mnogi od tih organizama osjetljivi su na različite ekološke faktore, kao što su svjetlost, temperatura, salinitet i dr. Tako npr. morske biljke ograničene su samo na prostore do kojih dopire sunčeva svjetlost (potrebna za fotosintezu). Neki organizmi žive samo u uskim temperaturnim rasponima (stenotermni organizmi), dok ima i onih koji nisu tako osjetljivi na promjene temperature (euritermni organizmi). Različita je i tolerancija organizama na uvjete saliniteta. Tako, ima onih koji ne podnose veće promjene saliniteta (stenohalini organizmi), a i onih koji to uspješno podnose (eurihalini organizmi). Čistoća mora je također važan ekološki faktor. Neki organizmi su izrazito osjetljivi na čistoću mora, pa tako oni koji obitavaju u izuzetno čistom moru, ne mogu duže opstati u uvjetima zamuljenja i/ili bilo kakvog drugog onečišćenja. Stoga, upravo organizmi koji su osjetljivi na prilike životnog okoliša (biotopa), mogu poslužiti kao najbolji pokazatelji mjesta i uvjeta taloženja nekog sedimenta.

Litološka svojstva stijena također upućuju na mjesto i prilike njihova nastanka. Tako se npr. učestalost minerala glina mijenja idući od kopna (količina ilita raste, a kaolinita i klorita opada), preko brakičnih okoliša do mora. Nadalje, grubi klastični materijal ukazuje na blizinu obale, debele naslage vapnenaca govore o prostorima karbonatnih platformi, morenski klastiti o glacijalnim područjima, ventefakti o pustinjama, soli o lagunama. Sve to upućuje da stijene sadrže različite dokaze svog podrijetla. Ukupnost svih tih dokaza, tj. ukupnost svih paleontoloških i litoloških karakteristika neke stijene, a koja ukazuje na uvjete i okoliše njenog nastanka, naziva se facijes. Fosili koji su vezani uvijek za iste facijese nazivaju se "*facijesnim fosilima*" (za razliku od "*provodnih fosila*" koji su karakterizirani svojim "kratkim" vremenskim postojanjem). Često se mogu razlikovati istodobni, ali različiti facijesi, što ukazuje na istodobne ali različite taložne uvjete na različitim prostorima. Stoga se za facijes kaže da je to klasifikacijska kategorija horizontalne (istodobne) litološke varijabilnosti. Razlikuju se kontinentalni, morski i mješoviti facijesi unutar kojih postoji niz facijesnih varijeteta.

Kontinentalni facijesi mogu biti kopneni (terestrički) u koje spadaju glacijalni, pustinjski i spiljski facijesi, te slatkovodni (limnički) u koje spadaju, riječni (fluvijalni), jezerski (lakustrički) i močvarni facijesi.

Među morskim (marinskim) facijesima postoje plitkomorski (neritski) facijesi u koje spadaju nadplimni, plimni i podplimni facijes, zatim batijalni facijesi u koje spadaju npr. padinski i turbiditni facijes, te abisalni facijesi u koje spadaju npr. globigerinski i dijatomejski facijes.

Mješoviti facijesi vezani su za obalne prostore mješanja morske i slatke vode tj. prostore laguna, delti, estuare, limane u kojima se formiraju i istoimeni facijesi.

Svaki facijes karakteriziran je određenim litološkim i paleontološkim karakteristikama čijim prepoznavanjem se dolazi do utvrđivanja okolišnih uvjeta u kojima je neki facijes nastao. Tako, npr. erozijski kanali uvijek su svojstveni riječnim sedimentima i taložinama delti tijekom faza jačeg naleta vode i donosa detritusa. Stupanj zaobljenosti čestica unutar nekog facijesa govori o duljini transporta u plitkoj vodi ili o valjanju na morskim obalama. Kapacitet neke prдавne struje može se ocijeniti prema veličini prenesenih čestica nekog facijesa. Smjer struje može se odrediti po koso položenim česticama unutar sedimenta (imbrikacija) nekog facijesa. Graduirani slojevi i tragovi tečenja svjedoče o mutnim (turbidnim) strujama i smjeru tečenja. Također, na smjer tečenja ukazuje i kosa slojevitost. Dubina vode može se ocijeniti prema fosilima. Pučinske foraminifere, tako, najčešće ukazuju na dubokovodne okoliše. Biljni organizmi i životinje s debelim i bogato razvijenim ljušturama

redovito svjedoče o plitkom moru. Pukotine isušivanja pokazuju da je dno povremeno bilo iznad razine vode. Ooidi upozoravaju na vrlo plitku i nemirnu vodu. O povećanom salinitetu nekog morskog prostora svjedoče veće količine sulfata (gipsa i anhidrita), te halita i kalijevih soli. Veća količina organske tvari, izostanak fosila, te prisutnost pirita, ukazuje pak na reduktivne uvjete bez kisika.

3.5. Interpretacija zbivanja u Zemljinoj prošlosti

Upoznavanje vremenskog slijeda stijena i rekonstrukcijom facijesa moguće je pratiti cjelokupno zbivanje u Zemljinoj prošlosti. Određujući vremenski slijed stijena i facijese svih morskih, mješovitih i kontinentalnim sedimenata, prate se kolebanja i promjene u rasporedu kopna i mora u Zemljinoj prošlosti. Time se dolazi do rekonstrukcije položaja kopna i mora u pojedinim razdobljima Zemljine prošlosti.

Mnoge stijene odražavaju klimatske prilike koje su vladale u doba njihova nastajanja. Tako, npr. šareni klastični sedimenti s tipičnim tekturnim karakteristikama dina upozoravaju na pustinjsku klimu, morene na hladnu klimu, velike naslage grebenschkih vapnenaca na toplu klimu i sl. Fosili su također često dobri klimatski indikatori. Koralji, rudisti, obilje bentičkih foraminifera redovito svjedoče o toplim klimatskim uvjetima. Nalasci fosilnih ostataka mamuta uvijek će ukazivati na negdašnje prostore hladne klime. Nalasci fosila velikih mlađepaleozojskih papratnjača govore o vlažnoj i toploj klimi. Biljke velikih mesnatih listova upućuju na suhu klimu. Znači, analizom stijena i fosilnih ostataka moguće je pratiti klimatska kolebanja u Zemljinoj prošlosti. U novije vrijeme koriste se sofisticiranije metode. Pri tome, osobito je važan odnos izotopa kisika $^{16}\text{O} : ^{18}\text{O}$. Naime, njihov je normalni omjer oko 500:1, a s povišenjem temperature mijenja se u korist ^{16}O , tako da npr. povećani omjer $^{16}\text{O} : ^{18}\text{O}$ u nekom vapnencu geološke prošlosti ukazuje na veću temperaturu u vrijeme njegova taloženja, no što je to danas. Istraživanja pojedinih životnih zajednica Zemljine prošlosti pokazuju da su kontinentalni prostori bili u drugačijim klimatskim pojasovima nego što su danas. To pokazuju npr. fosilni nalazi tropske u subtropske flore prisutni u današnjim hladnim klimatskim pojasovima, a isto tako i fosilni ostaci organizama hladnih prostora prisutni u današnjim toplim klimatskim pojasovima.

Stijene litosfere uglavnom su danas poremećene. Stoga određivanjem njihove starosti, određujemo i starost tektonskih pokreta koji su ih poremetili. Time određujemo i slijed orogenetskih i postorogenetskih promjena.

Također, fosilni geomagnetizam nekih dijelova kontinenata s obzirom na raspored magnetskih silnica, koje u većoj mjeri nisu u skladu s današnjim geomagnetskim poljem tih dijelova kontinenata, jasno pokazuju da je u Zemljinoj prošlosti dolazilo do premještanja kontinenata (i polova).

Dakle, "historijski geolog", stratigraf, "čitanjem" facijesa i spoznajama o njegovu vremenskom slijedu dolazi do izuzetnih spoznaja; rekonstruira prostorna i vremenska zbivanja (dinamiku) na Zemlji tijekom njene prošlosti, dakle od njenog postanka do danas.

4. HADIJ

Stijene iz najranijeg razdoblja Zemljine prošlosti danas nisu prisutne na njenoj površini. To stoga jer su izmjenjene u neke druge stijene, ili su pak bile konzumirane (pretaljene) u Zemljinu unutrašnjost, ili su u potpunosti erodirane erozijskim procesima. Stoga je podjela hadijskog eona izvršena jedino na Mjesecu i to na temelju tamo najznačajnijih impaktnih događaja i prisutnih hadijskih stijena. Tako npr., nektarijski period određen je prema približnom vremenu formiranja mjesečevog bazena "Mare Nectaris" građenog od mnoštva impaktnih kratera. Apsolutna starost za ta mjesečeva hadijska razdoblja ograničena je radiometrijskim datiranjem uzoraka stijena donešenih sa mjesečeve površine. Danas neki autori Zemljin hadij i stariji eoarhaik prema usporedbi sa tim mjesečevim razdobljima dijele na (tab.1 - Podjela hadija i starijeg eoarhaika bazirano na mjesečevoj geološkoj vremenskoj ljestvici):

EON		prije sadašnjosti u milijunima godina
HADIJ + EOARHAIK	Stariji Imbrij	3850 - 3800
	Nektarij	3920 - 3850
	Bazenske grupe	4150 - 3920
	Kriptik	≈ 4600 - 4150

tab.1

Najstariji minerali na Zemlji stari su oko 4.4 milijarde godina i radi se o cirkonima prisutnim u metamorfoziranim pješčenjacima i konglomeratima s prostora zapadne Australije, a koji potječu od nekih starijih granitnih stijena koje su bile erodirane.

Starost nekih meteorita nađenih na Zemlji određivana je uran-olovnom i rubidij-stroncijskom metodom i dobivena je starost od oko 4.6 milijardi godina (sl.23 - Efremovka - jedan od najstarijih meteorita - iz najranijih faza formiranja Sunčeva sustava). Kako većina meteorita nađenih na Zemlji potječe iz asteroidnog pojasa (između Marsa i Jupitera), a koji je nastao kao dio Sunčeva sustava, to se uzima da je starost meteorita iz tog pojasa približno jednaka starosti Zemlje. O tako procijenjenoj starosti Zemlje u prilog govori i starost najstarijih mjesečevih stijena, a koja također iznosi oko 4.6 milijardi godina.



sl.23

Sunčev sustav se dakle formirao otprilike prije oko 4.6 milijardi godina iz velikih oblaka plina i prašine - difuznih (solarnih) nebula (sl.24 - Solarna nebula). To su mjesta u

sl.24



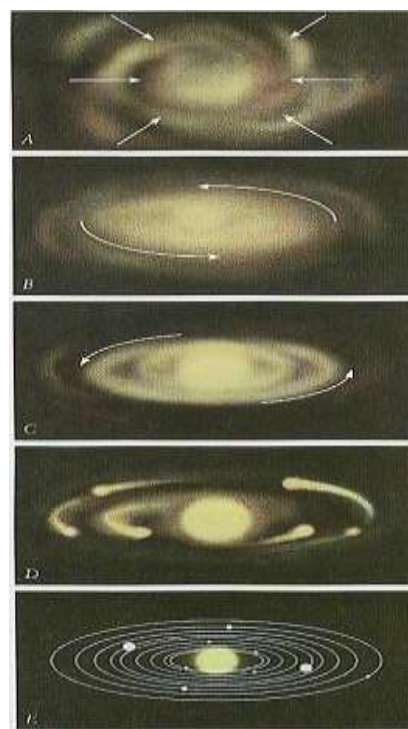
Svemiru na kojima su ranije postojale goleme zvijezde koje su eksplodirale (supernova), te upravo od takvih događaja mjestimice u Svemiru nastaju velike količine plina i prašine bogate raznim elementima. Gravitacijskom kompakcijom u nekom (zasigurno najgušćem) dijelu te nebule, nakon nekog vremena dolazi do nastanka visoke temperature, te do nuklearne fuzije lakih elemenata (vodika u helij), čime nastaje nova zvijezda - Sunce (sl.25 - *Nastanak Sunčevog sustava iz Solarne nebule*). Preostali dijelovi tog prvotnog

oblaka plina i prašine također se pod utjecajem gravitacije počinju skupljati, no u manje forme, iz kojih onda postupno nastaju planeti. Zbog kompakcije, a i radioaktivnog raspada prisutnih elemenata, planeti u svojoj unutrašnjosti također postaju užareni, no nikad toliko da bi došlo do nuklearne fuzije i nastanka zvijezde. Njihova neužarena vanjska (tanka) kora zbog "ključanja" u unutrašnjosti planeta često mjestimice puca i biva konzumirana u užarenu unutrašnjost, dok se istovremeno na nekim drugim mjestima planeta, hlađenjem tog užarenog materijala na njegovoj površini stvara nova kora. Takvim hlađenjem nastajale su prve stijene. No te prve stijene nisu se uspjele očuvati. To stoga jer su bile ili ponovno pretaljene, ili pak izmjenjene u neke druge stijene (metamorfne, sedimentne), ili su pak bile u potpunosti erodirane erozijskim procesima.

Užareni stijenski materijal koji je iz unutrašnjosti planeta dolazio na površinu, a gdje se postupno hladio u procesu nastanka čvrste Zemljine kore, bio je prepun različitih plinova koji su izlazili na površinu. Također, vrlo značajna količina tih plinova dolazila je i iz Svemira pri sudarima Zemlje s različitim meteoritima i kometima, jer su mnogi od njih u stvari i bili smrznuti plinovi (dušik, vodik), led i prašina. Oni su dolaskom na Zemlju ili odmah isparavali ili, ako su bili stijenoviti, plinove su otpuštali nakon što su bili pretaljeni (sl.26 - *Način nastanka prvotne Zemljine atmosfere*).

Zemaljska hadijska atmosfera nije imala slobodnog kisika, sastojala se uglavnom iz ugljičnog dioksida, vodene pare i dušika, a manje i od ugljičnog monoksida, vodikovog sulfida i vodikovog klorida. Generalno, takav je sastav plinova koji izlaze i iz današnjih vulkana, no ipak, ta hadijska atmosfera je sadržavala veći postotak vodika, a zasigurno i amonijaka i metana. Naime, današnji vulkani izbacuju lavu nastalu otapanjem relativno mladih stijena, a koje su prije nego su bile subducirane, nastajale bliže površini Zemlje, pa već i zbog toga sastav ovih plinova nije jednak onom kojega su imali plinovi prvotnih Zemljinih vulkana.

Neki pak smatraju da plinovi prvotne atmosfere potječu još iz vremena difuzne nebule, tj. da nisu nastali "isparavanjima" iz rastaljenog stijenskog materijala. No ipak, neprisutnost inertnih plinova kao što su neon, kripton i argon u Zemaljskoj atmosferi ne govori tome u prilog. Naime, ovi plinovi su vrlo inertni, ne mijenjaju lako mjesto svog



sl.25



sl.26

boravka i ne vole se vezati s drugim elementima. Stoga, da je prvotna atmosfera nastala iz difuzne nebule, ti plinovi bi još i danas bili u atmosferi, tj. ne bi iz nje pobjegli na površinu Zemlje. U ovom "isparavanju" različitih plinova iz užarenog stijenskog materijala, bila je, među ostalim, i vodena para od koje je nakon kondenzacije u atmosferi nastala i prva kiša, a koja je počela puniti Zemaljska topografska udubljenja. Znači ovim procesom, kao i čestim bombardiranjem Zemlje "ledenim meteoritima" nastala je prvotna Zemljina hidrosfera. Ipak, zbog prisutnosti raznih plinova u atmosferi, ove prve kiše i mora bila su vjerojatno kisela, tj. bila su drugačijeg kemijskog sastava no danas. Tako npr. prva mora bila su zasigurno bogata karbonatnom (ugljičnom) kiselinom (H_2CO_3) nastalom otapanjem velike količine ugljičnog dioksida iz atmosfere. U dodiru s različitim stijinama ovakva kisela voda ih je otapala, obogaćujući se s kalcijem, magnezijem i mnogim drugim elementima. No ipak, u takvim vodenim uvjetima ni uz pomoć ovih elemenata nisu mogle nastati karbonatne stijene – vapnenci i dolomiti, pa ih zato i nije bilo u tim najranijim razdobljima Zemljine prošlosti. Naprotiv, nastajalo je dosta rožnjaka, znači sedimentnih stijena koje su također bile formirane u vodi, no kako su rožnjaci građeni od silicija, bili su otporni na takve kisele vodene uvjete.

Tijekom dugog vremena, kemijskim reakcijama otopljenih tvari u vodi jednih s drugima, kiselost mora se postupno smanjila, a zbog svoje izrazite topivosti, u moru je dominantan sastojak ubrzo postao natrij koji se lako vezivao s klorom tvoreći halit. Ne zna se kada su oceani postali slani kao danas, no u svakom slučaju slanost se Zemljinih mora u posljednjih 600 milijuna godina nije bitnije mijenjala, što je vidljivo iz istraživanja provedenih na tako starim fosilima.

Nastankom količine vode koja je prisutna i na današnjoj Zemlji, voda se od tog vrlo ranog razdoblja Zemljine prošlosti stalno reciklira. Ipak, nešto od te vode je dugotrajnije vezano u mineralima različitih stijena, no i to samo privremeno, jer se i te stijene ponekad recikliraju kada se i takva voda ponovno oslobađa.

Prvi je kisik u atmosferi nastao fotokemijskim reakcijama. Naime, molekula vode u atmosferi se pod utjecajem UV zračenja raspada na vodik i kisik. To se događa i danas, samo, tako nastala količina kisika u atmosferi nezamjetna je u odnosu na onu koja nastaje fotosintezom biljaka. O prvim pojavama kisika u atmosferi jasno svjedoči promjena boje stijena koje su se nalazile na Zemljinoj površini, a o čemu će biti više riječi kasnije. Dakle, taj

prvi kisik nastao fotokemijskim reakcijama nije ostao slobodan u atmosferi, nego se odmah vezao za minerale na površini Zemlje.

4.1. Formiranje prve oceanske i kontinentalne kore

Tijekom ranog hada površinu Zemlje i njenu unutrašnjost izgrađivala je užarena, ključala stijenska masa (magma), nastala zagrijavanjem zbog raspada u njoj prisutnih radioaktivnih izotopa kratkog vremena polurapada. U to je vrijeme ta rastaljena stijenska masa prolazila kroz fazu diferencijacije, tj. teži sastojci te rastaljene stijenske mase padali su ka središtu tadašnje Zemlje, a lakši su se dizali ka njenoj površini. Istovremeno, ta je užarena masa bila i bombardirana mnogobrojnim asteoridima, a time i dodatno miješana. U svakom slučaju, mnogi znanstvenici smatraju da se na površini čitave Zemlje nalazio jedan jedinstveni ocean magme.

Postupnim i mjestimičnim izrazitim hlađenjem tog rastaljenog površinskog dijela oceana magme, nastala je prvotna Zemljina kora građena od ultrabazičnih stijena, a koja se naziva komatit. Ove stijene bile su očvrsnute na temperaturama iznad 1100 stupnjeva, a što je više od temperature pri kojoj nastaje bazalt. Kako su komatiti bili gušćeg sastava no što je bila vruća rastaljena stijenska masa iz gornjeg plašta koja se nalazila ispod njih, oni su zbog konvekcijskog kretanja magme vrlo brzo u nju i tonuli, te ponovno bivali rastaljivani. To su u stvari bili začeci tektonike ploča. Uzastopnim i višestrukim takvim zbivanjima, konvekcijskim strujanjima izdižuća magma postajala je sve hladnija, da bi nakon što joj je temperatura pri izlasku na površinu Zemlje padala ispod 1100 stupnjeva, od nje nastajao bazalt, tj. prvotna oceanska kora.

Za razliku od oceanske kore bazičnog i/ili ultrabazičnog sastava, kontinentalna kora je više "kisela", tj. građena je od feldspata, kvarca i tinjaca, odnosno sadrži znatno više SiO_2 . Jedan od najstarijih sačuvanih fragmenata kontinentalne kore u novije je vrijeme nađen 370 km sjeverno od grada Yellowknife na prostoru kanadskog Sjeverozapadnog teritorija. Radiometrijsko datiranje starosti zrnaca cirkona iz tamo prisutnih tonalitnih gnajseva ukazuju na starost ovih stijena od 3.96 milijardi godina. Ovi gnajsevi su nastali metamorfozom tonalita (magmatske stijene, varijeteta diorita).

Istovrsnog su sastava i slične starosti fragmenti kontinentalne kore na Grenlandu i Antarktici, no najstarija su zrnca cirkona nađena u arhajskim riječnim pješčenjacima na prostoru zapadne Australije, čija je utvrđena starost od 4.1 - 4.3 milijarde godina. Postojanje ovih riječnih sedimenata nesumnjivo ukazuje na prisutnost kontinentalne kore već i tijekom hadija. Mnogi geolozi smatraju da je ta prvotna kontinentalna kora nastala u zonama subdukcije kada je oceanska kora, prekrivena tankim prekrivačem sedimentnih stijena, nakon subdukcije u plaštu bivala pretaljivana. Iz te se taljevine diferencirao lakši, "kiseliji" dio koji se dizao u najviše dijelove plašta i tu su od njega hlađenjem nastajali tonaliti i granodioriti, a ispod njih bazalti. Taljenjem tih tonalita i granodiorita u daljnjim fazama subdukcija, iz njih su se na isti način izdiferencirale i još lakše i "kiselije" stijene - graniti.

Ti najraniji kontinentalni fragmenti nisu bili veći od oko 500 km u promjeru, a bivali su postupno povećavani mehanizmima koji na Zemlji djeluju i danas. To su: sudari (kolizije) tektonskih ploča koje sadrže kontinentalne fragmente, čime dolazi do udruživanja njihovih kontinentalnih površina, formiranja otočnih lukova, odnosno mikrokontinenta iznad zona subdukcija, te zapunjavanja morskog prostora sedimentom erodiranim i donešenim sa nekog starijeg kontinentalnog fragmenta. Prilikom kolizije tog kontinentalnog fragmenta sa susjednim kontinentalnim fragmentom, taj se sedimentni materijal između tih dvaju kontinentalnih fragmenata topio i/ili metamorfozirao, te su od njega ponovno nastajale "kisele" magmatske ili metamorfne stijene; graniti i gnajsevi.

5. ARHAIK (ARHEOZOIK)

Geolozi 18. stoljeća u svojim su se istraživanjima ponekad susretali s metamorfnim i magmatskim kompleksima naslaga koje su uočavali ispod najstarijih fosilifernih naslaga. Ove još starije kristalinske stijene tako su postale poznate pod imenom prekambrij, označavajući naslage starije od kambrija.

U tadašnje vrijeme, korelacija i procjena starosti tih naoko nefosilifernih, izmijenjenih i deformiranih prekambrijskih stijena, izgledala je nemoguća, no ipak, mnogi geolozi su shvatili značenje ovih stijena, te su njihovu istraživanju posvetili čitav svoj život. To stoga jer prekambrijske stijene predstavljaju "zapis" ogromnog dijela Zemljine prošlosti, izgrađuju "jezgre" kontinenata, te sadrže bogata ležišta željeza i drugih metala.

Jedan od pionira istraživanja prekambrijskih stijena bio je kanadanin William Logan koji je još sredinom 19. stoljeća uspijevao odrediti superpozicijske odnose prekambrijskih stijena koje je istraživao na prostoru jugoistočne Kanade. Njihovu relativnu starost određivao je na temelju stupnja metamorfizma, pa je najstarijim prekambrijskim stijenama smatrao one koje su pretrpjele najizrazitiju metamorfozu.

No ipak, moderna istraživanja pokazuju da je u takvom razmišljanju Logan griješio. Naime, starije stijene ne moraju uopće biti metamorfozirane, dok mlađe, s druge strane, mogu biti izrazito metamorfozirane. Ipak, prostor koji je istraživao Logan bio je upravo građen od starijih gnajnsnih stijena i mlađih, slabije metamorfoziranih, tako da on u to vrijeme nije niti mogao doći do drugačijeg zaključka glede relativne starosti tih stijena. U svakom slučaju, Logana je takva situacija na prekambrijskim terenima jugoistočne Kanade navela da te prekambrijske stijene svrsta u dva razdoblja; u starije; arhaik (arheozoik) i u mlađe; proterozoik (algonkij). Prema podjeli "Međunarodnog povjerenstva za stratigrafiju", arhaiski eon se dijeli na (tab.2 - *Podjela arhaika*):

EON	ERA	prije sadašnjosti u milijunima godina
ARHAIK	Neoarhaik	2800 - 2500
	Mezoarhaik	3200 - 2800
	Paleoarhaik	3600 - 3200
	Eoarhaik	4000 - 3600

tab.2

Danas je poznato da je najpouzdanija korelacija prekambrijskih stijena moguća jedino na temelju odredbe njihove radiometrijske starosti, te je upravo na taj način i jedino moguće izvršiti njihovu kronostratigrafsku razdiobu, odnosno njihovo svrstavanje u određene geokronološke jedinice.

5.1. Kratoni i štitovi

Prekambrijske stijene najčešće izgrađuju prostrane, kroz vrlo duga vremenska razdoblja stabilne kontinentalne prostore - kratone. To je, dakle, stabilno kontinentalno prostranstvo na Zemlji na kojem je prekambrijska osnova ogoljela ili je prekrivena relativno tankim pokrovom sedimentnih stijena, a koje nisu bitnije poremećene. Ukoliko je prekambrijska osnova ogoljela, radi se o štitu, a ukoliko je prekrivena, radi se o platformi. (sl.27 - Sjevernoamerički kraton, štit i platforma).



sl.27

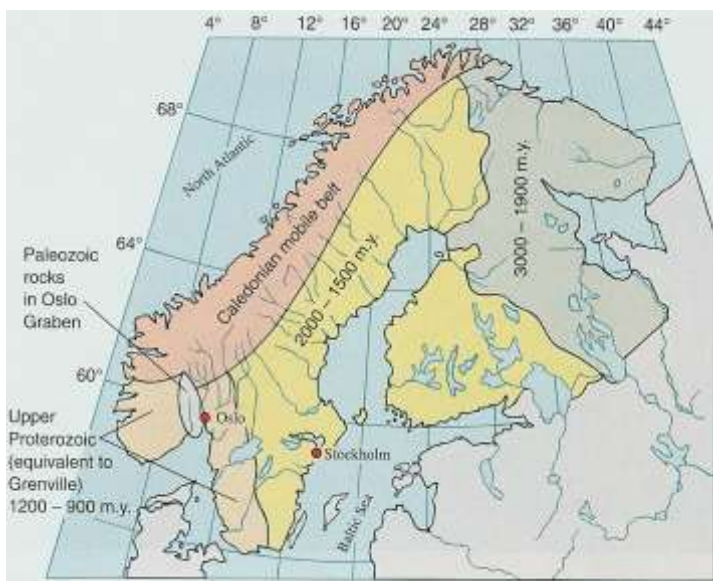
Kanadski štit prostire se na površini od oko 3.5 milijuna kilometara kvadratnih. Završno je konsolidiran prije otprilike 1.8 - 1.9 milijardi godina. Nakon toga, unutar prostora ovog štita više nije bilo izrazitijih tektonskih zbivanja (orogeneza). Tijekom posljednjeg ledenog doba, kretanjem ledenjaka, pokrovni sedimenti sjevernoameričkog kratona bili su erodirani s njegove površine, te je on ostao ogoljen na velikoj površini čineći kanadski štit. Južno i zapadno od kanadskog štita, prekambrijske stijene su i dalje prekrivene naslagama fanerozoika. Ove mlađe naslage su većinom horizontalne i tek su neznatno borane. To je platforma sjevernoameričkog kratona.

Temeljem strukturne građe, te radiometrijske starosti stijena koje ih izgrađuju, kratoni su obično podijeljeni na nekoliko provincija. Tako npr. u Sjevernoj Americi ima 7 prekambrijskih

provincija arhajske i proterozojske starosti, a koje sve zajedno s fanerozojskim sedimentnim pokrivačem čine sjevernoamerički ili laurencijski kraton.

5.2. Baltički štit

Najprostranije površinsko rasprostranjenje prekambrijskih stijena u Europi prisutno je na prostoru baltičkog štita (sl.28 - prekambrijske stijene na prostoru baltičkog štita). Njegov sjeverozapadni dio prekriven je starije paleozojskim orogenetskim pojasom kaledonida. Idući ka istoku, starost stijena baltičkog štita sve je veća. Tako, najstarije stijene nalaze se na njegovu istočnom dijelu i arhajske su starosti. U centralnom su dijelu štita proterozojske stijene, pri čemu se



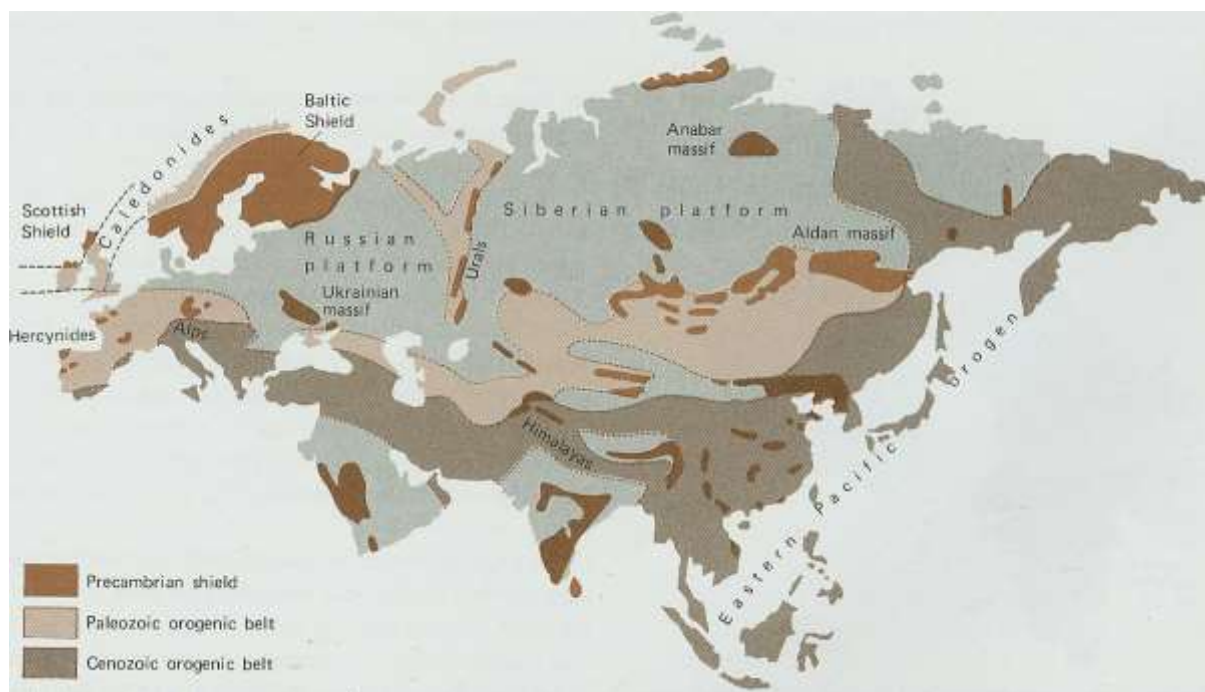
sl.28

one najmlađe proterozojske nalaze na jugozapadnim rubovima današnjih Norveške i Švedske. Ove najmlađe stijene vremenski su ekvivalent Grinvil provincije kanadskog štita, a za koje se smatra da su odvojene od kanadskog štita tijekom raspada Laurencije.

Južno od baltičkog štita, na prostoru Ukrajine, nalazi se ukrajinski štit, za kojeg se smatra da predstavlja južni nastavak baltičkog štita. Njihova "veza" prekrivena je mlađim naslagama ruske platforme. Baltički štit i ukrajinski štit u stvari su dijelovi starije paleozojskog kratona - Baltike (njen skandinavski dio zove se Fenosarmacija).

5.3. Sibirski kraton

Sibirski kraton predstavlja kristalinsku jezgru Azije, odnosno dio starije paleozojskog kratona Sibirija (Angara) (sl.29 - *Glavne geološke značajke Eurazije*). Međutim, uglavnom je prekriven mlađim sedimentima sibirske platforme. Ipak, dva su prostora gdje prekambrijske stijene izdanjuju na većoj površini. To su anabarski i aldanski štitovi čija je veza prekrivena mlađim naslagama sibirske platforme.



sl.29

5.4. Ostali Zemljini kratoni i štitovi

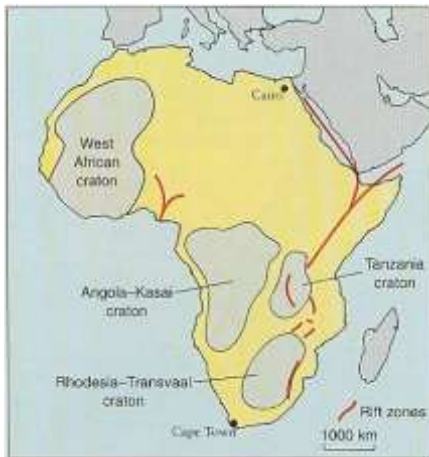
Južna Amerika – Na prostoru Južne Amerike prisutna su tri štita: gvajanski, brazilski i patagonijski štit (sl.30 - *Prekambrijski štitovi na prostoru Južne Amerike*). Njihove najstarije dijelove izgrađuju škriljavci i gnajsevi, srednje stare; metamorfiti i magmatiti, a najmlađe; slejtovi, filiti, kvarciti, konglomerati i različiti efuzivi. Zbog njihove prekrivenosti kako mlađim naslagama, tako i gustim šumama, relativno su slabo istraženi.

Afrika – prekambrijske stijene javljaju se na površini



sl.30

sl.31



gotovo polovine afričkog kontinenta. Dobro su istražene jer su mjestimice vrlo bogate zlatom, dijamantima, bakrom, uranom i kromom. Izdvojene su u četiri štita: zapadnoafrički, angola-kasai, tanzanijski i rodezijsko-transvalski (sl.31 - *Kratonski segmenti Afrike*).

Indija – Indija se može podijeliti u dva geološki bitno različita dijela; na sjeveru je himalajski alpski orogenetski pojas, a na jugu se nalazi indijski kraton unutar kojeg je izdvojeno nekoliko provincija ovisno o njihovim strukturnim karakteristikama i vremenu njihove konsolidacije tijekom prekambrija (sl.32 - *prekambrijske provincije Indije*). Smatra se da ta svaka provincija

predstavlja u stvari zaseban kontinentalni fragment koji su bivali međusobno spajani orogenetskim zbivanjima tijekom prekambrija. Njihova konačna konsolidacija dogodila se prije otprilike 1.5 milijardi godina. Sve do mlađe krede indijski kraton bio je stabilan da bi se tada na prostoru Dekana kroz mnogobrojne vulkane izlila ogromna količina bazaltne lave. Smatra se da se to dogodilo kao posljedica odvajanja Sejšelskih otoka od Indije.

Australija – Istočni dio Australije izgrađuje fanerozojski orogenetski pojas, dok se prekambrijske stijene nalaze u centralnom i zapadnom dijelu kontinenta. Najveći prostor zauzima Yigarn štit zapadne Australije, a sjeverno od njega nalazi se Pilbara štit (sl.33 -



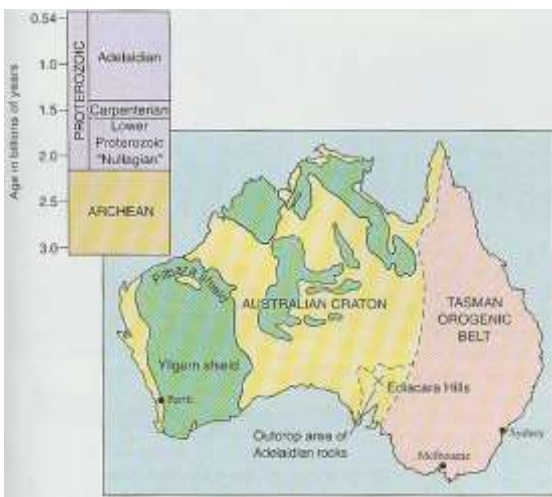
sl.32

Glavne geološke značajke Australije). Oba su građena od tipične grinston-granulitske asocijacije stijena i predstavljaju tipične lokacije za proučavanje arhajske geologije.

Proterozojske sedimentne stijene Australije nisu metamorfozirane i vrlo su pogodne za proučavanje taložnih zbivanja u to vrijeme i na tom prostoru. Naročito su česti proterozojski šelfni sedimenti, stromatoliti, te trakaste željezovite naslage približne starosti kao i one iz kanadske Animikie grupe. Također, prisutni su i mlađeproterozojski glacijalni

sedimenti iznad kojih dolaze i marinski sedimenti tzv. Rawnsley kvarcita (metamorfozirani pješčenjaci) s čestim nalazima bezskeletnih organizama (Ediacara fauna).

sl.33



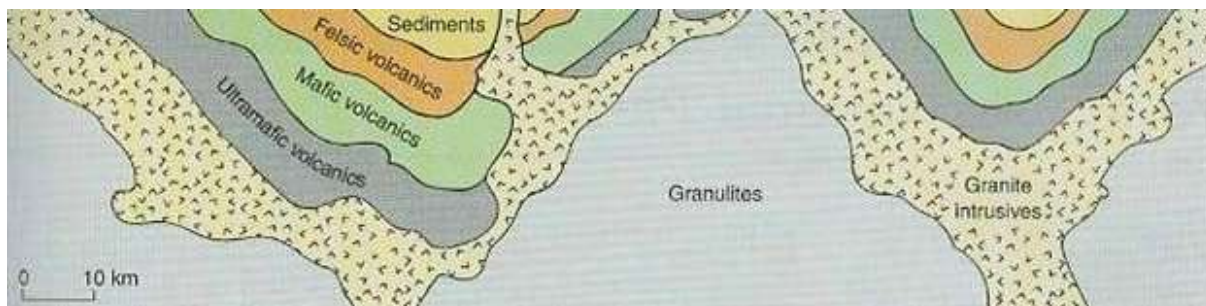
Antarktika – Ispod leda Antarktike nalazi se prekambrijski štit koji je i unatoč modernim tehnikama geofizičkih istraživanja još prilično neistražen. Jedina šansa za istraživanje njegove građe geolozima se pruža na planinskim vrhuncima koji vire iz leda i na rubovima kontinenta, gdje stijene nisu prekrivene debelim naslagama leda. Arhajske stijene nalaze se na istočnim, a proterozojske na preostalim dijelovima štita. Zapadni dio Antarktike prekrivaju gornjokredne

(i mlađe) borane naslage koje su po građi vrlo slične andskom orogenetskom pojasu zapadne Južne Amerike sa kojom je Australija bila povezana sve do mlađe krede.

Svi ovi štitovi prisutni na južnim kontinentalnim prostorima današnje Zemlje, predstavljaju u stvari dijelove paleozojskog jedinstvenog južnog kontinentalnog prostora nazvanog Gondwana.

5.5. Arhajske stijene kratona i štitova

Generalno, arhajske stijene kratona sastoje se iz dvaju skupina; granuliti i grinstoni (sl.34 - Presijek kroz dva grinston pojasa).



sl.34

Granuliti su u stvari gnajsevi nastali metamorfozom tonalita, granodiorita, granita, a često i anortozita.

Za razliku od njih, grinstoni su karakterizirani tipičnim slijedom nekoliko stijenskih tipova koji su međusobno oštro odijeljeni. U donjem dijelu jednog tipičnog grinston stijenskog slijeda nalaze se ultrabazične stijene (komatiti), iznad kojih dolaze bazalti s kloritom i hornblendom koji im daju zelenu boju i po kojoj su i dobili ime. Iznad bazalta dolaze kiseliji eruptivi andezitnog i riolitnog sastava koji su u vrhu prekriveni sedimentima; šejlovima, grauvakama, konglomeratima nastalim erozijom grinstona, a rijeđe i tzv. Trakastim željezovitim naslagama ("*Banded Iron Formations*"). Uobičajeno prisutne "*Pillow*" ("*jastučaste*") lave unutar vulkanita grinstona jasno ukazuju da su nastali podmorskim vulkanskim erupcijama. Čitava jedna takva grinston sekvencija, uobičajeno sinklinalnih, odnosno koritastih formi, redovito je okružena granitima nastalim u posljednim fazama formiranja grinstona.

Grinstoni su izrazita značajka arhajskih terena na čitavoj Zemlji. Prisutni su na prostorima današnje Sjeverne Amerike (kanadski štit), južne Afrike (rodezijski kraton, Kaapvaal kraton s Barberton planinama - najstariji kraton na Zemlji), zapadne Australije (Pilbara blok) i zapadne Indije (Dharwar pojas). Gospodarski su vrlo značajni. To stoga jer su uz njihove donje, ultrabazične dijelove, često vezana ležišta kroma i nikla, uz gornje, kiselije dijelove, ležišta cinka, bakra, srebra i zlata, a uz najgornje, sedimentne dijelove, ležišta mangana, barita i željeza. Rudna ležišta zlata Južne Afrike (npr. Witwatersrand supergrupa - ležište sa polovinom svjetske proizvodnje zlata) upravo potječu iz grinston asocijacije stijena koja je tijekom proterozoika bila erodirana rijekama tako da se zlato danas vadi iz proterozojskih riječnih i deltnih naslaga - kvarcnih pješčenjaka i konglomerata iz vrha grinston stijenske asocijacije na prostoru južnoafričkih Barberton planina.

Izmjena stijenskih tipova unutar grinston stijenske asocijacije, od ultrabazičnih ka kiselim stijenskim varijetetima, ukazuje na njihov nastanak diferencijacijom iz neke prvotne bazične magme.

S druge strane pak, sedimenti koji se nalaze u vrhu grinston asocijacije ukazuju na prirodu najranijih arhajskih kontinenata. Tako, prisutnost valutica granita unutar konglomerata iz vrha grinstona, ukazuje da su prvotna arhajska kopna (protokontinenti)

mjestimice bila izgrađena i od granita. Osim konglomerata, u sedimentnim dijelovima grinstona često su prisutne grauivake i tamni šejlovi.

Kako se unutar sedimenata arhajskih grinstona tek vrlo rijetko može naći plitkomorskih stijena s plitkomorskim teksturama (npr. valnih brazdi, kose slojevitosti), to se smatra da tijekom arhaika plitkomorski šelfni prostori nisu bili česti, nego su naprotiv, postojeći protokontinenti bili vrlo strmih padina, malih dimenzija i vrlo neravne površine, sa kojih je erodirani krupnozrnati i sitnije-zrnati materijal bivao turbidnim strujama spiran niz strme padine u dubokomorski prostor. Recimo, kao današnji Island i slični vulkanski otoci.

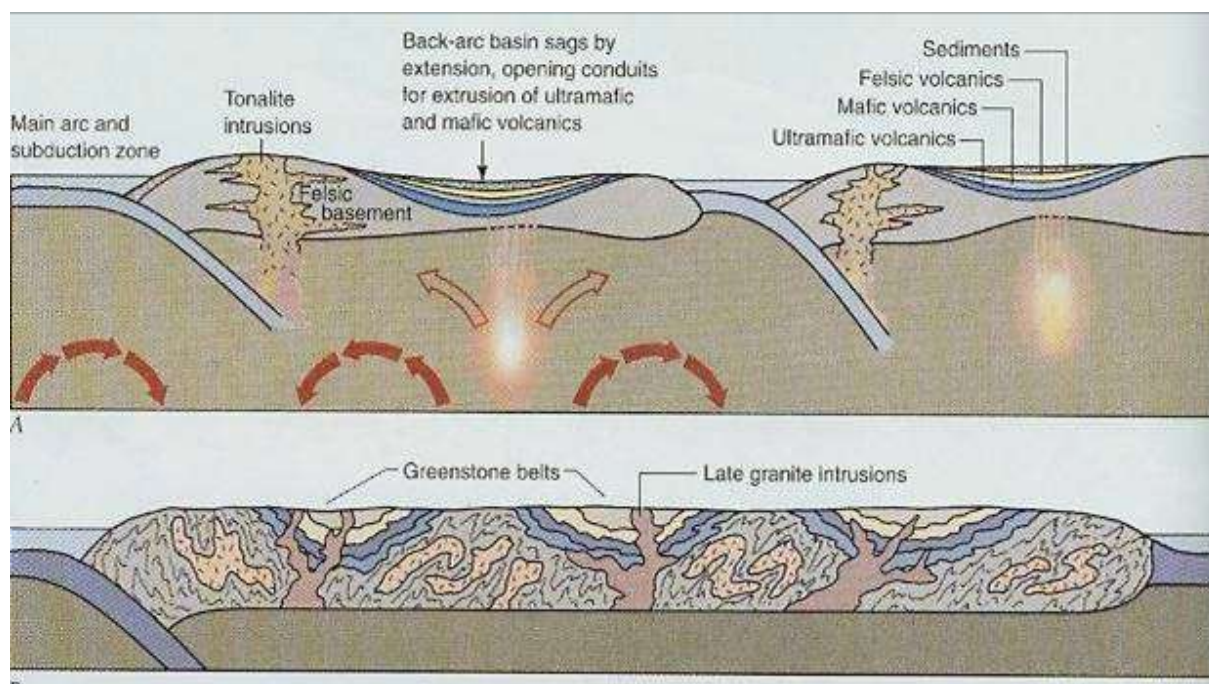
Stoga su se marinski karbonati i kvarcni pješčenjaci, koji često izgrađuju plićevodnije sedimente mlađih geoloških razdoblja, vrlo rijetko taložili tijekom arhaika. Također, unutar najstarijih arhajskih stijena rijetko se mogu naći i sedimenti koji su taloženi na kopnu (npr. riječni sedimenti). To najvjerojatnije stoga jer su kopneni prostori bili vrlo mali i relativno rijetki, pa su se kopnene naslage i rijetko formirale. Naravno, ne može se isključiti niti mogućnost da su se kopnene naslage negdje formirale i u većem obimu, ali su u mlađim razdobljima bile potpuno konzumirane i/ili erodirane.

5.6. Arhajska tektonika

Do gibanja tektonskih ploča nije došlo tijekom prvih milijardu godina postojanja Zemlje. To stoga jer je tijekom tog razdoblja užarena unutrašnjost Zemlje još bila bez većeg i debljeg čvrstog stijenskog "omotača" - litosfere. Tek prije oko 3.5 milijardi godina površinski dio Zemlje se dovoljno ohladio, te je došlo do formiranja prvotnih tektonskih ploča (njihovi ostaci su danas djelomice prisutni npr. u arhajskim kompleksima Kanade i Skandinavije).

Jednom kada je započela, tektonika ploča omogućavala je nastanak sve većih i većih kontinentalnih prostora, bilo pretaljivanjem stijenskog materijala u zonama subdukcije od kojeg je onda diferencijacijom nastajala nova kontinentalna kora, bilo sudarima već formiranih manjih kontinentalnih masa.

Arhajska tektonika ploča bila je vjerojatno mnogo dinamičnija no ona današnja. To stoga jer su konvekcijska strujanja u plaštu bila izrazitija, a što je dovodilo do formiranja mnogobrojnih srednjooceanskih hrptova i zona subdukcije sa izrazitim podmorskim vulkanizmom. Te zone subdukcije upravo su i bili prostori u kojima su nastajali grinstoni i



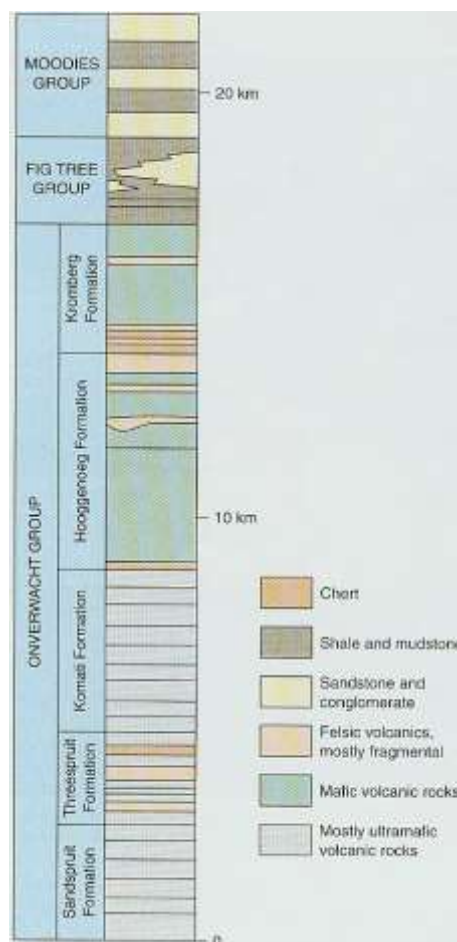
granuliti.

U početnoj fazi nastanka grinston-granulitske asocijacije stijena uz zone subdukcije nastajali su tonalitni vulkanski lukovi. U kopnenim uvjetima oni su bili erodirani te je taj materijal bivao transportiran u subdukcijski jarak, da bi zajedno s oceanskom korom bivao subduciran pod otočni luk. Time je nastala više kisela magma koja se utiskivala nagore u podzemni prostor otočnog luka, stvarajući time još i dodatnu kontinentalnu koru. Iza vulkanskog luka zbog ekstenzije dolazilo je do rasjedanja i formiranja korita ("Back-arc" - zalučni bazen) unutar kojeg su se duž dubokih rasjeda u početku dešavale efuzije bazične, a zatim i sve kiselijske lave. Na kiselu lavu zatim su se taložili sedimenti nastali erozijom obližnjeg otočnog luka. Kompresijom čitavog tog prostora otočnih lukova i zalučnih bazena, nastajala je grinston-granulitska asocijacija stijena; od otočnih lukova kompresijom i metamorfozom nastajali su granuliti, a od zalučnih bazena sinklinalne forme grinston stijenske asocijacije (sl.35 - *Model razvoja grinston pojasa i rasta kontinentalne kore*). Tijekom te kompresijske faze često je dolazilo i do granitnih intruzija kroz grinston asocijaciju.

5.7. Arhajske pokrovne (sedimentne) stijene

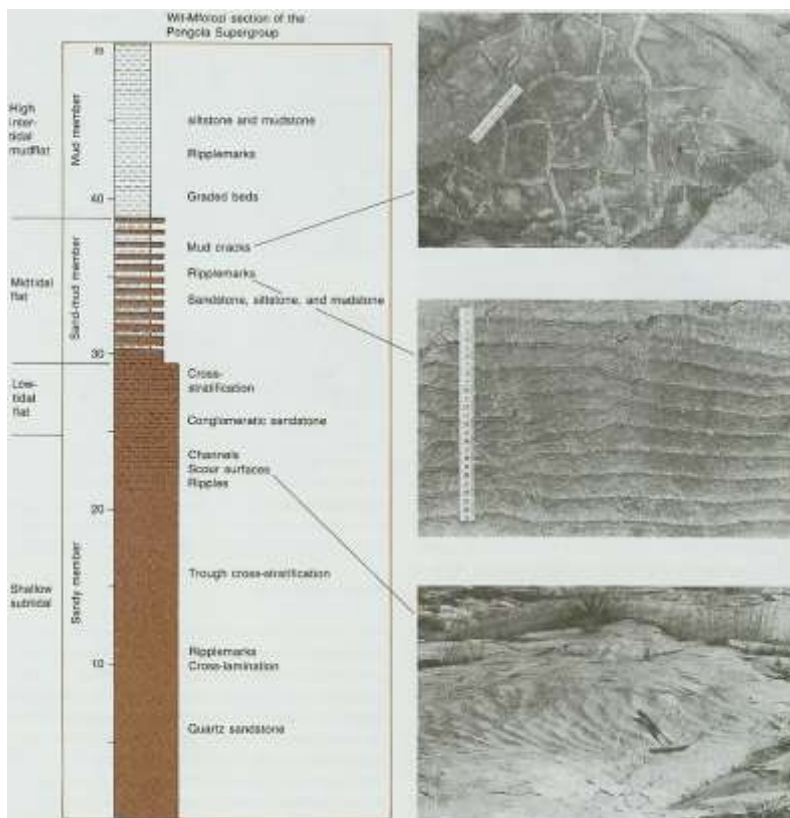
Mnoge regije Zemlje izgrađuju sedimentne stijene arhaika. Među njima, po dobroj otkrivenosti i dostupnosti istraživanjima, ističu se Južnoafričke Barberton planine i Pilbara blok zapadne Australije. One sa prostora današnjih planina Barberton taložene su na prostranom arhajskom kratonu koji je bio završno konsolidiran prije 3 milijarde godina. Kako na tom kratonu od tada nije bilo tektonskih zbivanja, to sedimentne stijene koje ga prekrivaju nisu metamorfozirane. Stoga slijed na prostoru Barberton planina predstavlja izvrstan primjer potpunog razvoja grinston stijenske asocijacije (sl.36 - *Stratigrafski slijed grinston pojasa Barberton planina*).

Ona započinje tzv. Onverwacht grupom građenom u donjem dijelu od ultrabazičnih i bazičnih vulkanita koji prema gore prelaze u sve češće kisele eruptive. Na njima slijede dubokomorski konglomerati, pješčenjaci i šejlovi tzv. Fig tree grupe, zatim tzv. Moodies grupe, a zatim plitkovodni, subtajdalni i intertajdalni sedimenti tzv. Pongola supergrupe (sl.37 - *Stratigrafski slijed plitkovodnih sedimenata Pongola supergrupe*) građene od plitkomorskih klastita koji su taloženi prije oko 3 milijarde godina. Oni jasno ukazuju da je već u to vrijeme, na tom prostoru bilo veliko kopno koje se trošilo, a koje je bilo građeno od stijena Onverwacht, Fig tree i Moodies grupe. Na plitkomorskim sedimentima Pongola supergrupe slijede kopneni klastiti (riječni i jezerski) Witwatersrand-a, taloženi prije otprilike 2.5 - 2.8 milijardi godina. Kako Witwatersrand sedimenti sadrže i zlato, to su oni i vrlo dobro istraženi; prostiru se na površini od oko 103 000 km², debljina im iznosi 8 - 10 km. Slijed Pongola supergrupe i Witwatersranda predstavljaju najstarije poznate pokrovne stijene na Zemlji.



sl.36

sl.37



Ovaj stijenski slijed na prostoru Južne Afrike lijepo ilustrira razvoj jednog kratona od njegove magmatske podloge, pa do njegova potpunog okopnjavanja, tj. formiranja kontinenta uz taloženje sedimenata u kopnenim uvjetima. Smatra se da je ovaj prostor Južne Afrike, u stvari prostor najstarijeg (prvog nastalog ?) kratona u Zemljinoj povjesti.

5.8. Fosili iz arhajskih stijena

Zbog izrazitog prevladavanja fosilno sačuvanih samo prokariotskih organizama u stijenama arhajske starosti, arhaik se

može nazvati dobom prokariota. O njihovoj prisutnosti govore sporadični nalazi arhajskih stromatolita (sl.38 - *Arhajski stromatolit iz zapadne Australije*) - laminiranih karbonatnih stijena nastalih posredstvom životne djelatnosti cijanobakterija u prostoru plitkog subtajdala ili češće, interdajdala, gdje je dolazilo do naljepljivanja sitnog karbonatnog mulja na vlakanca cijanobakterija, koje su poput prevlaka ili tepiha prekrivale te okoliše. Ipak, stromatoliti su znatno češći u proterozoiku nego arhaiku, jer tijekom arhaika još nije bilo toliko plitkovodnih šelfnih prostora kao tijekom proterozoika.

Najstariji stromatoliti nađeni su unutar tzv. Warrawoona grupe australskog Pilbara štita. Stari su 3.5 milijardi godina. Također, crni rožnjaci Warrawoona grupe često sadrže i filamente fosilnih prokariota (sl.39 - *Filamentni prokariotski mikrofosili iz Warrawoona grupe*).

Nešto mlađi stromatoliti, stari oko 3.0 milijardi godina, nađeni su u Pongola grupi južne Afrike, a oni stari 2.8 milijardi godina nađeni su u Bulawayan grupi Australije.

U mikroskopskim preparatima rožnjaka i slejtova Fig tree grupe Južne Afrike, starim 3.1 milijardi godina, nađeni su mnogobrojni sferični ostaci mikrometarskih dimenzija za koje se također smatra da potječu od cijanobakterija. S obzirom da su ti ostaci nađeni kraj grada Barbertona, nazvani su *Archaeosphaeroides barbertonensis* (sl.40 - *Archaeosphaeroides barbertonensis*). Neki slojevi Fig tree grupe vrlo često sadrže

sl.39



sl.38

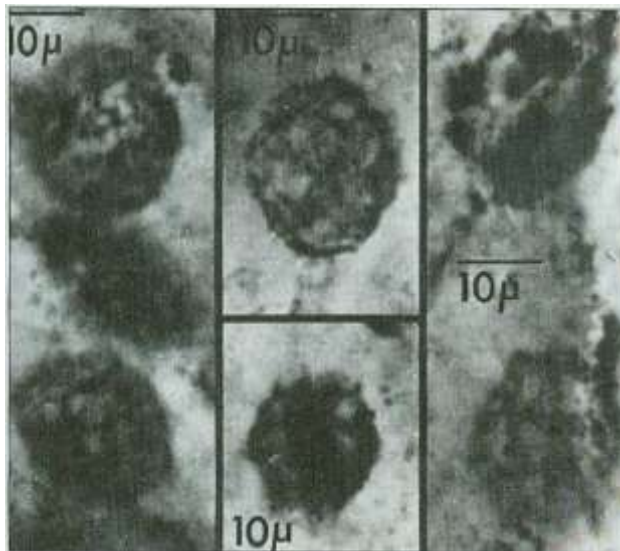


čestice raspršene organske materije koja im daje crnu ili tamnosivu boju. Istraživanja su pokazala da ta raspršena organska materija u stvari predstavlja proizvode raspada klorofila. To su tzv. kemijski fosili.

Pored cijanobakterija, iz arhaika su poznati i fosilni ostaci nekih neidentificiranih bakterija čije su se stanice za života prožimale piritom ili sideritom, a zbog čega su se i uspjele fosilno sačuvati. To su tzv. pseudomorfi.

Ponegdje, na području južnog Grenlanda, prisutni su i nalazi kemijskih fosila u željezovitim stijenama, starim 3.8 milijardi godina. Ove stijene sadrže odnos ^{12}C i ^{13}C kao što je on danas prisutan u svim živim organizmima, a što jasno ukazuje na prisutnost vrlo malih količina organske tvari u tim stijenama.

Iz arhajskih stijena poznati su i fosilni ostaci magnetobakterija, a koje su unutar svojih stanica izlučivale nanometarske kristale magnetita. Vrlo sitne nakupine magnetita u arhajskim stijenama često ukazuju upravo na negdašnju prisutnost tih bakterija.



sl.40

5.9. Postanak života

Današnja izrazita raznolikost živog svijeta Zemlje, rezultat je kemijske i biološke evolucije tijekom milijardi godina. Iako bi bilo jako zgodno imati fosilnu dokumentaciju iz najranijih razdoblja Zemljine prošlosti, a iz koje bi se vidio prijelaz iz nežive tvari u prvotne organizme, to na žalost nije slučaj. Stoga se teorije o nastanku života temelje na današnjim spoznajama znanosti o tim najranijim počecima i oblicima života, pri čemu se za takva istraživanja koriste vrlo oskudni fosilni ostaci nađeni u sedimentnim stijenama nastalim u tim najranijim razdobljima postojanja Zemlje.

Nastojanje da od jednostavnih formi nastaju kompleksnije strukture, osnovna je karakteristika kako neživih, tako i živih sustava (tzv. samoorganizacija). Ta činjenica snažno utječe i na teorije o nastanku života. Jasno je da su subatomske čestice grupirane u pojedini atom, pojedini atomi su grupirani u pojedine molekule, pojedine molekule su grupirane u molekulske lance i složene strukture, pa je vrlo moguće da atomi određene kombinacije elemenata (ugljik, kisik, vodik, dušik, sumpor, fosfor) načine i neku organsku molekulu. Ta se molekula može udružiti s nekim drugim organskim molekulama tvoreći kompleksnije skupine molekula, a upravo takve molekule i izgrađuju sve žive organizme. Takva jedna složeniya molekula je molekula deoksiribonukleinske kiseline (DNA), a koja se nalazi u stanicama svih živih organizama i preko koje se informacije prenose na slijedeću generaciju potomstva.

Neke teorije o postanku života ukazuju da se takve velike i kompleksne molekule u stanici mogu organizirati do te mjere da postanu sposobne za obavljanje različitih životnih funkcija, formirajući time u stvari, i prve jednostanične organizme koji se mogu udruživati formirajući sve složenije životne forme, a koji također mogu početi rasti, prehranjivati se, razmnožavati i mutirati.

No postavlja se pitanje: "Da li je na ovaj način došlo do nastanka prvog života na Zemlji?" Znanstvenici ne mogu potvrditi sve korake u jednom takvom razvoju od prvotnog

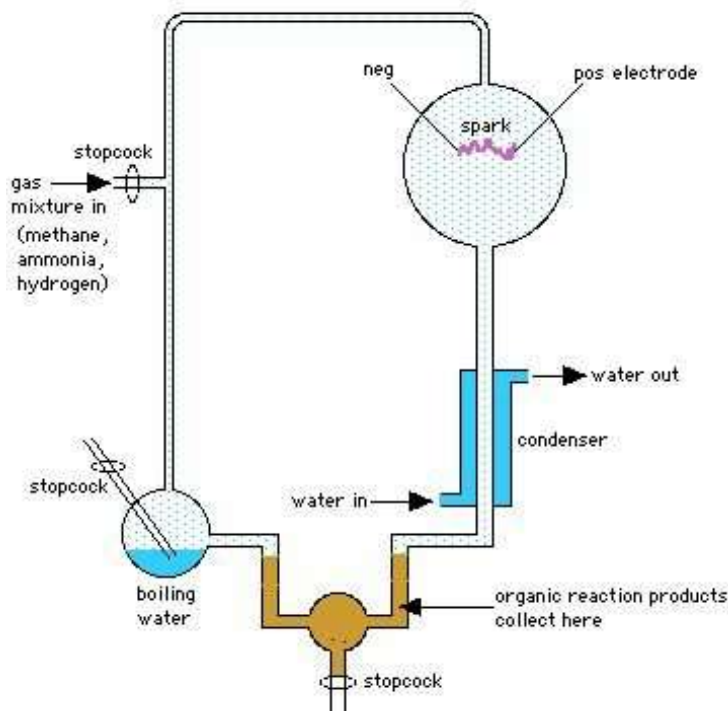
života do njegovih naprednijih formi, no osnovni koncept grupiranja jednostavnijih formi u složenije, biokemijski je lako dokaziv.

5.10. Laboratorijska sinteza života

Još sredinom 19. stoljeća znanstvenici su uspijevali u primitivnim laboratorijskim uvjetima stvoriti neke najjednostavnije organske sastojke. To je bio veliki i važan preokret u nastojanjima da se shvati i dokuči postanak najprimitivnijeg života na Zemlji. Jasno im je bilo da su za postanak života bili potrebni ugljik, vodik, kisik, dušik, fosfor i sumpor, a koji su ionako vrlo česti elementi Sunčeva sustava, te su stoga bili prisutni i u prvotnoj Zemljinoj atmosferi. Ipak, da bi iz navedenih kemijskih elemenata nastao primitivan život, potrebna je njihova točno određena i vrlo komplicirana kombinacija i organizacija, i tek tada mogu nastati jednostavne organske molekule - aminokiseline, čijim vezanjem nastaju proteini – osnovni gradivni elementi svakog organizma.

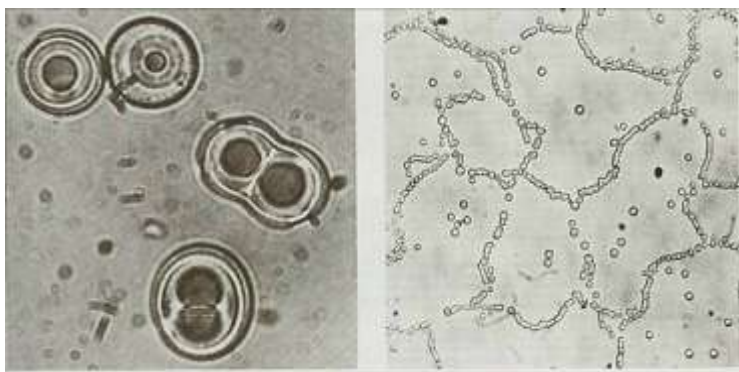
Stanley Miller je 1953. godine u laboratorijskim uvjetima prvi uspješno sintetizirao aminokiseline i neke druge organske molekule. On je u staklenoj kugli simulirao prvotnu Zemljinu atmosferu građenu od metana, amonijaka, vodika i vodene pare kroz koju je puštao električne iskre, a koje su simulirale negdašnje munje (sl.41 - *Uređaj Stanley Miller-a*). Nakon osam dana, kondenzirana voda u kugli postala je mutna i smeđa, a njena analiza je pokazala da sadrži obilje aminokiselina i drugih organskih molekula koje izgrađuju žive organizme (umjesto električnih iskri, kao stimulans nastanku aminokiselina mogu se koristiti i UV zrake ili pak kombinacija UV zraka i električnih iskri, iz čega proizlazi da je UV zračenje na prvotnoj Zemljinoj površinu u stvari bilo dobrodošlo).

Dodatni pokusi nekih drugih biokemičara, pokazali su pak da se slični organski sastojci mogu proizvesti i od smjese ugljičnog dioksida, dušika i vodene pare, te je utvrđeno da je za uspjeh svih ovih pokusa bila najbitnija upravo odsutnost slobodnog kisika, a kojeg upravo i nije bilo u najranijoj Zemljinoj atmosferi. Da bi se mogle udružiti u proteinske molekule, aminokiseline su morale izgubiti vodu. To se postiglo zagrijavanjem proizvedene "organske juhe" na temperaturu od najmanje 140 stupnjeva, a prema eksperimentima biokemičara Sidney W. Foxa, šezdesetih godina prošlog stoljeća, ukoliko je u njoj bila prisutna i fosforna kiselina, ta je temperatura mogla biti i oko 70 stupnjeva (na prvotnoj Zemlji tu potrebnu toplinu su davale podmorske vulkanske erupcije). Fox je u laboratorijskim uvjetima uspijevaio formirati molekulске lance nalik proteinima građene od 18 najčešćih aminokiselina koje je nazivao protenoidi (kod protenoida su aminokiseline kaotično vezane bez neke pravilnosti, a što je pak slučaj kod proteina). Smatrao je da oni u stvari predstavljaju prijelazne oblike ka pravim proteinima. Hlađenjem "organske



sl.41

sl.42



juhe" s protenoidima, oni se počinju grupirati u sitne mikrosfere (sl.42 lijevo - Laboratorijski stvorene mikrosfere), koje po mnogim karakteristikama nalikuju živim stanicama; zadobivaju tanku membranu kroz koju mogu komunicirati s okolnim prostorom, mogu se dijeliti i sl. Obično se ove mikrosfere vežu u tanke niti, tzv. filamente, kao kod

modernih *Streptococcus* bakterija (sl.42 desno - *Streptococcus bakerija*), te mogu gibati i svoje unutrašnje sastavne dijelove, kao što je to slučaj i kod živih stanica

Vrlo slične protenoide Fox je nalazio i u recetnim uvjetima, u blizini podmorskih "ventila" havajskih vulkana, kroz koje na površinu izlaze vulkanski plinovi sličnog sastava kakve je on proizvodio u laboratoriju.

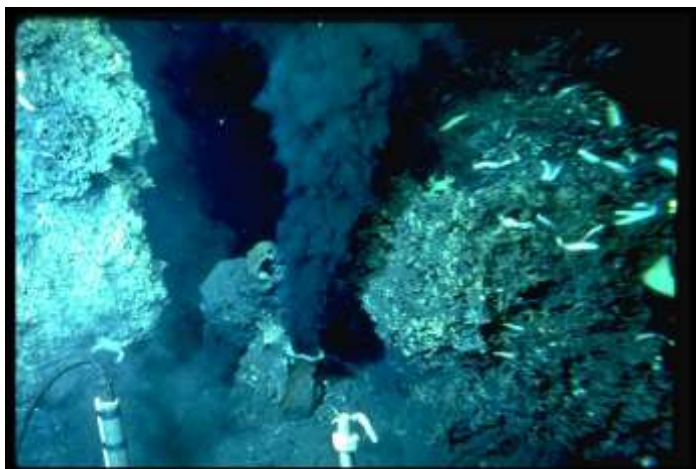
Laboratorijska istraživanja pokazuju da su se prvotni proteini tijekom najranijih razdoblja Zemljine prošlosti mogli formirati na površinama čestica gline i kristala pirit jer oni u svojoj građi sadrže ione metala suprotnih električnih naboja koji se međusobno privlače, a te privlačne sile djeluju i na aminokiseline prisutne u "organskoj juhi" koje se pod njihovim utjecajem grupiraju i povezuju u pravilne lance, tvoreći tako složenije lance organskih molekula nalik proteinima.

Također, osim sinteze aminokiselina na Zemlji, one su mogle doći i iz svemira, a na tu mogućnost ukazuju i nalazi aminokiselina u Murchison meteoritu koji je 1969. pao na prostor Australije (grad Murchison kraj Melbourne-a).

5.11. Mjesto nastanka života

Mnogi razlozi upućuju na činjenicu da je život nastao u moru. U vodi se mogu otapati najrazličitije organske tvari, morskim strujanjima one mogu biti međusobno miješane i spajane u složenije strukture. Sve do nedavno smatralo se da je mjesto nastanka najjednostavnijih oblika života bila fotička zona, gdje su aminokiseline i mikrosfere mogle nastajati na načine kako je to dokazano u laboratorijima - u toploj "organskoj juhi".

sl.43



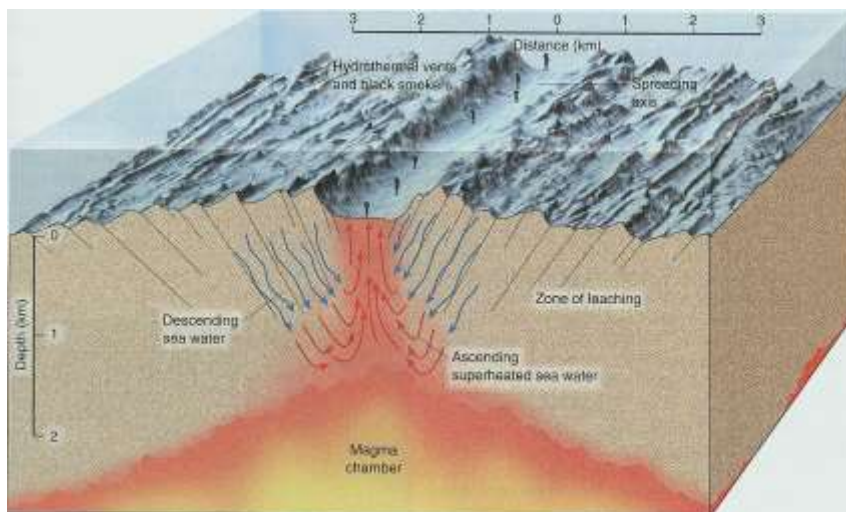
Ipak, recentna podmornička istraživanja srednjooceanskih hrptova smještenih na dubinama od nekoliko tisuća metara, pokazala su da se i u totalnom mraku velikih dubina, u prostoru oko vrućih hidrotermalnih izvora temperature i do 100° C ("Crni dimnjaci") (sl.43 - "Crni dimnjak"), pa i u tim samim vrućim vulkanskim pukotinama srednjooceanskih hrptova, nalazi obilje primitivnog

života - hipertermofilnih mikroba. Ovi organizmi u nedostatku svjetla umjesto fotosintezom, energiju pribavljaju kemosintezom; u sedimentu prisutne sulfite reduciraju u vodikov sulfid, a zatim on unutar stanice reagira s kisikom, te nastaje sumporovodik (ne kisik). Ovi

kemosintetski mikrobi koji reduciraju sulfate predstavljaju osnovu hranidbenog lanca mnogobrojnih invertebratnih organizama, koji također tu žive; različitih člankonožaca i mekušaca, a tu su i nekoliko metara dugački crvi koji s ovim mikrobima žive u simbiozi.

Nastanak mikroba u ovim dubokomorskim prostorima može se objasniti na slijedeći način: relativno hladnija oceanska voda kroz pukotine srednjooceanskog hrpta prodire u podzemlje (sl.44 - Presjek kroz središnji dio srednjooceanskog hrpta). Tamo se u blizini rastaljenog

magnetskog tijela zagrijava na oko 1000° C, obogaćuje različitim elementima (sumporom, željezom, bakrom, cinkom i dr.), te se vraća na površinu oceanskog hrpta. Izlaskom te još vrlo vruće vode kroz podmorske pukotine na ipak hladniju površinu oceanskog hrpta, iz nje se izlučuju različiti elementi, te se njihovim različitim kombinacijama

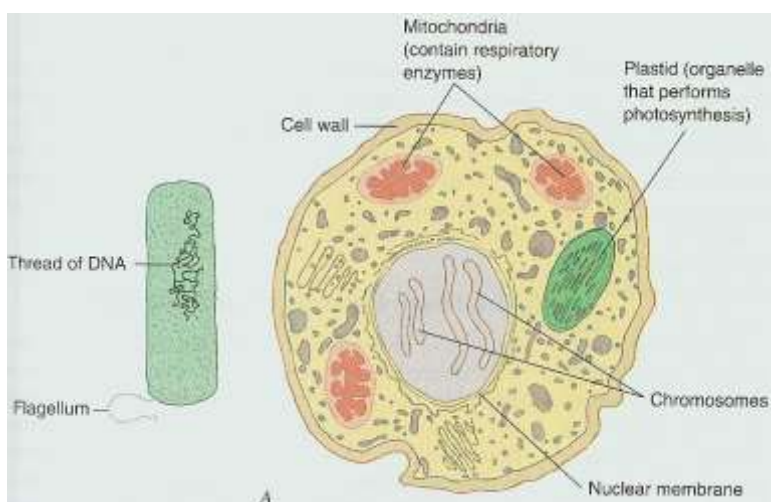


sl.44

formiraju organske molekule – aminokiseline, od kojih nastaju prvotne protostanice, a zatim daljnjim razvojem i primitivni kemosintetski mikrobi. Ovakav proces vjerojatno se odvijao i u najranijim razdobljima Zemljine prošlosti, čime su i u to vrijeme, i u takvim okolišima, zasigurno također nastajali ovakvi primitivni organizmi.

Osim u takvom ekstremnom okolišu, različiti mikrobi su nađeni i unutar čvrstih stijena duboko u Zemljinoj unutrašnjosti. To su litotropi. Nađeni su npr. u Švedskoj unutar granita na dubinama od oko 3600 m.

5.12. Prokarioti i eukarioti



sl.45

Nema nesumnjivog dokaza o točnom vremenu kada je život prešao granicu iz kemijske u organsku evoluciju. Ipak, nekako se smatra da se to desilo negdje u intervalu od prije 3.5 - 4 milijardi godina. U stijenama te starosti, paleontolozi su našli fosilne ostatke organizama skupine prokariota (sl.45 - Usporedba prokariotske i eukariotske stanice). To su organizmi koji nemaju stanične jezgre ovijene

membranom i razmnožavaju se dijeljenjem stanica, pri čemu novonastale stanice imaju potpuno ista svojstva (nasljeđuju isti genski sastav) kao i one od kojih su nastale. Jedino mutacijom, odnosno nastankom nešto drugačijih stanica u procesu njihova dijeljenja, novi prokariotski organizmi mogu postati malo drugačiji od roditelja. Stoga se prokariotski

organizmi i nisu bitnije mijenjali od najranijih razdoblja Zemljina postojanja do danas (npr. cijanobakterije).

Evolucijom su od prokariotskih organizama nastali eukarioti, tj. organizmi s membranom oko stanične jezgre i s jasnim kromosomima, od kojih se oni na višem stupnju razvoja razmnožavaju seksualno (primitivniji - tzv. izmjenom generacija). Eukariotima pripadaju svi tzv. "viši" organizmi: alge, biljke, gljive i sve životinje, od protozoa do čovjeka.

Još od 70-ih godina prošlog stoljeća zna se da su organele eukariotskih organizama jednom bile nezavisni primitivni jednostanični organizmi. Npr. stanice cijanobakterija koje su bile "pojedene" od strane većih stanica, ali nisu bile "probavljene" nego su započele u toj većoj stanici sa njom živjeti simbiotski. Veća stanica je imala korist od jedne takve organele ili na taj način što je od nje dobivala energiju koju je ona proizvodila npr. fotosintezom (npr. kloroplasti), ili je pak ta organela pretvarala ugljikohidrate i masne kiseline u ugljični dioksid i vodu stvarajući istovremeno energijom bogate fosfate (npr. mitohondriji). Da su organele prvotno nastali zaista kao "uljezi" u većim stanicama, to se vidi iz toga što kloroplasti i mitohondriji u njima imaju sposobnost dijeljenja, sposobnost sinteze proteina, obavijeni su svojim vlastitim membranama, a imaju i svoju DNA. Dodatno, danas je poznata činjenica da postoji velika sličnost u građi između npr. kloroplasta i stanice cijanobakterije.

Takva udruživanja stanica vidljiva su npr. kod recentnog primitivnog jednostaničnog organizma *Pelomyxa palustris*, koji nastanjuje slatkovodna jezera. Umjesto organele ovaj organizam u svojoj stanici sadrži bakteriju koja mu služi za proizvodnju energije. S druge pak strane, bakterija profitira jer je zaštićena unutar stanice ovog organizma, a tu joj je i "skladište" hrane koju proizvodi za oboje.

U svakom slučaju, tijekom evolucije, lakše su preživjeli organizmi koji su simbiotskim udruživanjem stekli nekakve veće sposobnosti od organizama koji se nisu udruživali, te su oni uspjevali preživjeti i dalje se razvijati. Dodatno, razvojem seksualnog razmnožavanja kod eukariota dobila se mogućnost "miješanja" (ili kombiniranja) roditeljskih gena i nastanka neznatno drugačijih jedinki, a koje su onda sa tim svojim novim osobinama ponekad bile prilagodljivije neznatno promjenjenom životnom okolišu, čime su preživjele, dok su "stare" forme izumrle. To je naročito lijepo vidljivo nakon masovnih izumiranja kada su se od rijetkih preživjelih, tj. prilagodljivijih vrsta, tijekom narednih milijuna godina razvile mnogobrojne druge vrste različita načina života i izgleda, već ovisno od uvjeta okoliša koji su nastanjivale. Taj se proces zove adaptivna radijacija.

6. PROTEROZOIK (ALGONKIJ)

Proterozojski eon započeo je prije 2.5 milijarde godina, a završio je prije 542 milijuna godina. Granica između arhaika i proterozoika dogovorno je postavljena nekako u vrijeme početka "moderne" tektonike ploča na Zemlji, odnosno negdje oko početka izrazitijeg formiranja sedimentnih stijena na prostorima plitkomorskih šelfova koji su se formirali uz prostrane mlade arhajske kratone. Tako, sedimentacija u odnosu na arhajsku bitno je različita; dok se tijekom najvećeg dijela arhaika odvijala uglavnom u dubokomorskim okolišima, tijekom proterozoika njen značajni dio odvijao se i unutar plitkomorskih prostora. Proterozojske stijene su manje izmijenjene nego arhajske čime ih je lakše proučavati i interpretirati, no ipak, kao i arhajske, nisu bogate fosilima što stvara poteškoće pri odredbama njihove starosti. Prema podjeli "Međunarodnog povjerenstva za stratigrafiju", proterozoik se dijeli na (sl.42):

EON	ERA	PERIOD	prije sadašnjosti u milijunima godina
PROTEROZOIK	Neoproterozoik	Ediakarij-Vendij Kriogenij Tonij	635 - 542 720 - 635 1000 - 720
	Mezoproterozoik	Stenij Ektazij Kalimij	1200 - 1000 1400 - 1200 1600 - 1400
	Paleoproterozoik	Staterij Orosirij Racij Siderij	1800 - 1600 2050 - 1800 2300 - 2050 2500 - 2300

tab.3

6.1. Atmosferski kisik i sedimentne stijene proterozoika

Zemljina prvotna atmosfera, nastala izlaskom plinova iz unutrašnjosti Zemlje na njenu površinu tijekom dugog razdoblja mnogobrojnih vulkanskih erupcija, nije sadržavala slobodni (molekularni) kisik, odnosno, bilo ga je tek onoliko koliko ga je uspjelo nastati fotokemijskim reakcijama, a on se odmah vezao za različite kemijske elemente (sumpor, željezo), ili za različite plinove koji su izlazili iz podzemlja na površinu (npr. CO se oksidirao u CO₂). Time se i ona neznatna količina kisika u atmosferi brzo "potrošila". Isti proces se zbiva i danas, no ipak, danas su vulkanske erupcije rijetke.

U današnjim uvjetima, fotosintezom bi se kisik od količine 0 do današnje razine nadomjestio za nekoliko tisuća godina, pa se postavlja pitanje zašto je njegova akumulacija u prekambrijskoj atmosferi trajala tako dugo, a započela je još pri pojavi prvih cijanobakterija otprije 3.5 milijardi godina? Odgovor je: "Pa zato jer sve tamo do prije 2.5 milijardi godine

na Zemlji nije bilo dovoljno cijanobakterija, a nije ih bilo stoga jer do tada nije bilo dovoljno prostranih plitkomorskih prostora (šelfova i plitkih epikontinentalnih mora)". Ono malo što ih je bilo uz strme kontinentalne rubove arhajskih protokontinenata, nije bilo dostatno za intenzivniju proizvodnju kisika. Također, tijekom arhaika nije bilo bitnijeg strujanja morske vode bogate nutrijentima iz dubljemorskih prostora, a što je bitno za razvoj cijanobakterija, a onda i stromatolita. Tek formiranjem većih kontinentalnih prostora tijekom starijeg proterozoika, cirkulacija iz dubljemorskih prostora postaje izrazitija, a istovremeno se povećava i površina plitkomorskih prostora pogodnih za razvoj cijanobakterija.

Ne zna se pouzdano kada je količina slobodnog kisika u atmosferi dosegla današnju razinu, no ipak, smatra se da ga je tamo negdje prije 2 milijarde godina u atmosferi već bilo, pa se već i po toj relativno maloj količini kisika u atmosferi, bitno razlikuje razdoblje najvećeg dijela proterozoika od arhaika.

Nedostatak slobodnog kisika u atmosferi jasno je vidljiv iz sedimentnog zapisa. Naime, u atmosferskim uvjetima s kisikom, mineral uranit (UO_2) brzo oksidira i otapa se iz stijena. Također, i pirit (FeS_2) brzo se raspada u atmosferskim uvjetima s kisikom. Danas su stoga i pirit i uranit vrlo rijetko prisutni u sedimentima, a također su vrlo rijetki i u sedimentima starosti do 2 milijarde godina. Naprotiv, prilično se česti u kontinentalnim i

plitkomorskim sedimentima starijim od 2 milijarde godina.

Trakaste željezovite formacije ("Banded Iron Formations" = BIF) (sl.46 - *Dio trakaste željezovite formacije*) tip su sedimenata koji govori o atmosferskim uvjetima tijekom najranijih razdoblja Zemljine prošlosti. Izgrađuju ih obojene lamine rožnjaka, čije boje ovise o prisutnim mineralima željeza. Lamine koje sadrže magnetit (Fe_3O_4), a rjeđe hematit (Fe_2O_3),



sl.46

crvene su boje, dok one sive sadrže neoksidirano željezo, pirit (FeS_2).

Otapanjem željezovitih minerala (pirita) na površini Zemlje u čijoj atmosferi nije bilo kisika, u prvotne Zemaljske oceane ulazilo je dvovalentno željezo (Fe^{2+} - fero ion), te se u njima ono nalazilo u otopljenom stanju. Fotosintetskim djelovanjem prvotnih cijanobakterija, u oceanima su nastajale male količine kisika zbog čega je dolazilo do promjene valencije dijela Fe^{2+} fero iona, koji su time prelazili u Fe^{3+} feri ione, a čime je dolazilo do izlučivanja fero-feri oksida - magnetita. Magnetit je, dakle, u svom sastavu sadržavao još i nešto dvovalentnih Fe^{2+} fero iona. U slučajevima povremeno izrazitije oksidacije prisutnih Fe^{2+} fero iona, dolazilo je samo do izlučivanja Fe^{3+} feri oksida, čime je nastajao hematit. Veća količina kisika u trenucima kada se "potrošilo" sve trenutno raspoloživo željezo u vodi, nepogodno je djelovala za daljnji razvoj cijanobakterija jer je kisik za njih bio otrovan (živjele su u anoksičnim uvjetima), te su one nestajale. Izostanak kisika zaustavljao je tada daljnje izlučivanje magnetita (i/ili hematita), a na dnu oceana taložili su se silicijski sedimenti obogaćeni s neoksidiranim željezom - piritom. U takvim je sada ponovljenim anoksičnim uvjetima ponovno dolazilo do razvoja cijanobakterija i do stvaranja novog kisika i proces se ponavljao.

Željezo u morskoj vodi potjecalo je dijelom i iz podmorskih hidrotermnih "ventila" ("crni dimnjaci") srednjooceanskih hrptova, gdje ono i danas mjestimice u otopljenom stanju izlazi na dno oceana. Ipak, na današnjoj Zemlji nema toliko podmorskih "crnih dimnjaka" kao

što ih je bilo u vrijeme arhaika i proterozoika, kada je Zemlja bila znatno toplija, a njena kora bitno tanja. Stoga se u to vrijeme na dnima oceana i taložilo mnogo više željezovitih sedimenata nego danas, kada je to gotovo beznačajna pojava.

Trakaste željezovite formacije danas su gospodarski vrlo značajne jer predstavljaju glavna svjetska ležišta željeza, npr. na prostorima Ukrajine, Brazila, Kanade, Minesote i zapadne Australije.

Ove naslage česte su samo iz razdoblja prekambrija. Pri tome, iako ih ima i u arhajskim naslagama starosti i do 3 milijarde godina, mnogo su češće iz proterozoika, i to naročito njegova intervala između 2.5-1.8 milijardi godina. U svakom slučaju, činjenica da je željezo iz najstarijih trakastih željezovitih formacija djelomice oksidirano, govori u prilog postojanju određenih količina kisika u arhajskom podmorju.

Primjer koji govori o pojavi velikih količina slobodnog kisika u ranoj Zemljinoj atmosferi su tzv. "crveni slojevi" ("Red Beds"). Oni nikad nisu prisutni u terenima starijim od 2.2-2.3 milijarde godina. Hematit, mineral željeza koji im daje crvenu boju, nastao je potpunom oksidacijom prisutnih željezovitih minerala (pirita, fajalita) u vrijeme kada je količina kisika u atmosferi postala dostatna da dođe do te oksidacije. Za razliku od BIF-a, željezo je kod crvenih slojeva oksidiralo na površini Zemlje, dok su BIF nastajale u oceanima u vrijeme kada atmosfera još nije sadržavala kisik. Crveni slojevi su česti i unutar klastičnih naslaga fanerozoika (naročito perma i trijasa), kada nastaju u vrućim pustinjским prostorima Pangeae dehidratizacijom prisutnih željezovitih hidroksida.

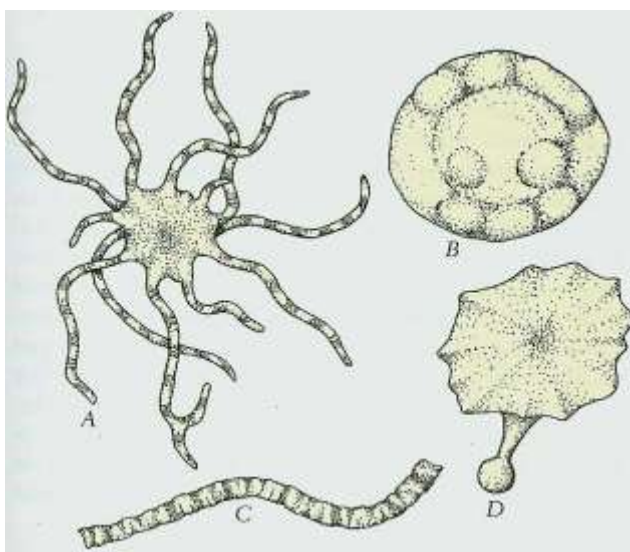
Neki pak znanstvenici smatraju da se crveni slojevi u arhajskim sedimentima ne mogu naći ne zbog manjka kisika, nego stoga jer su arhajski sedimenti uglavnom svi dubokomorski, a crveni slojevi su uglavnom kopneni sedimenti. Ipak, arhajski Witwatersrand sedimenti su kopneni, pa ipak nisu crveni slojevi, a i sadrže dosta pirita i uranita, iz čega jasno proizlazi da je pomanjkanje kisika ipak glavni razlog njihova nenastanka tijekom arhaika.

U rasponu između 2.2-1.8 milijardi godina, ovisno o količini kisika u određenom taložnom okolišu, negdje su se taložili crveni slojevi, a negdje još trakaste željezovite formacije. No ipak, u naslagama mlađim od 1.8 milijardi godina, trakaste željezovite formacije više nisu prisutne (u oceanima više nema Fe^{2+} željeza jer se ono oksidira na kopnu) - sve kopnene naslage bogate željezom, a izložene kisiku kojeg u atmosferi već ima u značajnim količinama, prelazile su u hematitske crvene slojeve.

6.2. Život u proterozoiku

Cijanobakterije, koje su sudjelovale u stvaranju stromatolita, bile su izrazito prevladavajući organizmi tijekom arhaika, a naročito su se raširile tijekom proterozoika. Bilo je pokušaja da se stromatoliti, a koji se javljaju u raznim formama, iskoriste za odredbu starosti stijena, no to je propalo kada se shvatilo da jedne te iste cijanobakterije izgrađuju stromatolite različitih formi, a što je isključivo bilo ovisno o okolišu u kojem su živjele, a ne o vremenu njihova nastanka.

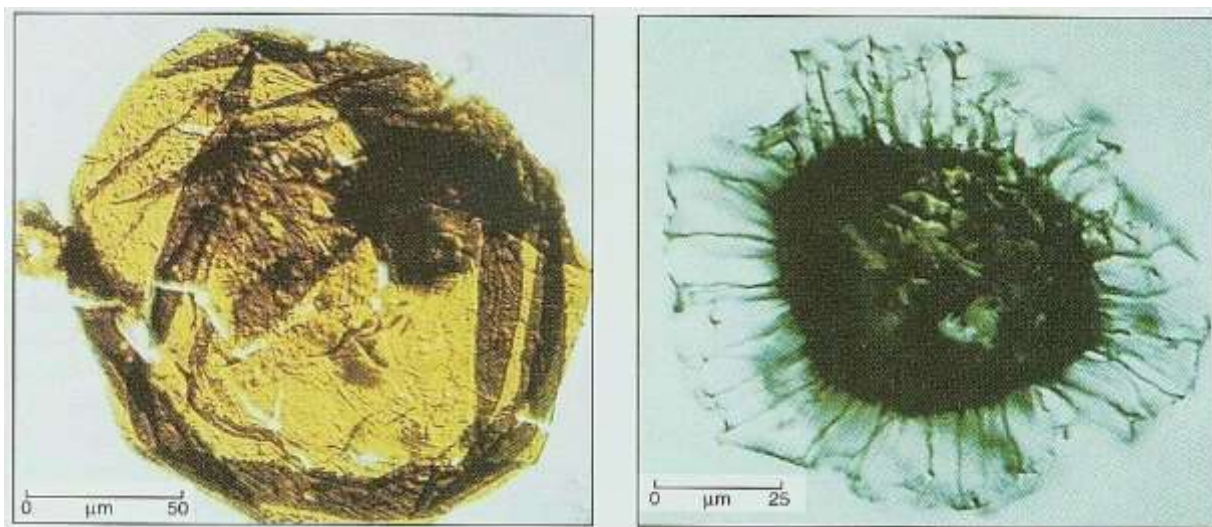
Sredinom 20. stoljeća prvi puta su otkrivene fosilno sačuvani ostaci već



sl.47

konkretnijih formi cijanobakterija (za razliku od samo stanica nađenih u Fig Tree Grupe Južne Afrike) i to u 1.9 milijardi starim rožnjacima tzv. Gunflint formacije s područja Ontarija i sjeverne Minesote. Ovi nalazi pokazuju da su ti proterozojski, prokariotski organizmi bili vrlo nalik današnjim prokariotskim organizmima. Te različite cijanobakterijske forme veličina nekoliko desetaka mikrona dobile su različita imena (sl.47): *Eoastrion* (a), *Eosphaera* (b), *Animikiea* (c), *Kakabekia* (d) *Gunflintia*, *Oscillatoria*, *Lyngbya*.

Nije točno poznato kad su se pojavili prvi eukariotski organizmi. Pokušaji što točnije odredbe vremena pojave prvih eukariota temeljili su se na uočavanju veličine fosilno sačuvanih stanica. Naime, poznato je da stanice prokariotskih organizama nikad nemaju veće dimenzije od 20 mikrona, dok su one primitivnih eukariotskih algi redovito veće od 60 mikrona. Kako je tek u stijenama mlađim od 1.4 milijarde godina moguće naći fosilno očuvane stanice veće od 60 mikrona, iz toga proizlazi da su se eukariotski organizmi razvili nešto malo ranije od 1.4 milijardi godina.



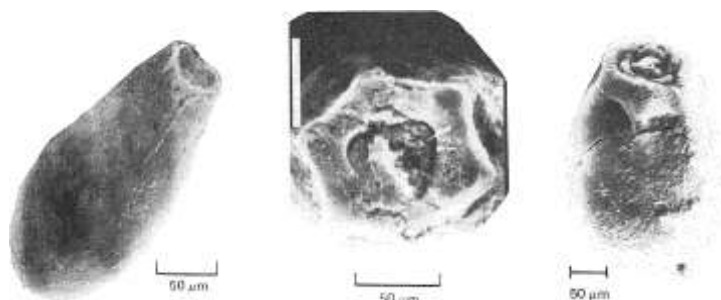
sl.48

Najuvjerljiviji proterozojski dokazi o postojanju eukariotskih organizama jesu akritarhe (fosilni ostaci "of uncertain origin"). Ovi subovalni ili zrakasti organizmi dominantna su skupina paleozojskog algalnog planktona i za neke od njih se smatra da predstavljaju mirujuće ciste (stanice u mirovanju) nekih preteća dinoflagelata.

Neki znanstvenici pak smatraju da su akritarhe u stvari zelene alge. No, u svakom slučaju, njihove velike dimenzije (u mikro svijetu), te kemijski sastav i građa njihovih staničnih membrana, jasno upućuju na činjenicu da su akritarhe bili eukariotski organizmi (sl.48 - Akritarhe; *Kildinosphaera lophostriata* iz Chuar grupe, *Skiagia scottica* iz starijeg kambrija sjevernog Grenlanda).

Akritarhi veći od 60 mikrona prilično su rijetki u stijenama starijim od 900 milijuna godina (prvi veći od 60 mikrona nađeni su u stijenama starim 1.6 milijardi godina, a manji od 60 mikrona i u stijenama starim čak 3.2 milijardi godina), a od tog se razdoblja naglo počinju razvijati, te su u mlađim naslagama vrlo česti i raznoliki, a što je često vrlo pogodno za odredbu relativnih starosti naslaga najmlađeg proterozoika.

Najstariji fosilno sačuvani

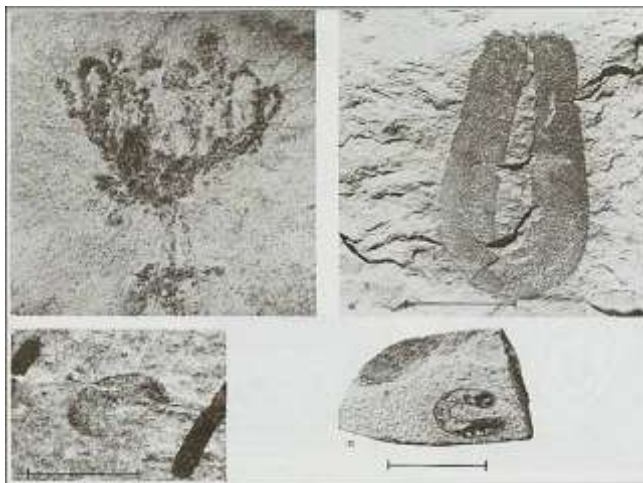


sl.49

jednostanični eukarioti skupine protozoa (praživi) oblika su malih vaza i starosti su oko 800 milijuna godina, a nađeni su unutar stijena Chuar grupe Grand kanjona, Arizona (sl.49 - *Protozoi iz Chuar grupe*).

Prije prve pojave jednostaničnih i višestaničnih eukariotskih organizama, potrošača hrane (životinja), Zemaljski ekosistem bio je jednostavan; fotosintetski proizvođači hrane, cijanobakterije i eukariotske alge, nisu imale nikakve konkurencije, a niti su bile ugrožavane od različitih grabežljivaca jer ih tada nije ni bilo. Njihov napredak bio je ovisan od donosu nutrijenata morskim strujanjima, a kako je nutrijenata bilo u ogromnim količinama, ovi primitivni biljni organizmi imali su bujan razvoj, a što je ujedno u određenoj mjeri onemogućavalo i razvoj drugih životnih formi. Ipak, u tom algalnom obilju u jednom trenutku su se morali pojaviti životinjski organizmi kojima su te alge služile kao hrana. Kad se to točno desilo, nije poznato jer ti prvotni životinjski organizmi nisu imali skeleta.

Tragovi kretanja i ubušivanja mjestimice nađeni unutar proterozojskih sedimenata, jasno govore o njihovoj prisutnosti, a ti tragovi nigdje se ne nalaze u stijenama starijim od 1 milijarde godina. Tako npr. i u dobro istraženim stijenama Belt supergrupe Montane, starim 1.3 milijardi godina, u kojima su nađene i najstarije višestanične alge (sl.50 - *Višestanične alge mlađeg proterozoika Montane i*



sl.50



sl.51



sl.52

Kanade), nema nikakvih tragova prisutnosti životinjskih organizama.

Najstariji tragovi - ihnofosili, bezskeletnih organizama uvijek su predstavljeni jednostavnim kanalima zaostalim nakon njihova prolaska kroz sediment (sl.51 - *Donja slojna ploha sa tragovima ubušivanja iz mlađeg proterozoika Norveške*). Ovi jednostavni tragovi tijekom vršnog proterozoika i starijeg kambrija prelaze u mnogo složenije (sl.52 - *Donja slojna ploha sa tragovima ubušivanja iz prijelaznih naslaga proterozoik-kambrij Norveške*), a što ukazuje na već složenije životinjske forme koje su se razvile iz onih jednostavnijih.

Na mnogim dijelovima Zemlje (Australija, Rusija, Engleska, Sjeverna Amerika), najraniji ihnofosili proterozoika nađeni su iznad glacijalnih sedimenata, a što ukazuje da ih tijekom nekoliko razdoblja mlađeproterozojskih glacijacija nije bilo.

Dodatna potvrda o postojanju bezskeletnih organizama tijekom najmlađeg proterozojskog razdoblja, dobivena je tek sredinom prošlog stoljeća. Naime, od tada su na mnogim predjelima Zemlje, ispod naslaga kambrija, bogatih mnoštvom fosila skeletnih,

organizama, istraživači u gornjoproterozojskim pješčenjacima počeli nalaziti otiske razmjerno krupnih bezskeletnih organizama. Oni su se uspjevali sačuvati na način da su tijekom neke prirodne katastrofe naglo bili zatrpani sedimentom. Odsutnost kisika ispod velike količine sedimenta spriječila je njihovo brzo truljenje, te su se njihovi otisci tijekom litifikacije

sedimenta uspjeti očuvati. Ovi organizmi prevladavajuće pripadaju skupini coelenterata (životinje s primarnom tjelesnom šupljinom - spužve, koralji), tj. to su uglavnom fosilno sačuvane različite meduze, a ima i člankonožaca, te mnogih organizama nesigurnog sistematskog položaja.

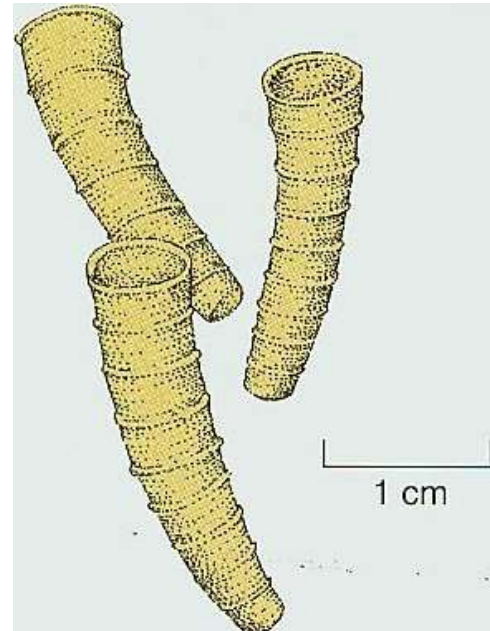
sl.53



Najpoznatija takva zajednica fosilno sačuvanih bezskeletnih organizama je tzv. Ediacara fauna (sl.53 - *Neki fosili Ediacara faune*) iz južne Australije (otkrivena 1946.), a koja je živjela prije otprilike 630 milijuna godina, a trajala je oko 50 milijuna godina. Taj dio mlađeg proterozoika naziva se vendij (prema nazivu najmlađeg dijela proterozoika u Rusiji). U njoj ima i mnoštvo skupina organizama koje nemaju današnjih srodnika. Prisutne su *Cyclomedusa*, *Tribrachidium* (bez današnjih sličnih srodnika - izumrlo koljeno ?), *Parvancorina* (artropod), *Dickinsonia* (plosnati ili anelidni crv veličine i do 1 m), *Spriggina*, *Kimberella*, itd. Ova fauna je značajna stoga jer predstavlja zapis prve evolucijske raznolikosti višestaničnog živog svijeta, a vjerojatno neki od njenih predstavnika predstavljaju i pretke budućih organizama. Organizmi kakvi su nađeni u australskoj Ediacara fauni prisutni su i na mnogim drugim dijelovima Zemlje, npr. u Africi, Rusiji i Engleskoj. Unutar Ediacara faune na području Namibije nađen je i najstariji organizam (anelidni crv) koji je izlučivao skelet od kalcij karbonata. To je bila *Cloudina*. Bila je dužine oko nekoliko cm (sl.54 - *Cloudina*).

Prošlo je 400 milijuna godina od prve pojave eukariotskih stanica (prije 1.4 milijarde godina) pa do prve pojave višestaničnih životinjskih organizama (prije 1 milijarde godina). Zašto tako puno ? Možda zbog izostanka seksualne reprodukcije kod najprimitivnijih organizama, ili pak zbog još uvijek premale količine kisika u proterozojskoj atmosferi iz tog vremenskog intervala.

Nagla pojava već prilično složenih organizama Ediacara faune može se upravo povezati s količinom kisika u atmosferi. Naime, može se pretpostaviti da je tijekom mlađeg proterozoika bilo dijelova Zemlje u kojima su se organizmi dugotrajno razvijali u tzv. "oazama kisika", a koje su nastale na mjestima veće koncentracije vodenog bilja koje je na tim mjestima proizvodilo i veću količinu kisika. Kada je količina kisika u atmosferi porasla na 1 % današnje, iz tih se "oaza" već relativno složeniji život raširio po čitavoj Zemlji.



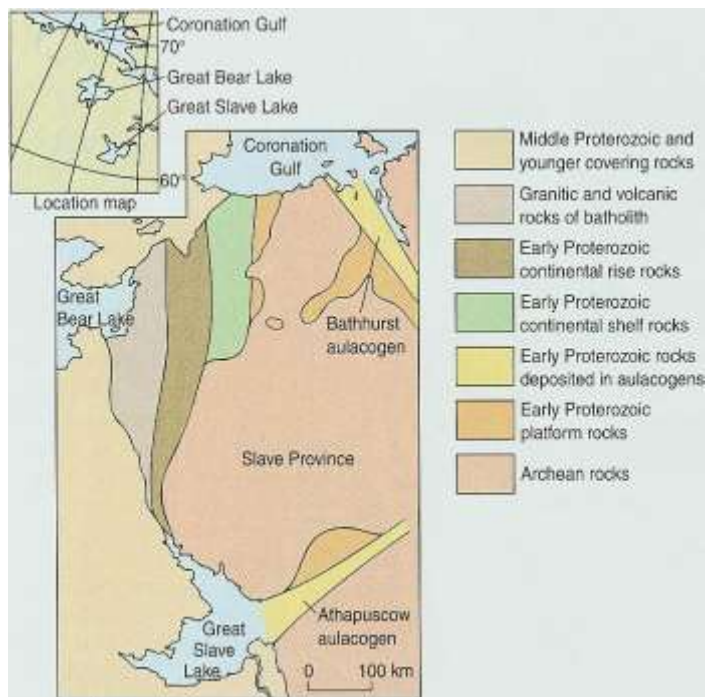
sl.54

U svakom slučaju, nije vjerojatno da su se te već složenije životinjske forme naglo i odjednom javile potkraj proterozoika, a među njima su već bili i relativno složeni predstavnici anelida (člankovitih crva), te artropodi.

6.3. Proterozoik kanadskog štita

Grenland i prekambrijske provincije Sjeverne Amerike, u starijem su proterozoiku, a zatim i u starijem paleozoiku, bili sjedinjeni u jedinstveni kontinentalni prostor kojeg danas nazivamo Laurencija. Ono što je u to vrijeme bila kristalinska jezgra Laurencije, to je danas izloženo na površini i poznato je kao najveći prekambrijski štit na Zemlji - kanadski štit.

Iako su se "moderne" orogeneze, kakve su izgrađivale planinske lance tijekom Fanerozoika, najvjerojatnije odvijale još i tijekom mlađeg arhaika (npr. prostor Južne Afrike), najstarije jasne dokaze o njihovom postojanju možemo naći tek u starijem proterozoiku, unutar Wopmay orogena (sl.55 - *Tektonski elementi Wopmay orogena*) kanadskog štita (ili npr. unutar Trans-Hudson orogena Kanadskog štita). Wopmay orogen se formirao prije 2.1-1.8 milijardi godina. Stijenski i tektonski zapis na ovom prostoru kanadskog Sjeverozapadnog Teritorija jasno ukazuje na nekoliko faza orogeneze: otvaranje oceana, taloženje duž novonastalih kontinentalnih rubova, a zatim i na zatvaranje oceana, te izdizanje planinskog lanca.



sl.55

Grenville provincija istočne Kanade i SAD-a najmlađa je srednjoproterozojska regija kanadskog štita. Njen veliki dio, kako se ide ka zapadu sjevernoameričkog kontinenta, prekriven je fanerozojskim sedimentima. Grenville provinciju izgrađuju izrazito borani karbonati i pješčenjaci koji su mjestimice metamorfozirani i presječeni s magmatskim intruzijama. Ovo boranje desilo se u okviru grinvilske orogeneze otprije 1.2-1.0 milijardi godina.

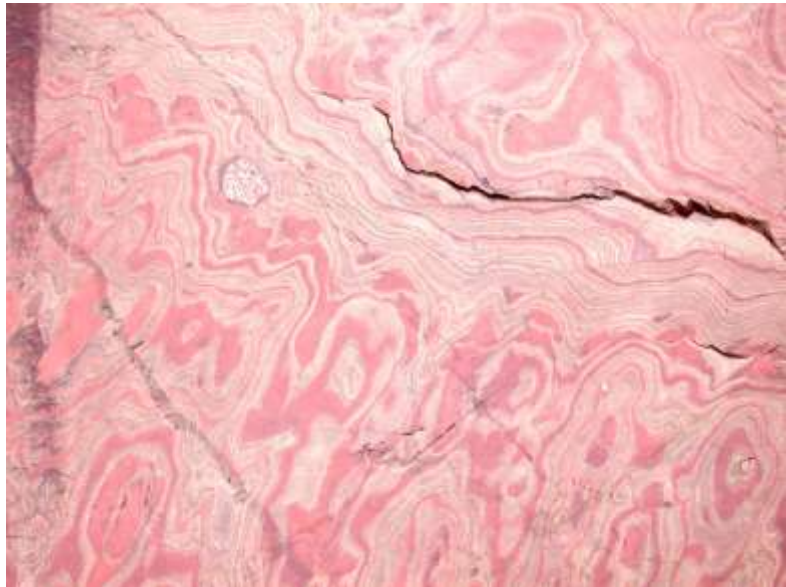
Grinvilska orogeneza bila je uzrokovana kontinentalnom konvergencijom kojom je započelo formiranje jedinstvenog superkontinenta nazvanog Rodinija, a koji je bio okružen jedinstvenim oceanom Mirovia. Smatra se da su i ranije postojali superkontinenti; Vaalbara (3.1-2.8 milijardi godina), Kenorland (2.7-2.5) i Columbia (1.8-1.5). U Rodiniju su bili udruženi svi tada postojeći kontinentalni fragmenti, te je njeno formiranje bilo najznačajniji globalni događaj s početka mlađeg proterozoika. Tijekom mlađeg proterozoika, tijekom razdoblja prije 830-630 milijuna godina, Rodinija se raspada na tri kontinentalna fragmenta; Protolauraziju, kraton Konga i Protogondwanu. Kretanjem Protolaurazije ka jugu, a Protogondwane u smjeru obrnutom od kazaljke na satu, kraton Konga se našao između njih, čime je prije otprilike 600 milijuna godina, došlo do formiranja novog superkontinenta nazvanog Panotija. Početkom Kambrija, prije 540 milijuna godina, Panotija se raspala na četiri kontinenta; Laurenciju, Baltiku, Sibiriju i Gondwanu. Između Gondwane i sjevernih kontinentalnih prostora otvorio se oceanski prostor - Prototethys.

6.4. Proterozojske oledbe

Na prostoru sjeverno od jezera Huron, južna Kanada, na površini se nalaze stijene građene od krupnozrnatih klastita erodiranih sa starije arhajske podloge. To su glacijalni sedimenti tzv. Gowganda formacije; konglomerati i laminirani madstoni, nastali tijekom Huronske oledbe koja je bila prva oledba u povijesti Zemlje. Radiometrijska starost magmatskog tijela koje probija Gowganda formaciju iznosi 2.1 milijardu godina, a ona leži na kristalinskoj podlozi staroj 2.4 milijardi godina, iz čega se lako može utvrditi i njena približna starost (2.4-2.1 milijardi godina).

Laminacija madstona nastala je kao posljedica različitog tipa taloženja tijekom zimskih i ljetnih mjeseci i takvi sedimenti poznati su pod imenom varve (sl.56 - *Varve i "dropstone" Gowganda formacije*). Naime, tijekom zimskih mjeseci kada je voda hladnija i gušća, od sedimenta koji biva unašan u jezerski taložni prostor, talože se samo nešto krupnije zrnate, tamnije siltne i pješčenačke lamine, dok najsitnije glinovite plutaju jer veća gustoća vode onemogućava njihovo taloženje. S druge strane pak, tijekom ljetnih mjeseci, kada je voda

ipak nešto toplija, a time i rjeđa, iz suspenzije se talože i te najsitnije glinovite čestice, pa nastaju svijetlije lamine. Ove varve Gowganda formacije nastale su u jezeru (ili moru) koje se nalazilo ispred ledenih pokrova. Bilo je razdoblja kada su ledeni pokrovi privremeno i djelomice prekrili i prostor tog jezera (ili mora), donjevši iz kopnenog zaleđa i krupnije zrnati stijenski materijal (morene, tilit). Nakon povlačenja (topljenja) ledenih pokrova i/ili ledenih santi, taj je krupnije zrnati materijal



sl.56

"padao" na laminirane madstone, te je u njih bivao uklopljen. Ti krupnije zrnati stijenski fragmenti ("dropstone") po svojoj površini pokazuju brazde deranja do kojeg je dolazilo za vrijeme kretanja ledenjaka i smicanja tih fragmenata po stijenovitoj podlozi po kojoj se ledenjak kretao, čime nesumnjivo ukazuju na svoje glacijalno porijeklo. Do Huronske oledbe došlo je zbog povećanja proizvodnje kisika koja se desila prije 2.4 milijarde godina (*Great Oxygenation Event, Oxygen Catastrophe, Oxygen Crisis, Oxygen Holocaust*). Pojava veće količine kisika u atmosferi nastalog sve većim brojem fotosintetskih cijanobakterija dovela je do oksidacije tada prevladavajuće prisutnog atmosferskog metana i do njegove pretvorbe u ugljični dioksid i vodenu paru. Ugljični dioksid stvarao je ipak manji efekt staklenika u Zemljinoj atmosferi no što je to da tada činio metan, te je time došlo do globalnog zahlađenja klime. Također, pojava veće količine kisika omogućila je i početak intenzivnije biološke diverzifikacije, a i drugačije tipove kemijskih reakcija, kako u Zemljinim vodenim prostranstvima, tako i na kopnu. Hladna klima je u tom najstarijem dijelu proterozoika bila prisutna na velikom dijelu Zemlje, a na što ukazuju i istovremeni glacijalni sedimenti na području Finske, Južne Afrike i Indije. Smatra se da je ovo razdoblje oledbe bilo prvo u povijesti Zemlje, a to stoga jer je tijekom arhaika Zemljina kora ipak bila bitno toplija, a time i nepogodna za zadržavanje ledenih pokrova.

Od starijeg proterozoika pa do prije 715 milijuna godina, nije bilo novih kontinentalnih oledbi na Zemlji. No negdje prije 715 milijuna godina započelo je novo razdoblje kontinentalnih oledbi. Dvije su najopsežnije a desile su se tijekom Kriogenija; Sturtijan oledba (715-680 milijuna godina) i Marinoan oledba (650-635 milijuna godina - najopsežnija oledba). Te dvije oledbe predstavljaju razdoblje tzv. "Snowball Earth-a", a to je vrijeme iz kojega su prisutni taložni zapisi o postojanju ledenih pokrova čak i na Zemljinom ekvatoru. Dakle, čak i ona područja koja su se u to vrijeme nalazila na ekvatoru ili u blizini ekvatora, bila su zahvaćena oledbama (npr. Australija koja se nalazila oko 30-og stupnja sjeverne geografske širine). Smatra se da su u to vrijeme i svi Zemljini oceani bili zamrznuti uz posječnu debljinu leda od oko 1 km. Stoga se glacijalni sedimenti mlađeg proterozoika, po građi vrlo slični onima iz Gowganda formacije, mogu naći po čitavoj Zemlji, gdje god na površini izdaju gornjoproterozojske naslage (osim na Antartici), npr. na prostoru Škotske, Skandinavije, Stijenjaka, Apalača, Grenlanda, Južne Amerike i Afrike. Nakon ovih "glavnih" mlađeproterozojskih oledbi javile su se i dvije manje: Gaskirs oledba (579,9 - 579,6 milijuna godina) i Bajkonurian oledba (547 milijuna godina) (sl.57 - *Mjesta na Zemlji sa gornjoproterozojskim glacijalnim sedimentima*).

I ove oledbe su posljedica smanjenja intenziteta efekta staklenika u Zemljinoj atmosferi. Uz metan koji je izraziti čimbenik stvaranja efekta staklenika, tu je i nešto slabiji ugljični dioksid. I njegovim djelomičnim uklanjanjem iz atmosfere smanjuje se efekt staklenika, te dolazi do globalnog zahlađenja klime. Do djelomičnog uklanjanja ugljičnog dioksida iz atmosfere može doći kemijskim trošenjem na Zemlji prisutnih silikatnih stijena. Naime, atmosferska vodena para i ugljični dioksid stvaraju slabu karbonatnu kiselu kišu (slaba karbonatna kiselina)



koja na Zemlji otapa silikatne stijene čime nastaju različita tla. Među produktima trošenja silikatnih stijena su i Ca^{2+} and HCO_3^- koji se prenašaju do mora i organizmi ih koriste za izgradnju svojih ljuštura. Ovaj proces se zove karbonatno-silikatni geokemijski ciklus. Na taj način, dio ugljičnog dioksida se privremeno uklanja iz atmosfere. U razdobljima postojanja superkontinenta silikatno trošenje je slabo jer je unutrašnjost prostranog superkontinenta suha i topla. No, njihovim raspadaom silikatno trošenje se povećava. Tako, koncem proterozoika, raspadom Rodinije formiraju se manji kontinenti, povećava se vlažnost u njihovoj toploj unutrašnjosti, a posljedično povećava se i silikatno trošenje, a time i uklanjanje dijela ugljičnog dioksida iz atmosfere. Također, masivne erupcije bazalta na prostoru današnje sjeverne Kanade prije 723 milijuna godina mogle su pridonijeti smanjenju količine ugljičnog dioksida u atmosferi tijekom mlađeg proterozoika. Velika količina nastalog ugljičnog dioksida brzo se trošila otapanjem tih bazaltnih pokrova putem intenzivnih kiselih kiša. Dakle, oba procesa, i raspad Rodinije, njeno trošenje, kao i trošenje tih prostranih bazaltnih pokrova, mogli su dostatno smanjiti količinu ugljičnog dioksida u tadašnjoj Zemljinoj atmosferi, a da tijekom mlađeg proterozoika dođe do "Snowball Earth" oledbi.

sl.57

7. FANEROZOIK

7.1. Stariji paleozoik (kambrij i ordovicij)

Prvih oko 126 milijuna godina fanerozojskog eona zauzimaju periodi kambrij, ordovicij i silur, dok preostalih oko 165 milijuna godina zauzimaju periodi devon, karbon i perm.

Svaki od ta dva dijela paleozojske ere generalno je karakteriziran sličnošću u slijedu događanja. Naime, paleozoik počinje s postupnim transgresijama na kontinentalne prostore, čime se stvaraju prostrana šelfna područja u kojima buja život. Krajem silura, mora se povlače, šelfni se prostori smanjuju, dok kontinentalna sedimentacija i vulkaniti postaju izrazitije prisutni. Izdižu se mnogi planinski lanci. Početkom mlađeg paleozoika, more ponovno preplavljuje kontinentalne prostore i zbivanja sa početka paleozoika generalno se ponavljaju. Neformalno, paleozojska era može se podijeliti na tri dijela; na stariji, srednji i mlađi paleozoik. U stariji paleozoik spadaju kambrij i ordovicij, u srednji silur i devon, te u mlađi karbon i perm.

Kambrij je ime koje su u geološku praksu 1835. uveli Adam Sedgwick i Roderick Murchison pri istraživanju kambrijskih i silurskih naslaga Walesa, a izveli su ga iz latinskog naziva za Wales (Cambria). Silur su nazvali po keltskom plemenu Silures koje je nekad nastanjivalo Wales. Oni su jasno uočili da su silurske naslage mnogo bogatije fosilima nego kambrijske, no sve do 1850. geolozi nisu bili sigurni dali su to uopće dva različita razdoblja Zemljine prošlosti. Naime, tada su istraživanjima i na drugim dijelovima Zemlje geolozi jasno utvrdili da se kambrijska asocijacija fosila bitno razlikuje od silurske.

Kasnije, 1879., škotski učitelj Charles Lapworth uočio je da je na mnogim mjestima na Zemlji između kambrija i silura moguće izdvojiti i još jedan interval naslaga koji se po fosilnom sadržaju bitno razlikuje i od kambrija i od silura. On je predložio da se taj dio naslaga između kambrija i silura nazove ordovicij prema velškom plemenu Ordovices koje je zadnje potpalo pod rimsku okupaciju.

Prema podjeli "Međunarodnog povjerenstva za stratigrafiju", kambrij se dijeli na (tab.4 - Podjela kambrija):

PERIOD	EPOHA	DOBA	prije sadašnjosti u milijunima godina
KAMBRIJ	Furongian	Stage 10 Jiangshanian Paibian	489 - 485 494 - 489 497 - 494
	Miaolingian	Guzhangian Drumian Wuliuan	500 - 497 504 - 500 509 - 504
	Series 2	Stage 4 Stage 3	514 - 509 521 - 514
	Terreneuvian	Stage 2 Fortunian	529 - 521 542 - 529

tab.4

Postoje i neke starije podjele kambrija kao npr: georgij, akadij, potsdamij, odnosno prema trilobitima; na zone Olenellus, Paradoxides i Olenus.

Ordovicij se dijeli na (tab.5 - Podjela ordovicija):

PERIOD	EPOHA	DOBA	prije sadašnjosti u milijunima godina
ORDOVICIJ	mlađi ordovicij	Hirnant Katian Sandbian	445 - 443 453 - 445 458 - 453
	srednji ordovicij	Darivil Dapingian	467 - 458 470 - 467
	stariji ordovicij	Floian Tremadok	477 - 470 485 - 477

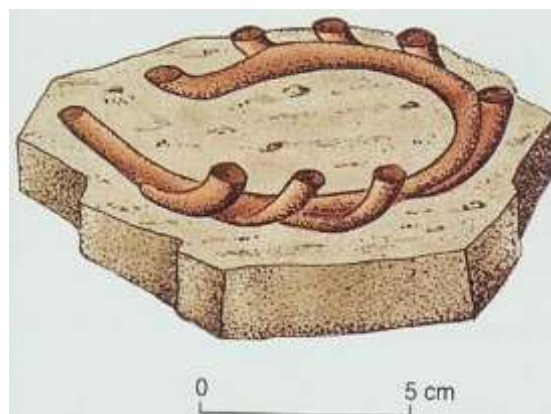
tab.5

7.1.1. Život u starijem paleozoiku

7.1.1.1. Tomotijski (Stage 2) kat kambrija

Prvi skeletni organizmi nađeni su još u naslagama najmlađeg proterozoika (npr. *Cloudina*), no izrazitije se počinju javljati tek u naslagama iz dijela starijeg kambrija koji se ranije nazivao tomotijski kat (danas; Stage 2).

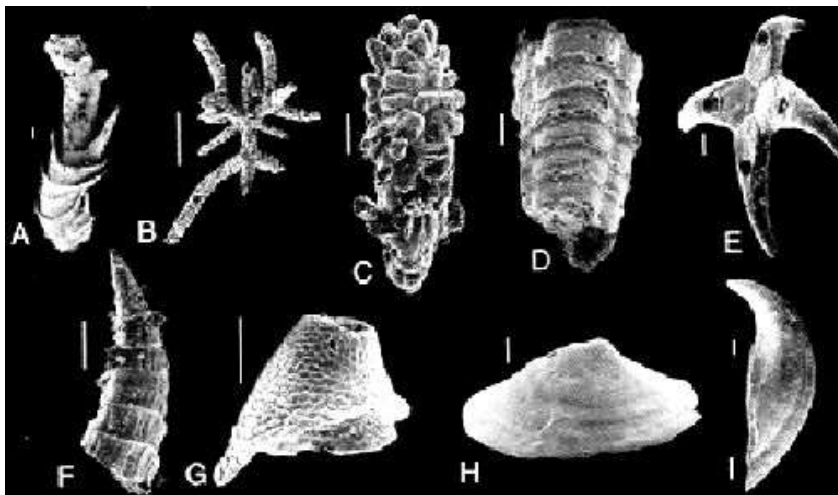
Sitni skeletni fragmenti, rijetko veći od par milimetara, nađeni su na mnogim djelovima Zemlje unutar prijelaznih naslaga proterozoik-kambrij i sve do 1970. god. ovaj vrlo sitni fosilni sadržaj prijelaznih slojeva proterozoik-kambrij uglavnom je bivao previđan. Početak kambrija redovito se stavljao u vrijeme prve pojave trilobita. No ozbiljnijem uzimanjem u obzir i ovog sitnog fosilnog sadržaja ispod prve pojave trilobita, vrijeme početka kambrija moralo se ipak pomaknuti malo dalje u prošlost. Tako, radiometrijskim datiranjem stijena u području sjeverozapadnog Sibira, a koje često sadrže ove sitne skeletne fragmente, početak kambrija je postavljen u vrijeme prije 542 milijuna godina, gdje je granica proterozoik-kambrij jasno označena prvim nalazima ihnofosila *Phycodes pedum* (sl.58 - Rekonstrukcija traga *Phycodes pedum*) - tragovima koji su ostali u sedimentu od nekog



sl.58

bentičkog organizma u potrazi za hranom.

Tomotijsku fosilnu zajednicu čine ostaci vrlo primitivnih spužava, mekušaca i brahiopoda, a također i različiti sitni skeletni fragmenti koji se ne mogu pripisati niti jednoj mlađoj, a niti danas poznatoj skupini organizama (Sl.59 - *Sitnoskeletna fauna tomotijskog kata*). Prvi je puta nađena na području Sibira, a zatim i na mnogim drugim dijelovima svijeta. Fosilni ostaci ove faune dobili su imena; *Anabarites*, *Anabarella*, *Camenella*, *Aldanella*, *Fomitchella*, *Lapworthella*, itd. Najveći dio ove faune izumro je do kraja tomotijskog kata, kada je bio zamijenjen krupnijeljuštunim trilobitima i brahiopodima.



sl.59

Glavna značajka tomotijske fosilne zajednice upravo je pojava vanjskog skeleta, tog novog evolucijskog pomaka u razvoju života, a što do tada nije bio slučaj. Iako skelet učvršćuje organizam i vrlo je koristan organizmima, nije jasno zbog čega se tako naglo razvilo tako mnogo različitih skeleta, i zbog čega su oni građeni od različitih tvari; npr. jedni od kalcijevog karbonata, a drugi od kalcijevog fosfata. Smatra se da je to dijelom zasigurno povezano s potrebom organizama da se na taj način obrane od ondašnjih grabežljivaca. Upravo je ta kambrijska pojava grabežljivaca i strvinara onemogućila intenzivniji razvitak i očuvanje bezskeletnih organizama tijekom fanerozoika. S druge strane, kako niti grabežljivaca, a niti strvinara tijekom najmlađeg proterozoika očigledno nije bilo, to su se na mnogim mjestima na Zemlji i uspjevali očuvati različiti bezskeletni organizmi Ediacara tipa.

7.1.1.2. Posttomotijsko razdoblje kambrijskog života



sl.60

Nakon tomotijskog kata evolucijom su se razvili mnogobrojni i raznovrsni krupnoskeletni organizmi, od kojih su najveći diverzitet postigli trilobiti (sl.60 - *Npr. starijekambrijski trilobit Bergeroniellus asiaticus*). Neke vrste od ovih "višenožnih" organizama iz skupine člankonožaca, postojale su vrlo kratko – neke samo oko 1 milijun godina, pa među trilobitima ima jako dobrih provodnih fosila. Od oko 140 različitih porodica trilobita koje su živjele tijekom paleozoika, 90 porodica je već živjelo tijekom kambrija. Trilobiti su hodajući po morskom dnu ostavljali jasne tragove koji su se često uspjevali i fosilno sačuvati. Za neke trilobite se čak smatra da su mogli i plivati i/ili plutati.

Od manjeg su značaja tijekom kambrija bili brahiopodi (ramenonošci) i mekušci, jer su za razliku od trilobita, bili bitno manjih dimenzija i nisu bili tako raznoliki.

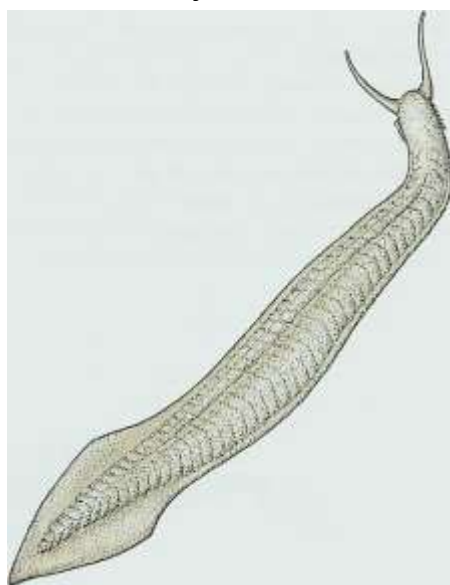
Bodljikaši su bili česti i raznovrsni, te takvu raznovrsnost u mlađim dijelovima Zemljine prošlosti više nikad nisu uspjeli postići (npr. danas su prisutni samo zvjezdace, ježinci, morski krastavci, krinoidi).

Stariji kambrij bilo je vrijeme razvoja i *Archaeocyathida* (sl.61 - *Starijekambrijski Archaeocyathida*) - organizama još i danas nesigurnog sistematskog položaja. Bili su oblika vaze s dvostrukom stijenkom, pričvršćeni za dno tankim lamelama po čemu su nalikovali kasnijim koraljima, a kao i koralji hranili su se iz suspenzije. Arheocijatidi su bili glavni gradivni element starije- i srednjokambrijskih struktura nalik kasnijim grebenima. Na prostoru Australije poznat je niz od oko 60 m debelih arheocijatidnih struktura, a koji se prostiru na području dugačkom oko 200 km. Ima ih i na prostorima Sjeverne Amerike, Sibira i Antarktike, te time jasno ukazuju na ondašnju jedinstvenost tog prostora. Također, njihova prisutnost na ovim danas različitim kontinentima, ukazuje na raspad i pomicanje kontinenata tijekom Zemljine prošlosti. Arheocijatidi su izumrli krajem srednjeg kambrija.



sl.61

Predstavnici drugih skupina organizama bili su znatno rjeđi. Tu spadaju npr. konodonti, tj. sitne skeletne strukture nalik nizu zubića koje potječu od nekih primitivnih chordata nalik ribama (tek je 1995. u Južnoj Africi pronađen ordovicijski organizam nalik ribi, dug oko 4 cm, za kojeg je nepobitno utvrđeno da u građi svog skeleta ima i konodonte, a koje je najvjerojatnije koristio pri "žvakanju" hrane); ostrakodi, vrlo sitni račići koji žive i danas; nautilidi, jedna od prvih skupina skeletnih grabežljivaca, no za razliku od kasnijih, vrlo malih dimenzija - oko 2-6 cm; te sitni organizmi nalik ribama, ali bez čeljusti - Agnatha ili bezčeljusnice, koje maksimum razvoja doživljavaju nešto kasnije.



sl.62

Danas je poznato da su osim ovih "skeletnih" skupina, kambrijska mora nastanjivali i mnogobrojni bezskeletni organizmi koji su zasigurno činili važan dio kambrijskog ekosistema. O njihovoj prisutnosti jasno govori nalaz srednjokambrijske "*Burgess shale*" faune koja predstavlja jednu od najznačajnijih fosilno sačuvanih fauna na Zemlji. Otkrio ju je 1909. Charles Walcott na području planine Mt. Wapta u Britanskoj Kolumbiji, Kanada. Walcott je prve nalaze ove faune nalazio u krupnim fragmentima stijena iz podnožja planine, a koji su sniježnim lavinama bili otrgnuti sa viših planinskih dijelova. Tijekom višegodišnjih istraživanja, sve tamo do 1917., Walcott je, naravno, našao i "izvorišni" izdanak sa "*Burgess shale*" faunom ("*Burgess Pass*"). Unutar ove faune našao je oko 60 tisuća fosilnih jedinki koje je dao

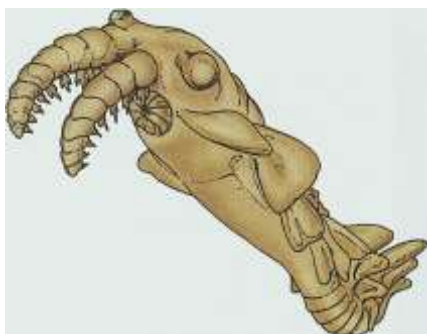
pohraniti u Američki prirodoslovni muzej. Godine 1960. Harry Whittington je ponovno počeo istraživati ovo nalazište, te je u narednih 15-ak godina prikupio još mnoštvo dodatnih fosila.

Fosilni sadržaj ove faune uključuje četiri skupine člankonožaca: trilobite, rakove, škorpione, kukce (30-ak rodova "netrilobitnih" člankonožaca), zatim spužve, krinoide, mekušce, 6 porodica različitih crva, koralje, a i mnoge organizme koji se ne mogu uvrstiti niti u jednu poznatu životnu skupinu.

Među tim, često bizarnim organizmima, značajan je nalaz jednog izduženog organizma nazvanog *Pikaia* (sl.62 - *Pikaia*) za kojeg se smatra da predstavlja ishodišni oblik za skupinu Chordata. Predstavnici skupine Chordata imaju "hordu", tj. čvrstu os na dorzalnoj strani tijela uz koju ide živčevlje, pa prema tome nalikuju današnjim najnaprednijim organizmima. Znači, hordati su se javile već u srednjem kambriju.

Osim *Pikaie*, u "*Burgess shale*" fauni ima i niz drugih interesantnih organizama. Npr. oko pola metra dugi *Anomalocaris* (sl.63 - *Anomalocaris*), veliki grabežljivac, najveći organizam iz tog razdoblja. Još jedan grabežljivac je bila *Opabinia* (sl.64 - *Opabinia*) s pet očiju. Takvi

sl.63

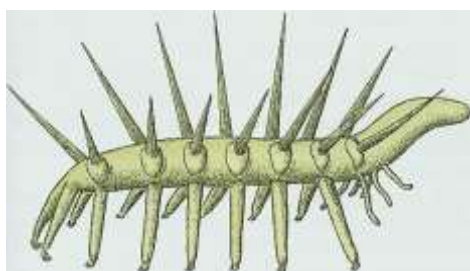


bezskeletni grabežljivci zasigurno su bili poticaj drugim organizmima da si još od mlađeg proterozoika počnu tijelo zaštićivati vanjskim skeletom. Također, tu su bili i *Marrella* i



sl.64

sl.65



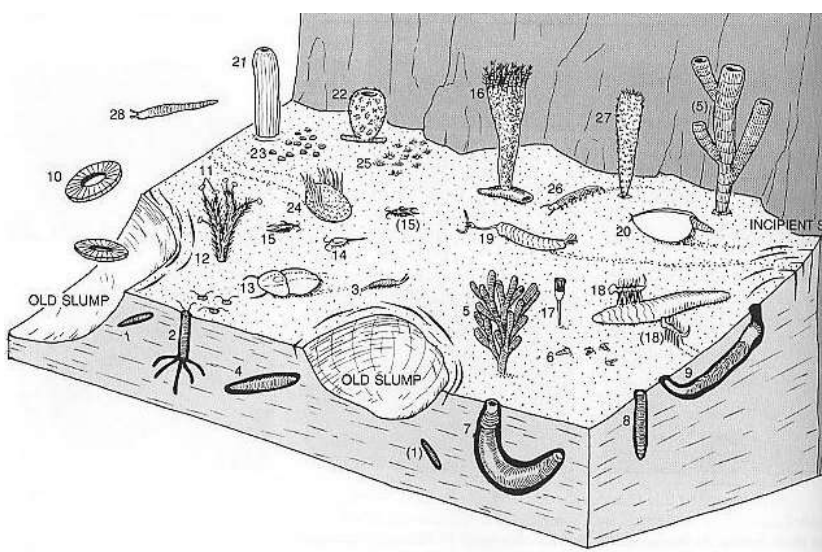
Hallucigenia (sl.65 - *Hallucigenia*).

"*Burgess shale*" fauna nađena je u crnim šejlovima koji su se taložili na većim dubinama u anoksičnim uvjetima. U ovakav okoliš bezskeletni organizmi "*Burgess shale*" faune bili su donešeni iz relativno plićevodnijih (eufotičnih) sredina (sl.66 - *Rekonstrukcija okoliša "Burgess shale" faune*) putem povremenih turbidnih tokova koji su bivali pokrenuti

jačim olujama na površini i/ili potresima. U takvom anoksičnom dubokovodnom okolišu bezskeletni organizmi nisu trunuli, čime je u sedimentu koji ih je prekrpio, te bio litificiran, ostao njihov vrlo jasan otisak

Godine 1984. na prostoru Kine otkrivena je još bolje očuvana starije kambrijska bezskeltna fauna, a koja se prema lokalitetu gdje je nađena naziva Chengjiang fauna.

Tamošnji fosilni ostaci meduza i crva imaju izvrsno vidljivu građu ranijih mekih djelova tijela; mišića, tentakula, očiju.



sl.66

Značenje "*Burges shale*" i Chengjiang faune leži u činjenici da one predstavljaju izvrstan "zapis" najranijeg paleozojskog života iz kojeg se vidi da je već tada život bio jako raznovrstan i već na zavidnom stupnju razvoja. Za tu naglu pojavu raznovrsnog i relativno naprednog života sa početka kambrija, obično se rabi termin "kambrijska eksplozija života". Ona se zbivala prije 530-520 milijuna godine i iz tog razdoblja postoje fosilni zapisi o postojanju već svih glavnih skupina životinja osim mahovnjaka (Bryozoa), tako da se uobičajeno smatra da je to bilo i vrijeme njihova nastanka. No ipak, ne može se isključiti ni mogućnost da su se neke životinjske skupine javile i znatno ranije, ali o njihovu postojanju nema fosilnih dokaza. Tome u prilog govore i istraživanja molekularnih biologa koja pokazuju da je za razvoj pojedinih životnih skupina bilo potrebno mnogo duže vrijeme no što je to bilo ono tijekom trajanja "kambrijske eksplozije života".

7.1.1.3. Život u ordoviciju

Potkraj kambrija zbilo se nekoliko epizoda masovnih izumiranja čime su nestali mnogi rodovi trilobita i brahiopoda. Od ove krize trilobiti se više nikada nisu u potpunosti oporavili, tako da su tijekom ordovicija bili bitno slabije zastupljeni nego u kambriju. No ordovicij je bio razdoblje nastavka evolucije organizama koji se se javili u kambriju, a i nastanka nekih novih. Pri tome, svi ti organizmi tijekom ordovicija postaju vrlo raznovrsni, a što uglavnom nije bio slučaj s kambrijskim skupinama (osim trilobita). Tako, tijekom ordovicija razvilo se oko 400 različitih porodica životinja, a to je uglavnom bio i njihov konačan broj sve do kraja paleozoika. Nasuprot tome, tijekom kambrija je postojalo samo oko 150 porodica plitkomorskih bezkralježnjaka. Naravno, da bi se održao broj od oko 400 porodica sve do kraja paleozoika, dok su neke nove porodice nastajale, neke su morale i izumrijeti. Na održavanju ovog "stalnog" broja porodica zasigurno su u različitim odnosima utjecali i slijedeći faktori:

1. životni okoliš nije mogao podnijeti veći broj porodica, pa one nisu niti nastajale,
2. sve učinkovitiji grabežljivci onemogućavali su nastanak novih porodica,
3. postojeće porodice bile su potpuno specijalizirane i nije bilo razloga za nastanak novih.

Tri su glavne skupine organizama koje su se javile još u kambriju, ali su tek u ordoviciju postale raznovrsnije i naprednije. To su: artikulatni brahiopodi, graptoliti i primitivni hordati, "proizvođači" konodonata.

Artikulatni brahiopodi od ordovicija pa sve do kraja paleozoika predstavljaju najistaknutiju skupinu fosilno očuvanih organizama. Živjeli su pričvršćeni za podlogu ili su djelomice u nju bili ukopani, a hranili su se iz suspenzije.

Graptoliti se obično nalaze u crnim šejlovima ordovicija i silura, jer su uglavnom bili pučinski organizmi koji su nakon uginuća padali na dno dubokih mora, gdje su bivali ukapljeni u dubokovodni sediment. Također, njihovi skeleti bili su prilično lomljivi, pa se niti nisu mogli očuvati i višeenergetskim pješčenjačkim sedimentima. Iz istog razloga kao i trilobiti, i graptoliti su izvrsni provodni fosili.

Česta prisutnost konodonata i kratki vremenski rasponi pojavljivanja pojedinih njihovih formi, i njih čine dobrim provodnim fosilima. Kako su građeni od kalcij fosfata, iz vapnenca se mogu izvaditi otapanjem vapnenca u kiselinu.

Uz ove fosile u ordoviciju su bili značajni i raznovrsni i rugozni ili tetrakoralji i krinoidi. Javili su se još u kambriju, ali su tada bili još prilično rijetki.

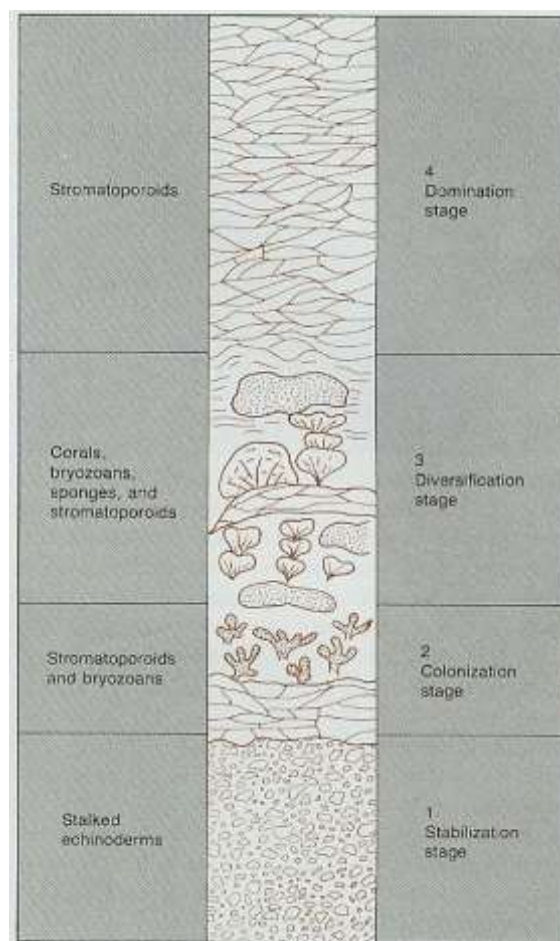
U kambriju se javljaju i školjkaši, koji tijekom ordovicija doživljavaju nagli razvoj i prilagođavaju se životu kako na površini morskog dna, tako i ubušujući se u njega. Ovi koji se

ubušuju sve do danas su ostali najprilagođenija skupina organizama sa skeletom koja se ubušuje u morsko dno.

Prije pojave vertebratnih grabežljivaca, tijekom kambrija i ordovicija glavni grabežljivci bili su nautilidi i zvjezdače. U ordoviciju se javljaju i prvi ježinci.

Od kolonijskih organizama u ordoviciju se javljaju i Bryozoa (mahovnjaci), koji su se tijekom ordovicija vrlo brzo razvijali; od tek nekoliko vrsta u naslagama starijeg ordovicija, do mnoštva raznih vrsta u naslagama mlađeg ordovicija.

Kolonijski su bili i stromatopori i tabulatni koralji, koji, zajedno s mahovnjacima, svoj najveći značaj kao grebenotvorni organizmi postižu u srednjem paleozoiku (silur-devon). 40 milijuna godina nakon kambrijskih arheocijatida, ove skupine su tijekom starijeg i srednjeg ordovicija omogućile pojavu pravih grebena. Mjestimice, srednjoordovicijski grebeni su do 100 m dugi i do 6-7 m visoki. Razvijali su se u nekoliko faza (za razliku od jednostavnijih starijeordovicijskih građenih od jednog tipa organizama), a što se može vidjeti npr. u presjeku kroz jedan greben Crown point formacije iz Vermonta, SAD (sl.67 - *Ekološka sukcesija kroz Crown point greben*):



sl.67

1) faza stabilizacije (naseljavanje podloge krinoidima koji je učvršćuju),

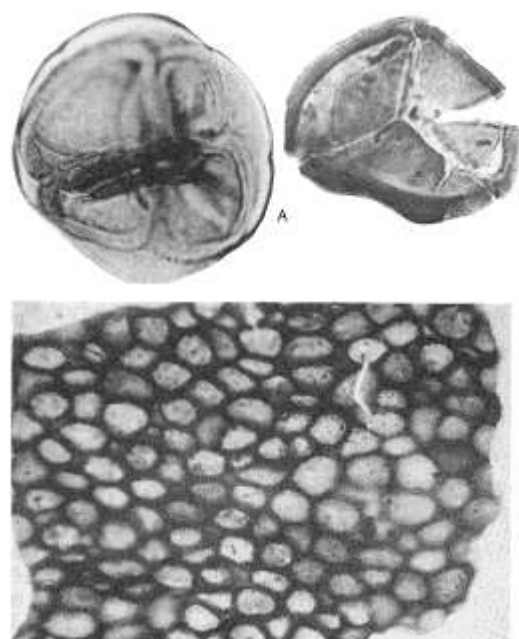
2) faza kolonizacije (stabiliziranu podlogu naseljavaju stromatopori i mahovnjaci),

3) faza diverzifikacije (greben nastanjuju različiti grebenotvorni organizmi: koralji, mahovnjaci, stromatopori, spužve) i

4) faza dominacije (stromatopori preuzimaju prevlast u izgradnji grebena).

Tijekom kambrija i ordovicija nastanak stromatolita i dalje je čest. No ipak, krajem ordovicija stromatoliti postaju vrlo rijetki jer su okoliši u kojima su nastajali stromatoliti (plitki subtajdali i intertajdali) krajem ordovicija već postali gusto nasanjeni s mnoštvom organizama koji su se hranili cijanobakterijama. Iz tog razloga razvoj stromatolita u mlađim razdobljima Zemljine prošlosti više nikad nije nalikovao onom iz proterozoika (osim u nekim negostoljubivim prostorima, npr. u hipersalinim jezerima)

Mjestimični nalazi primitivnih spora i fosilno očuvanih biljnih stanica koje nalikuju onima kod modernih kopnenih biljaka (sl.68 - *Paleozojske fosilne spore i biljne stanice nalikuju modernim sporama i biljnim stanicama*), ukazuju da su

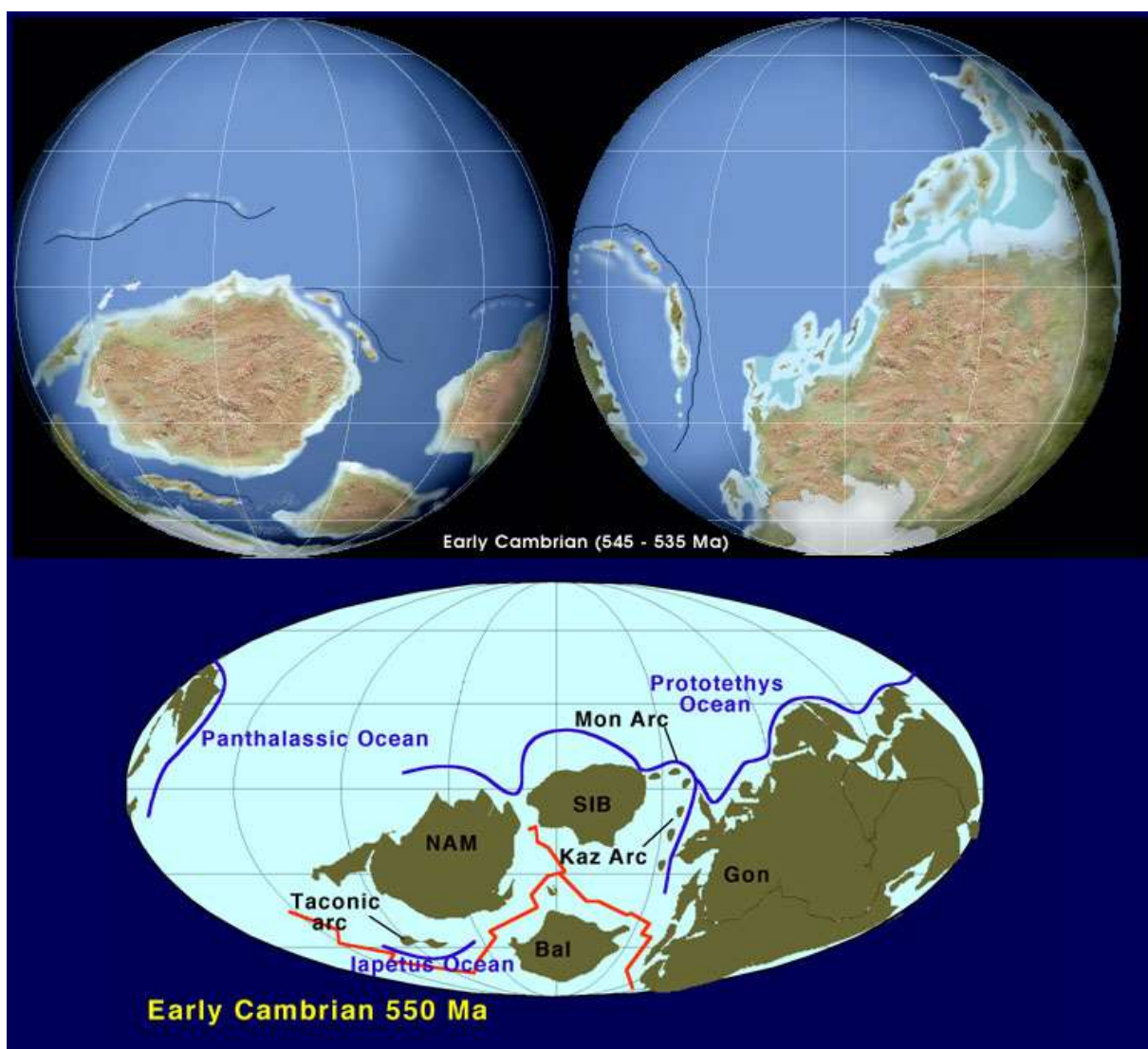


sl.68

biljke već nastanjivale ordovicijsko kopno. Ipak, o tome nema većih i jasnijih fosilnih zapisa. U svakom slučaju vjerojatno je da su vlažna područja ordovicijskog kopna bila nastanjena najprimitivnijim papratnjačama, a koje su se intenzivnije počele razvijati tek od silura.

7.1.2. Paleogeografija kambrija

Kao što je već ranije navedeno, početkom mlađeg proterozoika svi kontinentalni prostori bili su sjedinjeni u superkontinent Rodiniju (Baltika je bila sjedinjena s Laurencijom u Grenville pojasu). Tijekom mlađeg proterozoika Rodinija se raspada na tri kontinentalna fragmenta; Protolauraziju, kraton Konga i Protogondwanu. Kretanjem Protolaurazije ka jugu, a Protogondwane u smjeru obrnutom od kazaljke na satu dolazi do njihove kolizije u prostoru današnjeg jugozapadnog dijela Južne Amerike, dok se kraton Konga našao između njih. Time je koncem proterozoika, prije 600 milijuna godina, došlo do formiranja novog superkontinenta nazvanog Panotija. Početkom Kambrija, prije 542 milijuna godina, Panotija

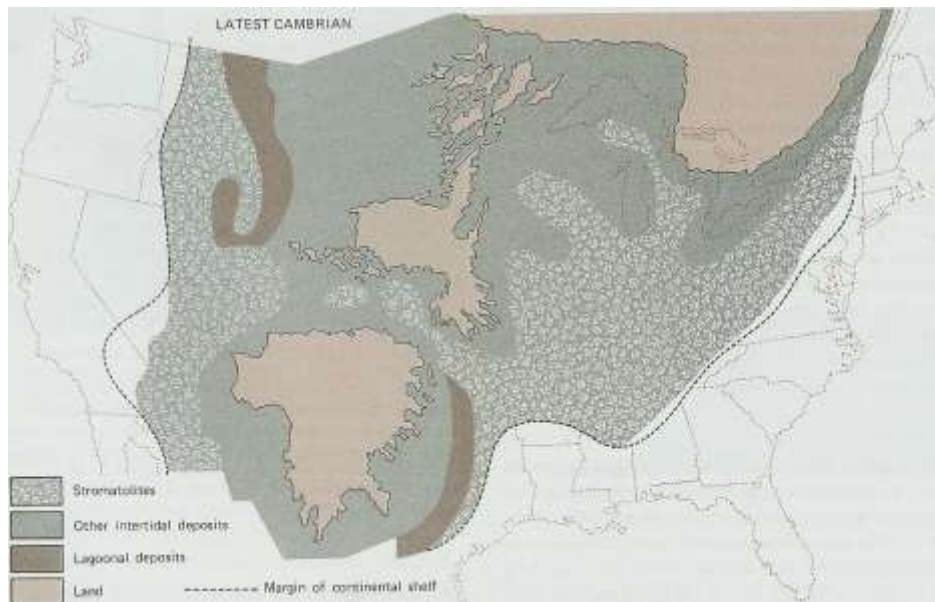


sl.69

se raspala na četiri kontinenta; Laurenciju, Baltiku, Sibiriju i Gondwanu, između kojih su se otvorili novi oceanski prostori (sl.69 - *Paleogeografija starijeg kambrija*).

Oceanski prostor koji se otvorio između Baltike i Laurencije naziva se Iapetus, a onaj između Gondwane i preostalih kontinenata - Prototethys. Tako, već su tijekom mlađeg kambrija veliki kontinentalni prostor Gondwana, koja je dopirala od Ekvatora do Južnog pola, i niz manjih kontinentalnih prostora bili međusobno razdvojeni i nalazili su se oko Ekvatora. Stoga su se tijekom kambrija na šelfnim prostorima ovih kontinenata, u tropskim i

subtropskim klimatskim uvjetima, taložili plitkomorski karbonati. Mjesta taloženja karbonata u plitkim toplim morima tijekom dugih razdoblja Zemljine prošlosti, kako na Zemljinim šelfnim prostorima, tako i na izdignutim prostranstvima unutar Zemljinih oceana, nazivaju



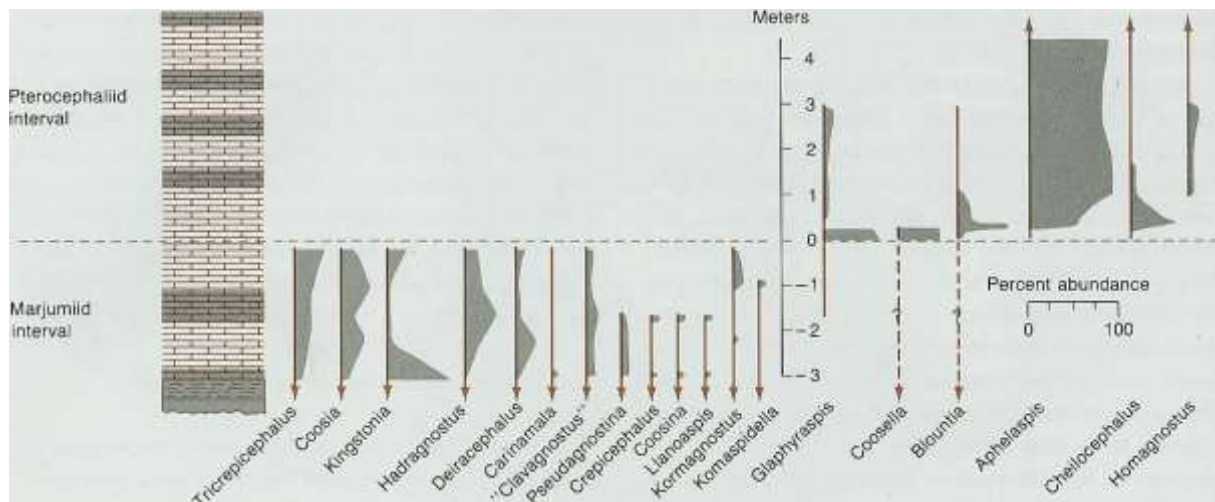
sl.70

se karbonatne platforme. Zbog raspada jedinstvene Panotije, a i zbog topljenja leda nakon mlađeproterozojskih oledbi, kambrij je bio razdoblje transgresije Zemljinih oceana na kontinentalne prostore, a taj trend je započeo još tijekom najmlađeg proterozoika. Ova transgresija globalnog je karaktera i posljedica je glacioeustatičkog rasta morske razine, tj. globalnog rasta morske razine zbog topljenje velikih količina leda, i tektonoeustatičkog rasta morske razine, tj. globalnog rasta morske razine zbog formiranja srednjooceanskih hrptova prilikom raspada Panotije. Inače, morska razina tijekom najmlađeg proterozoika bila je niža no ikada tijekom paleozoika, a to je i razlog zašto je kontinuitet plitkomorskog taloženja na granici proterozoik-kambrij vrlo rijedak (prisutno na Stijenjaku južne Kanade, u Škotskoj, sjevernom Walesu, Kini). Ova kambrijska transgresija predstavlja jedno od najvećih kontinentalnih preplavlivanja čitavog fanerozoika (sl.70 - *Obilje stromatolita na prostoru današnjeg SAD-a ukazuje na izrazito preplavlivanje laurencijskog prostora tijekom kambrija*). Manji kratoni samo su mjestimice bili kopno, dok je najviše kopnenog prostora bilo na prostranoj Gondwani.

Kada je početkom kambrija more počelo preplavljivati kontinente, u šelfnim su se prostorima taložili siliciklastiti rijekama donášeni sa kopnenog zaleđa. Daljnjom transgresijom i sve većim nadiranjem mora u unutrašnjost kontinenta, i šelfni prostor sa siliciklastičnim taloženjem se također pomicao u unutrašnjost kontinenta, tako da su se na siliciklastitima iz starijeg kambrija, u plitkovodnim marinskim uvjetima bez donosa siliciklastita iz sada već jako udaljenog kopnenog zaleđa, tijekom srednjeg i mlađeg kambrija počeli taložiti plitkovodni karbonati grebenskog i stromatolitnog facijesa. Ispred tog plitkovodnog prostora nalazio se dubokovodni prostor oceana, npr. ispred Laurencije Iapetusa.

U skladu s ovakvim rasporedom taložnih prostora, rasporedile su se i vrste tada najčešćih marinskih organizama - trilobita. Pa tako, neki trilobiti živjeli su u dubokomorskim prostorima kao npr. rod *Paradoxides* (a neki trilobiti živjeli su i planktonski), dok su drugi više preferirali plitkovodne tropske šelfne prostore kontinenata.

sl.71



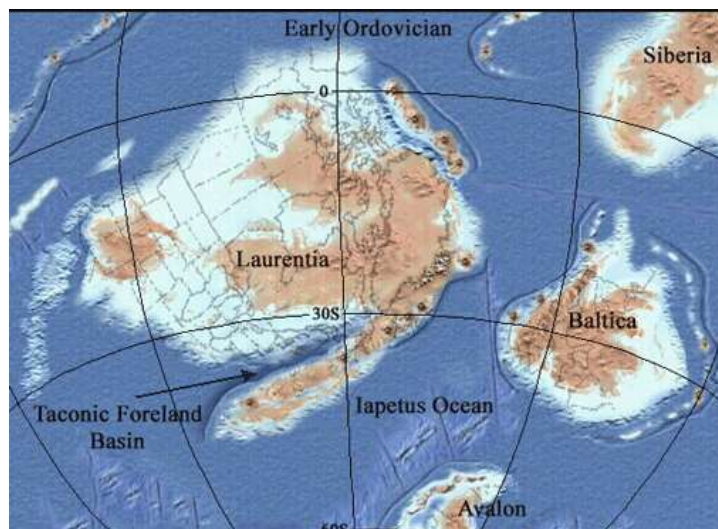
Upravo ti plitkomorski trilobiti, a i neki planktonski, bili su zahvaćani fazama izumiranja koja su se dešavala tijekom mlađeg kambrija. Nakon svake faze izumiranja, trilobitska populacija se kroz vremenski interval od nekoliko milijuna godina uspijevala oporaviti. Svako izumiranje trilobita desilo se u vrlo kratkom vremenskom rasponu od svega nekoliko tisuća godina, a za koje se vrijeme uvijek istaložio par cm tanak sloj vapnenca ili šejla. Iznad svakog ovog "apokaliptičnog" sloja nalazi se metar-dva debeo sloj koji uz one trilobitske rodove koji su uspjeli preživjeti izumiranje, sadrži i neke potpuno nove rodove (sl.71 - *Izumiranje trilobita na granici Marjumiid i Pterocephaliid intervala*).

Smatra se da su ova izumiranja bila posljedica periodičkih zahlađenja mora, a tome u prilog jasno govori i činjenica da su rodovi trilobita koji se javljaju nakon svakog izumiranja, u stvari oni koji vuku porijeklo od rodova koji žive u dubljemorskim i hladnijim prostorima, te koji stoga i nisu bili pogođeni ovim izumiranjima.

7.1.3. Takonska orogeneza

Tijekom najvećeg dijela ordovicija bila je održavana visoka morska razina koja je postignuta tijekom kambrija. Ipak, na početku ordovicija desila se jedna regresija u vezi s "manjom" oledbom na Gondwani, no, nije uzrokovala nikakva izumiranja živog svijeta.

Tijekom starijeg kambrija kontinentalni prostor Baltike počeo se kretati ka sjeveru (ekvatoru) i to prema istočnim obalama Laurencije. Tijekom mlađeg kambrija od Gondwane se riftovanjem odvojio arhipelag mnogobrojnih gondwanskih terena među kojima je najveći bio Avalonija. Na taj se način na prostoru između Gondwane i Avalonije, odmicanjem Avalonije ka sjeveru, počeo otvarati Rheic oceanski prostor. Približavanjem Baltike i Avalonije Laurenciji, ispred njene istočne



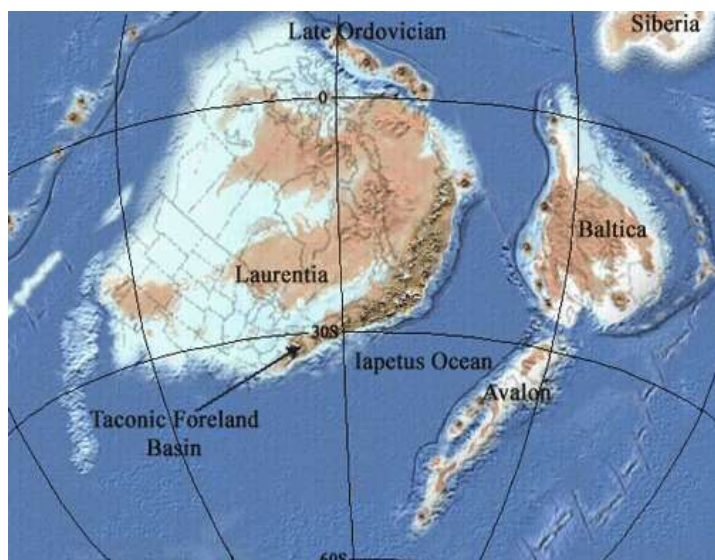
sl.72

obale, tijekom ranog ordovicija, formirala se subdukcijska zona uz nastanak Takonskog otočnog vulkanskog luka (sl. 72 - *Takonski otočni vulkanski luk i Takonski foreland bazen ispred njega*).

Ovaj se vulkanski luk kretao ispred Baltike i Avalonije prema Laurenciji da bi sa njom kolidirao tijekom mlađeg ordovicija (sl. 73 - *Kolizija Takonskog otočnog vulkanskog luka sa Laurencijom - Takonska orogeneza*). Time je na istočnoj strani Laurencije došlo do Takonske orogeneze.

Ova zbivanja moguće je rekonstruirati iz taložnog zapisa sa prostora današnjih Apalača. Naime, ovdje je moguće pratiti slijed naslaga počevši od srednjoordovicijskih karbonata šelfa Laurencije, preko gornjoordovicijskog dubokomorskog fliša istaloženog u dubokomorskom Takonskom foreland bazenu smještenom u prostoru ispred izdižućeg planinskog lanca Takonskih planina, do molase nastale trošenjem tog izdignutog gorja i prenašane rijekama u prostor Takonskog foreland bazena čime je dolazilo do njegova zapunjavanja

Dok se Baltika kretala ka ekvatoru, Gondwana se kretala ka južnom polu. U srednjem ordoviciju još je samo najsjeverniji dio Gondwane bio u ekvatorijalnom pojasu. Pri kraju ordovicija na dijelu Gondwane koji se nalazio na južnom polu došlo je do kontinentalnih oledbi koje svoj maksimum doživljavaju na kraju ordovicija. Dokazi o ovim oledbama nađeni su u pustinjskim prostorima Sahare, na potezu od Maroka do Arabije, južnoj Africi i



Sjevernoj Americi. Ovdje su nađeni tragovi nekoliko glacijala iz mlađeg ordovicija predstavljeni morenama građenim od stijenskih fragmenata s tipično ledenjački izbrazdanim površinama.

Tragovi oledbi nađeni su i u silurskim naslagama Južne i Sjeverne Amerike, a što ukazuje na vjerojatni kontinuitet glacijacija iz ordovicija u silur, no ipak, ove glacijacije nisu bile tako intenzivne kao one sa kraja ordovicija.

Ove kontinentalne oledbe na južnoj Zemljinoj hemisferi izazivale su "nagle" globalne padove morske

razine i globalno zahlađenje klime, a što je dovelo do prvog masovnog izumiranja u Zemljinoj povijesti. Ovo je jedini slučaj u Zemljinoj povijesti da su glacijacije dovele do masovnih izumiranja organizama. Po broju izumrlih organizama ovo masovno izumiranje predstavlja drugo najveće izumiranje u Zemljinoj povijesti. Izumrlo je oko 85 % prisutnih marinskih vrsta uključujući jednu trećinu brahiopoda i mahovnjaka, a izumrle su i mnoge skupine konodonata, trilobita i graptolita. Izumrlo je oko 100 porodica različitih marinskih organizama. Osim što se ovo izumiranje moglo desiti kao posljedica nestanka šelfnih prostora, isto je tako vjerojatno da je ono bilo posljedica zahlađenja svjetskih mora. Ovaj drugi scenario jasno je vidljiv iz opstanka samo onih graptolitnih skupina koje su živjele neposredno uz ekvator. Nakon mlađeordovicijskih endemskih, okolišno specijaliziranih vrsta, u siluru su se pojavile kozmopolitske vrste organizama sposobne preživljavati na mnogi širim, okolišno i klimatski različitim prostranstvima.

sl.73

7.2. Srednji paleozoik (silur i devon)

Pet godina nakon što su Adam Sedgwick i Roderick Murchison definirali kambrijski i silurski sistem na području Walesa, stratigrafi su u Engleskoj izdvojili i naslage koje su nazvali naslagama devona, prema pokrajini "*Devonshire*" smještenoj uz južne obale Engleske. Uočili su da su fosili ovog sistema "na evolucijskoj prekretnici" između onih primitivnih silurskih, i onih naprednijih karbonskih.

Globalno visoka morska razina zadržavala se tijekom srednjeg paleozoika pa su prostrana silurska i devonska epikontinentalna mora obilovala životom. U tropskom pojasu nastajali su grebeni veći no ikada do tada, pojavili su se napredni grabežljivci, uključujući i ribe dimenzija današnjih morskih pasa. U devonu je došlo i do kolonizacije kopna raznovrsnim biljkama, pojavili su se prvi kukci, a krajem devona na kopno su izašli i prvi kralježnjaci. Krajem devona ponovno je došlo do masovnog izumiranja marinskih organizama (vapnenačkih grebenotvoraca), te je u njegovih posljednjih 3-4 milijuna godina, živi svijet bio znatno osiromašen u odnosu na stariji dio srednjeg paleozoika.

Prema podjeli "Međunarodnog povjerenstva za stratigrafiju", silur i devon se dijele na (tab.6 i 7 - *podjele silura i devona*):

PERIOD	EPOHA	DOBA	prije sadašnjosti u milijunima godina
SILUR	Pridolij		423 - 419
	Ludlov	Ludford Gorst	425 - 423 427 - 425
	Venlok	Homer Šinvud	430 - 427 433 - 430
	Landoverij	Telih Aeron Rudan	438 - 433 440 - 438 443 - 440

tab.6

PERIOD	EPOHA	DOBA	prije sadašnjosti u milijunima godina
DEVON	Mlađi devon	Famen Fran	372 - 358 382 - 372
	Srednji devon	Žive Ajfel	387 - 382 393 - 387
	Stariji devon	Ems Prag Lohkov	407 - 393 411 - 407 419 - 411

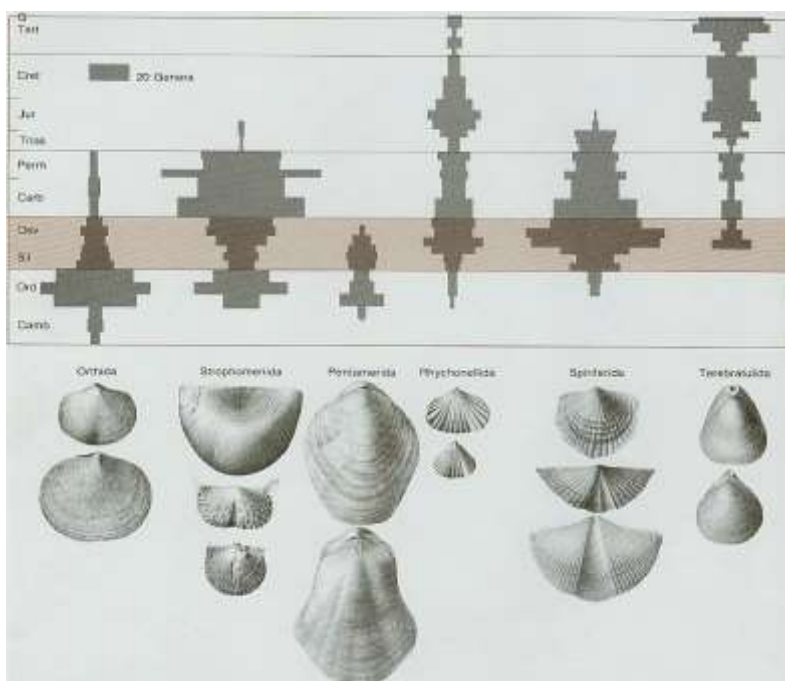
tab.7

7.2.1. Život u srednjem paleozoiku

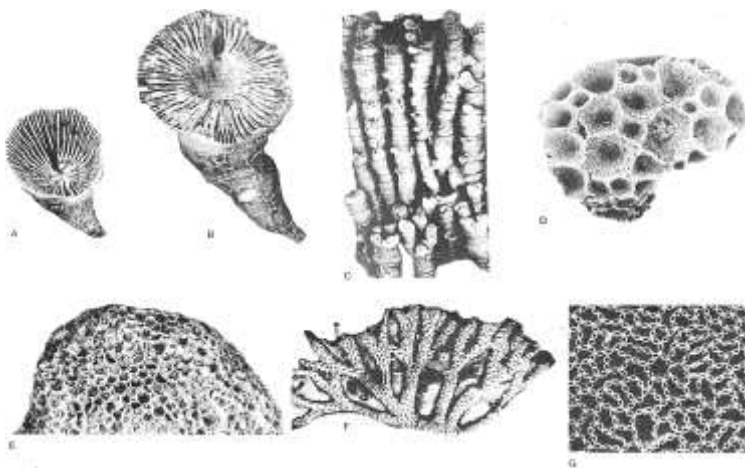
7.2.1.1. More

Nakon ordovicijskog izumiranja, tijekom srednjeg paleozoika došlo je obnove živog svijeta. Ipak, trilobiti i skupina brahiopoda Orthida više se nikada nisu u potpunosti oporavili, te više nikada nisu imali značaj kao u starijem paleozoiku (sl.74 - *Učestalost glavnih skupina paleozojskih brahiopoda*). Naprotiv, sve druge skupine brahiopoda tijekom srednjeg paleozoika doživjele su procvat.

Školjkaši i puževi dobro su se oporavili nakon kraja ordovicija. Čak štoviše, školjkaši su počeli nastanjivati i slatkovodne prostore, tako da se npr. na području SAD države New York mogu naći i nalazi najstarijih slatkovodnih školjkaša iz mlađeg devona.



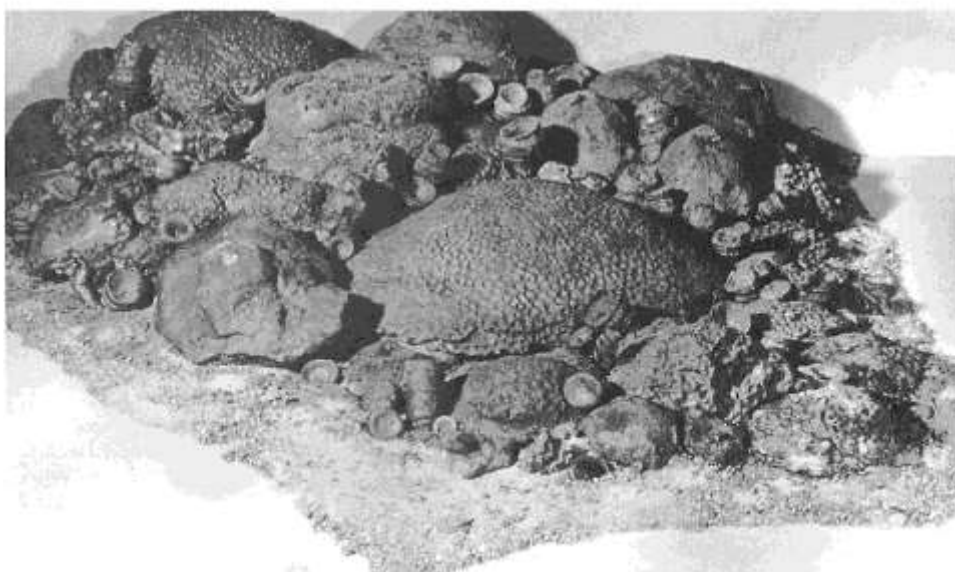
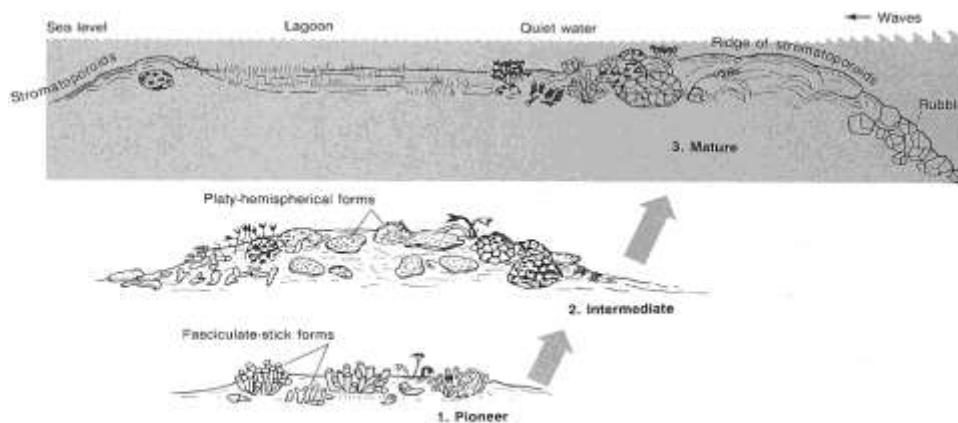
sl.74



sl.75

milijuna godina silura, broj vrsta se povećao na 60.

Graditelji organskih grebena doživjeli su procvat još tijekom srednjeg ordovicija, kada su grebene uz mahovnjake počeli izgrađivati tabulatni i rugozni koralji (sl.75 - *Neki rugozni i tabulatni koralji srednjeg paleozoika*), spužve, te stromatoporidi. To su tzv. tabulostromni grebeni. Ovako građeni grebeni nakon srednjeg ordovicija postojali su i bili su vrlo česti i u narednih oko 120 milijuna godina, sve tamo do kraja devona. Tijekom silura ovi grebeni su bili visina oko 10-ak metara, a dužina do 2 km, dok su tijekom devona poprimali još veće dimenzije. Takav jedan greben karakteriziran je određenom sukcesijom organizama koji su ga izgrađivali (sl.76 - *Ekološka sukcesija kroz tipični devonski greben*).



sl.76

U visokoenergetskim okolišnim uvjetima morsko su dno najprije nastanili "štapičasti" tabulatni i rugozni koralji između kojih se zaustavljao sediment, a čime se formirao koraljno-muljni humak. Taj su humak zatim počeli nastanjivati koralji više plosnatih i polukružnih formi čime je koraljno-mulji humak sve više rastao ka morskoj površini, gdje su ga sa strane više energije vode, tj. otvorene prema oceanu, počeli obraštati stromatoporidi i alge, a sa strane manje energije vode, tj. prema laguni, i dalje su ga izgrađivali koralji. Iza tog "mirnijeg" dijela grebena nalazila se laguna u kojoj su se taložili muljeviti i zrnati sedimenti nastali erozijom grebena. Naravno, osim navedenih grebenotvoraca, ove su grebene nastanjivali i različiti mekušci, brahiopodi, crvi, krinoidi. Tako, iako je fauna ovih grebena za današnje vrijeme bila vrlo neobična, bila je isto tako šarolika i spektakularna kao što je to slučaj i u današnjim recentnim grebenskim okolišima.



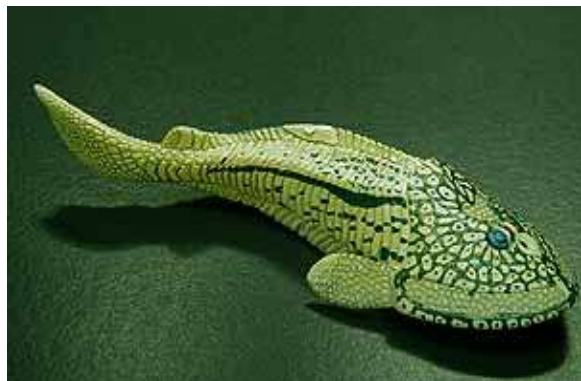
sl.77

Najveća novost marinskog ekosistema srednjeg paleozoika bila je pojava novih vrsta nektonskih organizama (plivača) od kojih su mnogi bili grabežljivci. Najznačajniji među njima i dalje su se nalazili među invertebratima i to su bili amoniti, a koji su se tijekom starijeg devona razvili iz nautilida. Pojavom amonita, nautilidi gube primat među glavonošcima

srednjopaleozojskih mora. Amoniti su se brzo razvijali, bili su raznovrsni, a neke od njihovih vrsta su živjele vrlo kratko (oko milijun godina), tako da su amoniti također vrlo dobri provodni fosili sve tamo do kraja mezozoika, kada izumiru.

Euripteridi su druga značajna skupina srednjopaleozojskih invertebratnih grabežljivaca, plivača, koji su nastanjivali brakične i slatkovodne prostore. Iako su se javili još tijekom ordovicija, a živjeli su sve do perma, ovi člankonošci, daleki srodnici današnjih škorpiona, bili su najzastupljeniji upravo tijekom srednjeg paleozoika (sl.77 - *Pterygotus* i sl.78 - *Hughmilleria*).

Dok se unutar starijepaleozojskih sedimenata samo mjestimice mogu naći fosilni ostaci riba (Pisces), srednjopaleozojski kako marinski, tako i slatkovodni sedimenti ih sadrže veoma često (čak su često prisutni i potpuno očuvani skeleti). devon se stoga često naziva i "dobom riba",



sl.79

razvile unutar marinskih okoliša), no nasuprot tome, najveći broj fosilnih ostataka pravih riba iz razdoblja silura, nađen je u slatkovodnim naslagama.

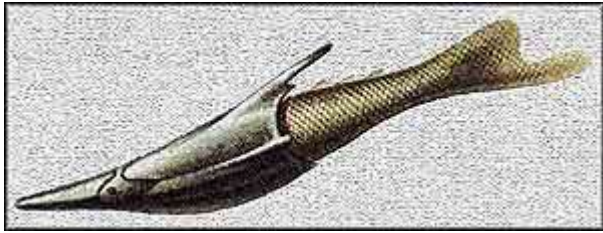


sl.78

iako to nije u potpunosti točno jer je i u mlađim razdobljima Zemljine prošlosti također živjelo mnoštvo riba. Ipak, njihova prisutnost kao jedinih vertebratnih organizama tog razdoblja, opravdava taj naziv.

Prvi organizmi nalik ribama javili su se još tijekom kambrija, a nađeni su u marinskim okolišima (što odmah ne znači da su se i

Ostrakodermi (što znači "koštana koža") bile su životinje nalik ribama, no za razliku od njih, nisu imale donje čeljusti (bezčeljusnice), imale su koštani oklop, vrlo mali usni otvor, nisu imale parnih peraja i imale su hrskavični skelet. Također, mnogi



sl.80

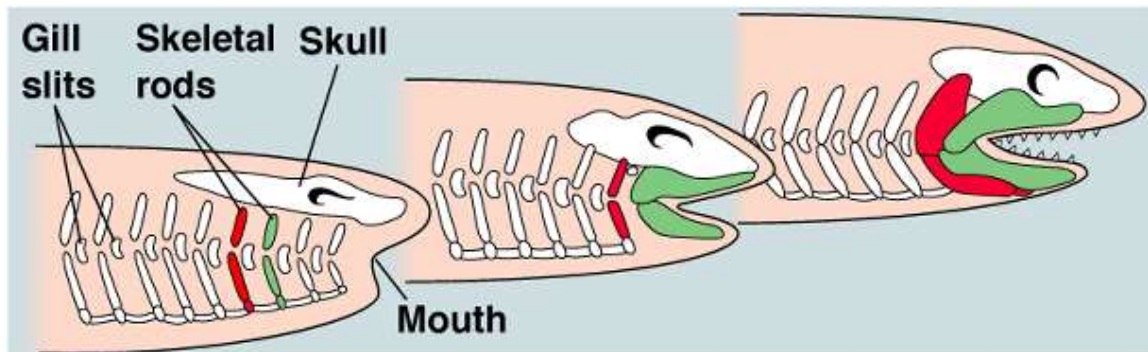


sl.81

rodovi, kao npr. *Hemicyclaspis* (sl. 79 - *Hemicyclaspis*), bile su plosnate što ukazuje na njihovu prilagodbu većinom bentičkom načinu života na dnu jezera ili rijeke. Druge su pak bili bolji plivači, nekton, a na što ukazuje njihov "torpedni" oblik tijela (sl. 80 - *Pteraspis*). Ostrakodermi su izumrli krajem devona.

Prve "prave" ribe (Pisces) javile su se u mlađem siluru i to skupina slatkovodnih i marinskih riba - Acanthodii, (sl.81 - *Euthacanthus*). Imale su parne peraje, ljuske a ne koštani oklop, a razvile su i najznačajniju novinu do tada - čeljust. Razvojem čeljusti otvorile su se potpuno nove i naprednije mogućnosti za lov drugih životinja, tako da su akantodi, za razliku od ostrakoderma, zasigurno bili grabežljivci. Čeljust sa zubima se kod akantoda razvila iz jednog para škržnih otvora. Ovakav razvoj čeljusti je klasičan primjer evolucijskog oportunizma, odnosno tzv.

predprilagodbe kada se postojeća tjelesna struktura nekog organizma pretvara u novu sa potpuno drugačijom funkcijom (sl.82 - *Razvoj čeljusti*).



©Addison Wesley Longman, Inc.

sl.82



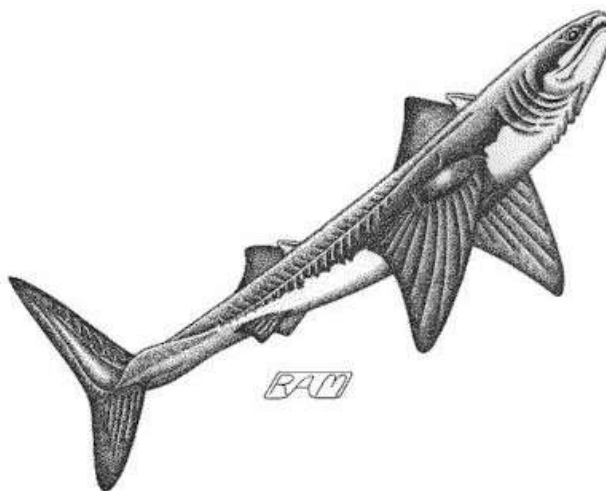
sl.83

Iako su akantodi izumrli krajem devona, njihovo "nasljeđe" - čeljust, bilo je od neprocijenjivog značaja za razvoj velikog broja kasnijih riba i organizama uopće. Ne zna se pouzdano kako su druge ribe nastale iz akantodija, no tijekom devona razvilo se mnoštvo različitih riba s čeljustima koje su predstavile do tada potpuno nov način hranjenja; veće

ribe jele su manje hvatajući ih svojim čeljustima. Ipak, na vrhu hranidbenog niza nalazio se najveći predstavnik skupine Placodermi.

Kao i ostrakodermi, plakodermi su bile oklopljene ribe. Javile su se u starijem devonu, već su u srednjem devonu imale maksimum razvoja, da bi ih koncem devona bilo još samo nekoliko rodova. Negdje tijekom srednjeg devona dio njih se preselio u more gdje su tijekom mlađeg devona postale i prilično raznovrsne. Od predstavnika ove skupine neki su bili i ogromnih dimenzija. Tako npr. mlađedevonski rod *Dunkleosteus* bio je dug oko 12 m (sl. 83 - *Dunkleosteus*).

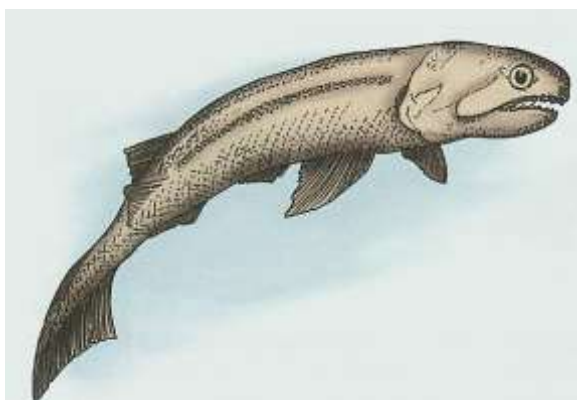
Dvije su osnovne skupine riba; Chondrichthyes (ribe hrskavičnog skeleta) i Osteichthyes (ribe koštunjavog skeleta). Osteichthyes se nadalje dijele na Actinopterygii (ribe "zrakastih peraja" - zrakoperke) i Choanichthyes (ribe sa središnjom osi u parnim perajama)



sl.84

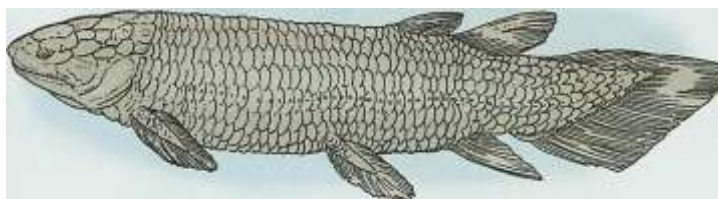
Morski psi spadaju u skupinu Chondrichthyes i predstavljali su jednu od najznačajnijih ribljih skupina devonskih mora. Javili su se tijekom srednjeg devona, a bili su rijetko veći od oko 1 m (sl. 84 - *Cladoselache*)

Ribe "zrakastih peraja" – Actinopterygii (zrakoperke), također su se javile tijekom devona. Ribe ove skupine dominaciju postižu tek u mezozoiku i kenozoiku. U ovu skupinu spadaju i sve današnje moderne ribe. Karakterizirane su zrakasto poredanim kostima ("žbicama") koje



sl.85

im učvršćuju peraje. Najstariji predstavnici ove skupine, kao npr. srednjodevonski slatkovodni rod *Cheirolepis* (sl.85 - *Cheirolepis*), razlikuju se od modernih riba ove skupine po tome što imaju asimetričan rep (tzv. heterocerkna repna peraja, moderne imaju simetričnu – homocerknu



sl.86



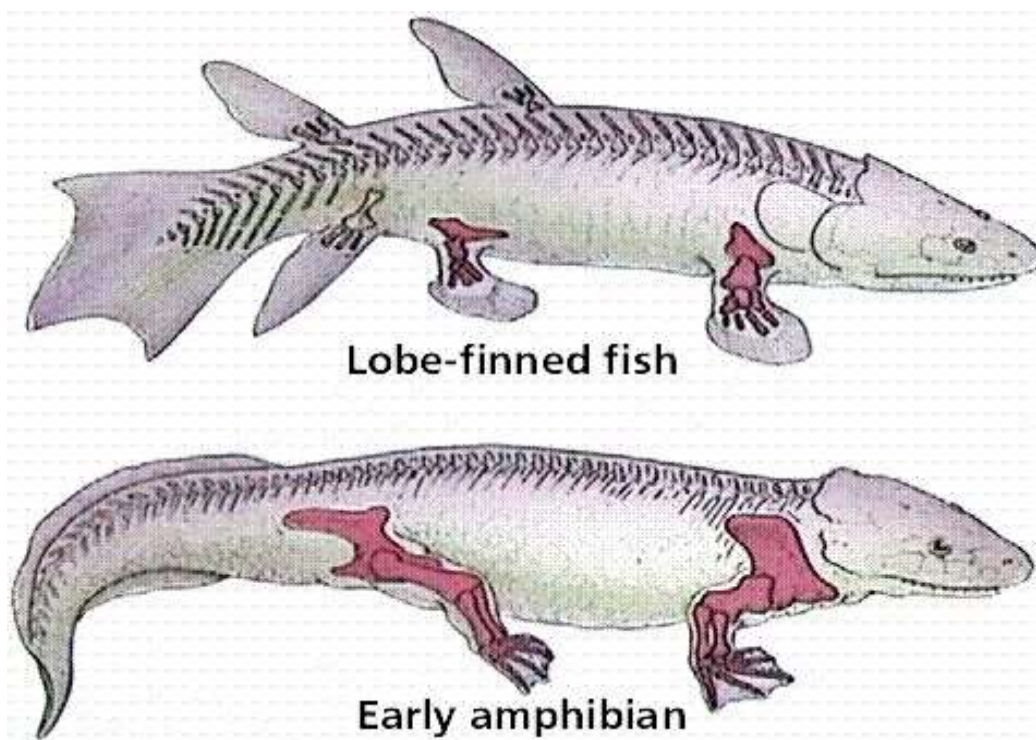
sl.87

repnu peraju) i imaju tzv. ganoidne ljuske rombična oblika, tamnih boja, koje se ne prekrivaju crijevoliko kao što je to slučaj kod modernih predstavnika ove skupine (koji imaju cikloidne ljuske), nego stoje "svaka za sebe".

Devon je bio razdoblje pojave riba iz skupine Choanichthyes i to iz njenih dvaju podskupina; "plućašica"

ili "dvodihalica" (Dipnoi), te resoperki (Crossopterygii). Od dvodihalica danas postoje samo tri roda, jedan u Africi, drugi u Južnoj Americi i treći u Australiji. Obje ove skupine imale su plovni mjehur koji je za vrijeme suših razdoblja poprimao funkciju pluća, pa su one mogle preživjeti duža sušna razdoblja sakrivene u mulju. Iz devona je od dipnoia poznat npr. rod *Dipterus* (sl.86 - *Dipterus*).

Resoperke su dobile ime po obliku peraja koje su resaste i veslasto se proširuju iz jedne čvrste osi u sredini parnih peraja. Resoperke su bile slatkovodne, no jedna njihova skupina - Coelacanthi, nastanjivala je i mora (ima ih i danas - živi fosili, npr 2 m dug rod *Latimeria*). Značaj slatkovodnih resoperki je u tome što su se iz njih razvili prvi kopneni kralježnjaci (Vertebrata) i to njihova skupina vodozemci (Amphibia). Najviše dokaza o tom prijelazu prema vodozemcima može se vidjeti kod srednjodevonskog fosilnog roda resoperki *Eusthenopteron* (sl.87 - *Eusthenopteron*) koji ima kratke i mišićave peraje unutar koji su na prednjim perajama kosti humerus na koje se nadovezuju radius i ulna, a unutar stražnjih



sl.88

peraja je femur na koji se nadovezuju tibia i fibula (sl.88 - *Usporedba udova resoperki i ranih vodozemaca*).

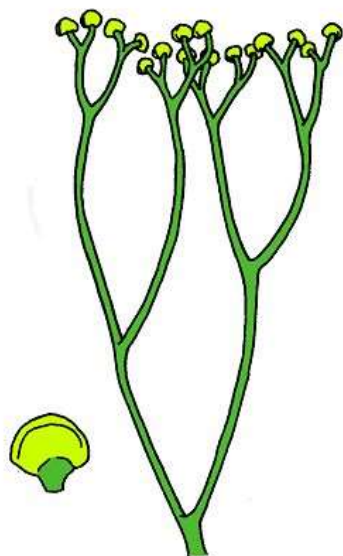
Veliki razvoj riba, od kojih su gotovo sve bile grabežljivci, a također i amonita i euripterida, umnogome je utjecao na razvoj drugih organizama koji baš nisu uspjeli razviti efikasnije obrambene sposobnosti. To se odnosi na ostrakoderme (koji su u devonu i izumrli), a naročito na trilobite čiji je broj porodica sa ordovicijskih 80, spao na silurskih 23.

7.2.1.2. Kopno

Tijekom prekambrija i starijeg paleozoika kopno je bilo nastanjeno samo najjednostavnijim primitivnim biljkama (alge, cijanobakterije) i nije bilo ni šuma ni livada. Uglavnom ogoljele stijene najvjerojatnije je prekrivao tek mjestimice tanak sloj humusa kao rezultat akumulacije organske materije nastale raspadom tih rijetkih i jednostavnih biljnih

organizama. Tek u siluru kopno biva nastanjeno naprednijim biljkama od kojih su ostali sačuvani i fosilni ostaci.

Te prve biljke od kojih su ostali fosilni ostaci, a koje su nastanile kopno tijekom silura, nisu imale niti korjen, niti provodni (vaskularni) sustav (nego samo nekoliko jednostavnih vlakana duž kojih su tekli voda i nutrijenti), a niti lišće. To su bile samo jednostavne čvrste stabiljke utaknute u tlo čiji je podzemni dio preuzeo ulogu korjena, a u nadzemnom se proizvodila hrana. Nastanjivale su isključivo močvarne predjele, npr. devonski rod *Aglaophyton* (sl.89 - *Aglaophyton*).



sl.90

Prvi značajniji evolucijski pomak u razvoju kopnenog bilja bio je razvoj provodnog sustava sa kraja silura, građenog od složenog niza žilica kojima su tekli voda i nutrijenti. Pri tome, razvila su se njegova dva tipa; jedan za prijenos vode i nutrijenata, a drugi za prijenos proizvedene hrane, npr. kao kod silurskog roda prvih takvih biljaka *Cooksonia* (sl.90 - *Cooksonia*), zatim *Baragwanathia* (sl.91 - *Baragwanathia*), ili pak najizrazitije kod donojodevonskog roda *Rhynia* (sl.92 - *Rhynia*).

U silurskim fosilnim biljnim nalazištima prisutne su i spore (rasplodne stanice), a slične su nađene još i unutar ordovicijskih naslaga, što jasno ukazuje da su primitivne

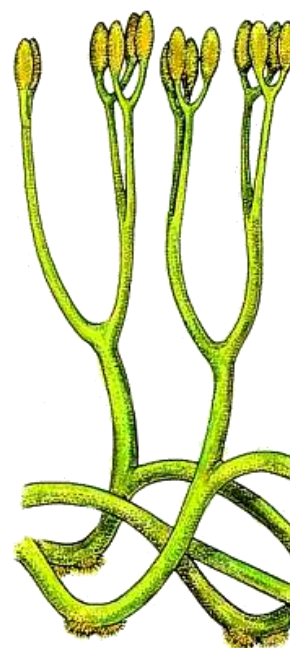
biljke još i tijekom ordovicija nastanjivale kopno. Različito građeni organi sa sporama obično su se nalazili u vrhovima stabiljka, kao npr. kod starijodevonskih rodova *Dawsonites* i *Bucheria*.



sl.92

Nagli razvoj biljke su doživjele tijekom starijeg devona. Dok su one starijodevonske imale još tanke i vrlo krhke stabiljke (npr. *Rhynia*), nepogodne za prijenos značajnijih količina vode i nutrijenata, one mlađedevonske razvile su deblje stabiljke koje su bitno uspješnije prenosile vodu i nutrijente. Također, razvile su i primitivno korjenje za bolji prihvat i apsorpciju nutrijenata, te također i primitivno lišće za hvatanje veće količine Sunčeva svjetla. Takve biljke iz srednjeg i mlađeg devona spadaju u skupinu papratnjača (Pteridophyta) koje se zovu crvotočine (Lycopside), npr. rodovi *Protolepidodendron* (sl.93 - *Protolepidodendron*) i *Asteroxylon*.

Za razliku od viših biljaka, golosjemenjača i kritosjemenjača, papratnjače nemaju cvijet, nemaju sjeme, a razmnožavaju se izmjenom



sl.89



sl.91

generacija. Dije se na skupine Psilophytatae, Lycopodiatae (crvotočine), Equisetatae (preslice) i Filicatae (paprati).

Papratnjače zbog svog načina razmnožavanja moraju nastanjivati isključivo vodene prostore močvara (ili plitkih jezera). Naime, svaka papratnjača proizvodi spore, a iz spora se razvijaju oko 6 mm male biljke s dva tipa organa od kojih jedni proizvode gamete - jaja, a drugi gamete - spermije. Spermij mora

doći do jaja da bi ga oplodio, a za to kretanje, i uopće preživljavanje, potrebna mu je upravo vodena sredina. Iz

oplođenog jaja iznad prvotne male biljke izraste nova biljka, a prvotna mala biljka ugiba (sl.94 - Životni ciklus papratnjača).

Nova evolucijska inovacija koja se desila tijekom devona, bila je nastanak sjemenke, a što je omogućilo biljkama da prilikom svog razmnožavanja postanu neovisne o vodenoj sredini. Naime, za razliku od papratnjača, napredne sjemenjače - golosjemenjače

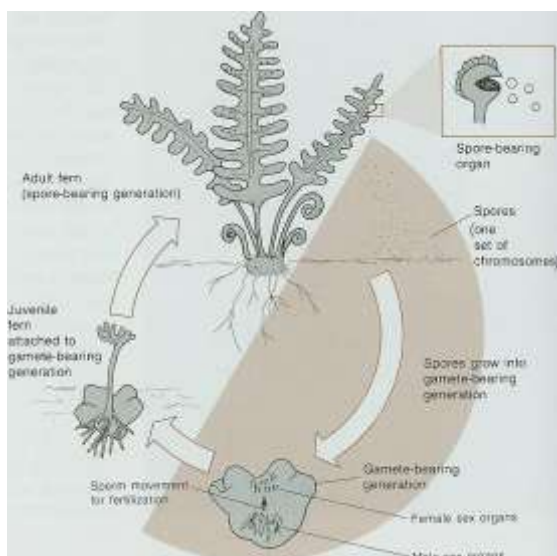
(Gymnospermae) i kritosjemenjače (Angiospermae), ne otpuštaju svoje spore u okolinu nego one ostaju na "roditeljskoj" biljci, gdje se jedan tip spora pretvara u muške, a drugi u ženske reproduktivne organe koji nose gamete svaki sa svojim setom kromosoma. Znači, iz spora različita spola nastaju organi koji nose gamete različita spola. Pelud su muške gamete i smješten je u prašnicima iznad tučka koji sadrži ženske gamete, te lako nakon sazrijevanja pada u njega, oplodi ženske gamete iz čega onda nastaje sjemenka. Ta sjemenka sada predstavlja rani stadij buduće biljke, zaštićena je i obavijena hranom (npr. plod jabuke sa sjemenkama), tako da neko vrijeme može i pričekati dok ne nastanu pogodni uvjeti za otpočinjanje svoga rasta (sl.95 - Životni ciklus kritosjemenjača).

Za razliku od kritosjemenjača, golosjemenjače imaju jednospolne cvjetove, tj. posebno muške, a posebno ženske češere. Sjemenka se nakon oplodnje vjetrom razvija u ženskim češerima, ali nije ovijena nikakvim plodištem kao što je to slučaj kod kritosjemenjača, nego je gola i nezaštićena. Odatle i naziv - golosjemenjače.

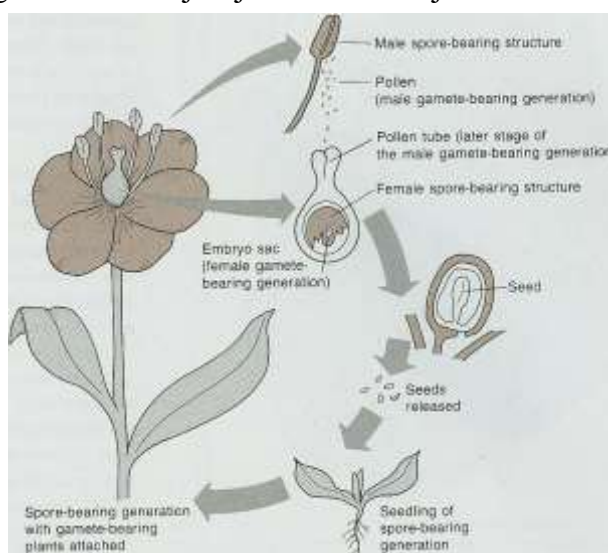
Pelud sjemenjača može biti prenašan na velike udaljenosti i vrlo je trajan, pa se vrlo često može i fosilno očuvati. Također, i sjemenke mogu na različite načine biti prenašane na velike udaljenosti, gdje onda iz njih nastaju biljke, a čime je bilo omogućeno širenje biljnog svijeta po kopnu.



sl.93



sl.94



sl.95

Smatra se da su kritosjemenjače nastale iz golosjemenjača, i to od neke njihove još do sada nepoznate skupine koja je imala dvospolne češere.

Golosjemenjače se dijele na skupine Cycadophytina i Coniferophytina dok se kritosjemenjače dijele na skupine Dicotyledoneae i Monocotyledoneae. Unutar skupine Cycadophytina nalazi se izumrla podskupina Pteridospermae koja ujedinjuje neka svojstva papratnjača i golosjemenjača. Naime, njeni rodovi imaju jednake sjemenke i građu stabla kao i golosjemenjače, dok su im listovi i peteljke oblikom i građom slični papratnjačama. Pteridosperme su se razvile tijekom mlađeg devona i od tada one postaju vrlo važni florni element kopnenih prostora. Često su i velikih dimenzija, drvenasta debla, te tvore prve šume, npr. roda *Archaeopteris* (sl.96 - *Archaeopteris*).

Tijekom devona sjemenjače još nisu razvile sposobnost da na samoj biljci proizvode i muške i ženske spore iz kojih će se razviti organi koji proizvode muške i ženske gamete (to je tek sposobnost kritosjemenjača, a koje su se javile tek u kredi). Prije tog "modernog" načina razmnožavanja biljaka, morala je postojati i faza kada je kao i kod papratnjača iz pojedine spore najprije nastala jedna "prijelazna" biljka, a tek je ona razvila organe koji su proizvodili muške i ženske gamete.

Nakon toga, slijedeći evolucijski korak bilo je stvaranje spora različita spola na jednoj biljci. Najraniji dokazi o postojanju spora različita spola kod jedne te iste biljke, nađeni su u srednjodevonskim naslagama, npr. kod roda *Chaleuria*. Smatra se da su one manje spore bile muške, a one veće ženske (treba više energije za proizvodnju jaja nego spermija), tj. od muških su spora nastale muške biljke sa organima koji su proizvodili muške gamete, a od ženskih spora ženske biljke sa organima koji su proizvodili ženske gamete. Njihovim spajanjem nastaje sjeme od kojeg nastaje nova biljka koja ponovno proizvodi muške i ženske spore.

Kopnena vegetacija srednjeg paleozoika učvršćivala je svojim korjenjem tlo, smanjujući mjestimice i intenzitet njegove erozije. Tako, dok su tijekom prekambrija i starijeg paleozoika tereni bivali izrazito i brzo erodirani djelovanjem uglavnom prepletenih rijeka, čime su nastajali slabo sortirani sedimenti, od srednjeg paleozoika rijeke su po biljnim pokrovom učvršćenom tlu počele više meandrirati ("tražile su najlakši put do mora"), a čime su nastajali i sedimenti vrlo određene geometrije i slijeda.

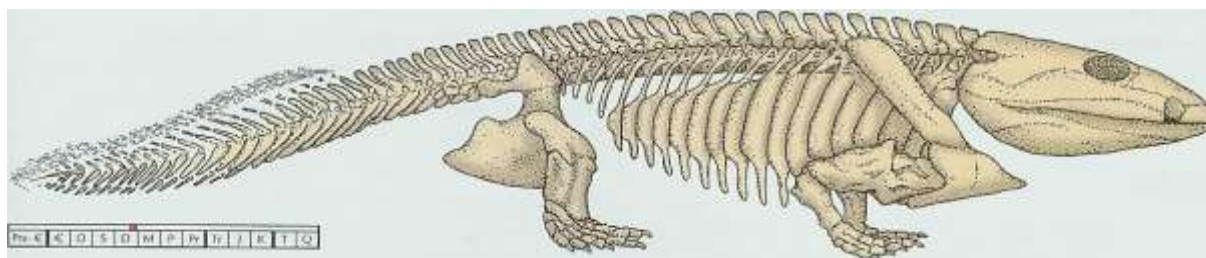
Starijodevonski Rhynia rožnjaci Škotske vrlo su značajni ne samo po obilju fosilnih ostataka bilja, nego i po fosilnim nalazima kopnenih člankonožaca, škorpiona i beskrilnih kukaca. Člankonošci su najvjerojatnije počeli nastanjivati kopno još tijekom mlađeg silura, no do pojave vertebratnih kopnenih organizama trebalo je pričekati do mlađeg devona.

Temeljem anatomskih sličnosti na udovima i kostima glave, zna se da su se prvi kopneni vertebratni organizmi - vodozemci, razvili iz riba resoperki. O primitivnosti vodozemaca govori i činjenica da su u najranijim razdobljima svoga života bez nogu i žive u vodi (npr. punoglavci žaba). Također, legu se iz jajašaca koja se nalaze u vodi. Današnji



sl.96

vodozemci malih su dimenzija za razliku od onih znatno većih, koji su živjeli tijekom mlađeg devona i mlađeg paleozoika.



U naslagama najmlađeg devona ("Old Red Sandstone") na području istočnog Grenlanda nađeni su najstariji fosilni ostaci vodozemaca, prijelaznog oblika ("karika koja nedostaje") između riba resoperki i vodozemaca. To je rod *Ichthyostega* (sl. 97 - *Ichthyostega*). Sličnost u građi njegove lubanje, donje čeljusti i kralješnice s građom istovrsnih dijelova tijela resoperki, a dodatno i njegov riblji rep, jasno ukazuju da je *Ichthyostega* nastao iz resoperki.

Da bi *Ichthyostega* mogao na kopnu i disati trebao je imati pluća. No, razvoj "pluća" koja su ponekad i ribama omogućavale da u jednom dijelu godine dišu zrak (plovni mjehur preformiran u pluća kod dvodihalica), završio je i mnogo prije no što su prvi vodozemci izašli na kopno. Pri tome, preuređenje plovnog mjehura u pluća bio je mnogo manji evolucijski napredak no preuređenje jednog para škržnih otvora u čeljusti, a to zato jer je on imao mnogo više sličnosti s plućima, no što su to imale škrge sa čeljustima.

Prošlo je oko 80-ak milijuna godina od vremena kad su na kopno izašle prve biljke s provodnim sustavom (srednji-mlađi silur), pa do pojave prvih kopnenih vertebrata (najmlađi devon). Naravno, to zato jer je biljna zajednica već morala biti prilično napredna da bi uspjela prehraniti nove organizme koji su počeli nastanjivati kopno.

Smatra se da je morao postojati neki razlog zbog kojega su ribe izašle na kopno. To je najvjerojatnije bilo zbog toga jer je klima postala suša čime je često dolazilo do isušivanja jezera, pa su se ribe sve češće morale prilagođavati na život bez vode, odnosno, morale su se seliti iz isušanih jezera prema onima u kojima je još bilo vode i pri tome udisati zrak. Kako na kopnu nije bilo nikakvih drugih vertebratnih organizama, nije bilo niti nikakve konkurencije u ishrani, pa su se ribe duže mogle zadržavati na kopnu i time polagano prilagođavati tim novim životnim uvjetima.

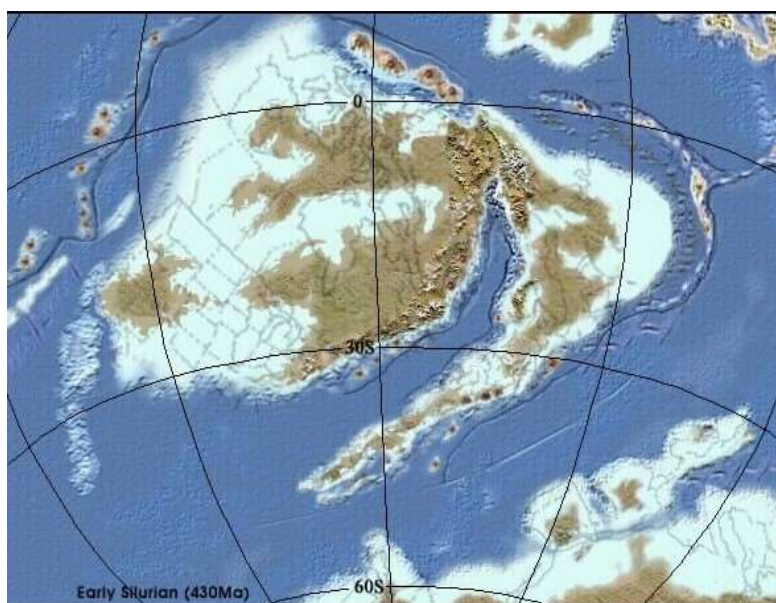
7.2.2. Paleogeografija srednjeg paleozoika

Početkom silura globalni morski nivo je počeo rasti kao posljedica otapanja kontinentalnog leda na Gondwani, da bi koncem silura ponovno došlo do globalnog pada morskog nivoa i do regresije na kontinentalnim prostorima.

Obilje i široko rasprostranjenje silursko-devonskih grebena ukazuje da je klima bila relativno topla na širokim prostranstvima. Naročito je bila topla tijekom devona, tako da je rasprostranjenje tropske plitkomorske životne zajednice tijekom devona, bilo najveće u čitavom fanerozoiku. Ne samo da je bila topla, nego je klima mjestimice bila i vrlo suha, a na što ukazuje mnogo veća količina formiranih evaporita no tijekom starijeg paleozoika. Tako, dok se tijekom silura evaporiti mogu naći najdalje do 30. stupnja geografske širine sjeverno i južno od ekvatora, tijekom devona su prisutni i mnogo dalje na sjever i jug.

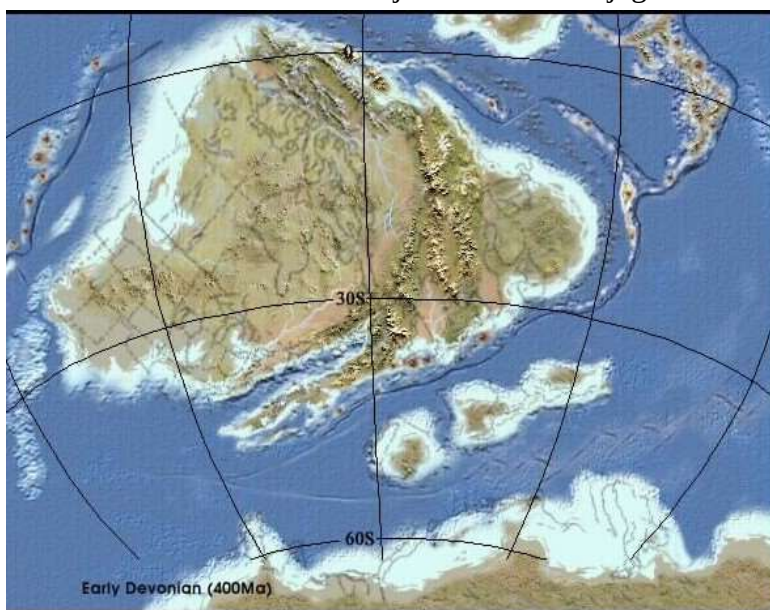
Najznačajnija paleogeografska karakteristika devona je postojanje Starog crvenog kontinenta ("Old Red Sandstone continent") nazvanog po devonskim sedimentima na prostoru Velike Britanije ("Old Red Sandstone" - stari crveni pješčenjak). Ovaj kontinent je formiran kada su Laurencija, Baltika i Avalonija kolidirale, čime je nestao oceanski prostor Iapetusa.

sl.98



Europe, tako i u području istočnog dijela Sjeverne Amerike, na prostoru Apalača. Pri tome, pružanja ovih sedimenata na prostoru Sjeverne Amerike suprotnog je smjera u odnosu na pružanja istovrsnih sedimenata na prostoru Europe, a što jasno ukazuje na njihovo taloženje od jedne, odnosno od druge strane kolizijskog planinskog "šava" kaledonida nastalog sudarom Laurencije i Baltike. Sličnost ovih sedimenata na obje strane današnjeg Atlantika ogleda se npr. u istovrsnoj fosilnoj zajednici slatkovodnih devonskih riba.

Kaledonskoj orogenezi prethodio je najprije sudar Avalonije i Baltike koji se desio negdje koncem ordovicija, početkom silura. Orogeneza je započela sudarom ovako ujedinjenih Avalonije i Baltike na sjevernoj strani Laurencije i Baltike, dok je do kolizije ovih dvaju kontinenata na njihovim južnim stranama došlo nešto kasnije. Tako, na prostoru Grenlanda i Skandinavije kolizija je započela tijekom starijeg/srednjeg silura, dok je u prostoru današnjih Apalača započela tijekom srednjeg devona (sl.98 i 99 - Kaledonska orogeneza)



sl.99

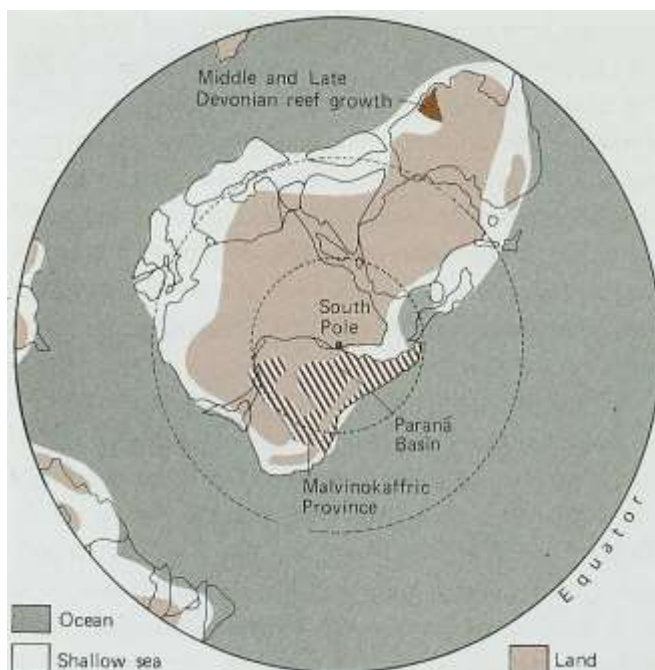
Potkraj devona razmak između Starog crvenog kontinenta i Gondwane na jugu bio je prilično uzak. Na to ukazuje činjenica da današnje Sjeverna Amerika, Europa i sjeverna Afrika sadrže oko 80 posto istovrsnih mlađedevonskih rodova marinskih beskralježnjaka.

7.2.3. Devonsko izumiranje

Krajem devona ponovno je došlo do masovnog izumiranja života kada je izumrlo oko 75 % tada živućih vrsta organizama.. Izumiranje se desilo u dva navrata, prvo, na granici frana-famen (Kellwasser događaj), a drugo, krajem devona (Hangenberg događaj). Kellwasser izumiranje je pogodilo marinske organizme toplih, plitkih mora, a naročito teško tabulostromne grebene koji su tijekom famena postali vrlo rijetki, odnosno gotovo su nestali, te se u preostalom dijelu paleozoika više nisu pojavljivali. Također, akritarhi su pretrpjeli goleme gubitke, dok su morski plakodermi, glavni devonski grabežljivci, u potpunosti nestali. Nestale su i mnoge vrste brahiopoda, trilobita, amonita, konodonata. U morima su naročito nastradali brahiopodi, tako da je u famen prešlo samo oko 15 posto rodova prisutnih tijekom frana. Hangenberg izumiranje je uz marinske organizme pogodilo i živi slatkovodni svijet, naročito plakoderme, dvodihalice i resoperke, ali ne i kopnene biljke. Tijekom ovih devonskih izumiranja izumrlo je 97% devonskih kralježnjaka. Preživjeli su morski psi veličina manjih od 1 m, te ribe i vodozemci manji od 10 cm.

Ovo izumiranje zadesilo je samo tropske zajednice organizama iz čega proizlazi da je ovo izumiranje bilo posljedica globalnog zahlađenja klime, kada su se organizmi iz hladnijih polarnih predjela raširili prema ekvatorijalnom pojasu gdje se danas mogu naći i njihovi fosilni ostaci iz tog vremena. Tako npr. u području današnje SAD države New York, unutar gornjodevonskih naslaga moguće je naći fosilne ostatke tzv. "kremenih spužvi", koje su karakteristični stanovnici današnjih hladnih područja. Njihov nestanak u mlađem dijelu ovog slijeda naslaga, a ponovna pojava organizama koji su bili pogođeni mlađedevonskim izumiranjem, ukazuje na ponovno zatopljenje klime. Do globalnog zahlađenja klime moglo je doći i zbog početka kolonizacije kopna biljkama koje su počele proizvoditi kisik, a što je dovelo do smanjenja količine CO₂ u atmosferi, tj. do smanjenja efekta staklenika, a time i zahlađenja. Također, taj prelazak biljaka na kopno smanjio je proizvodnju kisika u oceanima, a što nije pogodovalo većini marinskih organizama, te je došlo do njihova izumiranja.

Tijekom devona u priobalju Gondwane koja se nalazila smještena oko južnog pola, postojala je marinska zajednica karakteristična za hladnija marinska područja, a koja se zove zajednica malvinokafričke provincije (sl.100 - *Položaj Gondwane tijekom starijeg devona - Malvinokafrička provincija*). Unutar ove provincije, na prostoru tzv. Parana bazena (današnja Južna Amerika) pretežito su živjeli školjkaši koji su se ubušavali u mulj (endobentos). Istovremeno na većini drugih plitkomorskih dijelova Zemlje formirali su se grebeni koji ovdje nisu prisutni. Također, ovdje nema ni mahovnjaka, a niti amonita. Zajednica organizama koji se ubušuju u mulj, kao što je to bilo prisutno unutar ove devonske malvinokafričke provincije, redovito je prisutna i u današnjim polarnim područjima. Izumiranje sa konca devona nije pogodilo ovu životnu zajednicu malvinokafričke provincije, a što još dodatno govori u prilog globalnog zahlađenja klime, kada ova zajednica tim dodatnim zahlađenjem nije bila pogođena.



sl.100

7.2.4. Stari crveni kontinent (Euramerica, Laurussia)

Jedna od klasičnih kutnih diskordancija nalazi se između gotovo vertikalnih naslaga silura i krovinskih starog crvenog pješčenjaka devona na području Škotske (sl.101 - *Siccar Point*).

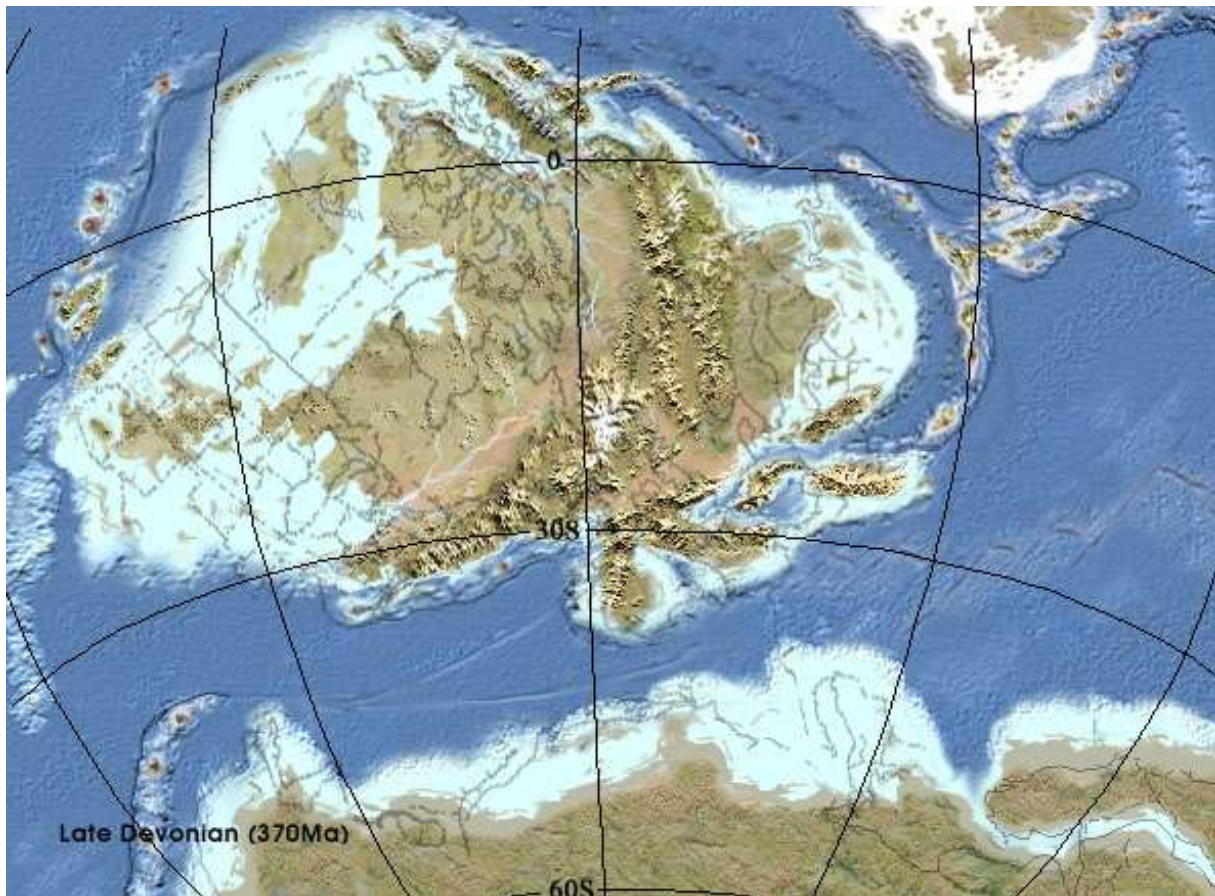
To je i bilo područje na kojem je James Hutton 1788. prvi puta opisao kutnu diskordanciju. Silurski sedimenti bili su izrazito poremećeni tijekom kolizije Laurencije, Baltike i Avalonije (kaledonska orogeneza) i na njih su se onda istaložile naslage starog crvenog pješčenjaka nastale erozijom izdignutih kaledonida.

Stari crveni pješčenjak izgrađuju naslage devona, ali i mlađeg silura i starijeg karbona. Pri tome ovaj molasni sediment je na području današnje sjeverne Britanije taložen tijekom starijeg devona, a u području istočnog dijela Sjeverne Amerike tijekom srednjeg devona.

Na prostoru jugozapadnog dijela Starog crvenog kontinenta (sl.102 - *Stari crveni kontinent*) postojao je pojas na kojem nije bilo značajnijeg taloženja, a taj pojas se zove



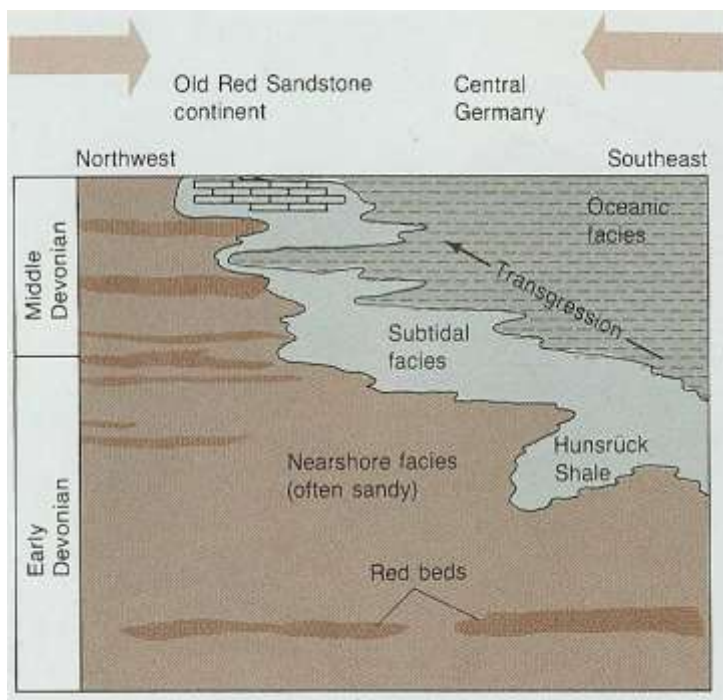
sl.101



sl.102

"transkontinentalni luk" (to je prostor današnjeg zapadnog dijela Sjeverne Amerike).

Duž ekvatora, koji je prolazio preko Starog crvenog kontinenta, s istoka su puhali pasati donošavši u taj njegov najistočniji dio dosta vlage s oceana, što je tu omogućilo bujniji razvoj bilja, njegovu akumulaciju, te nastanak ležišta ugljena. Uz taj istočni dio kontinenta

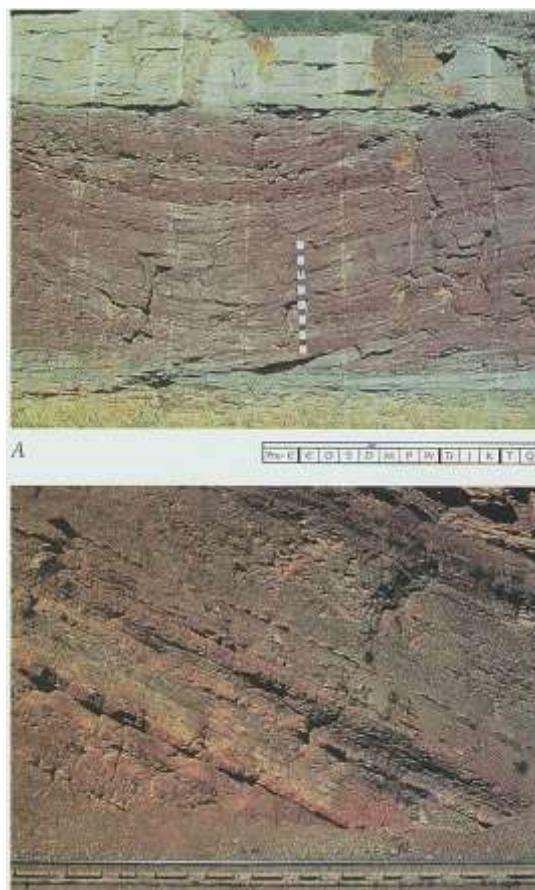


sl.103

mjestimice ima i evaporita, no oni su mnogo češći na njegovu zapadnom dijelu, na prostoru današnjeg Stjenjaka.

Južni dio Starog crvenog kontinenta bio je karakteriziran prisutnošću okoliša raspona od pustinskih, preko riječnih do plitkovodnih marinskih. Pri tome, na sjevernom dijelu tog prostora prevladavala je slatkovodna, a na njegovom južnom dijelu marinska sedimentacija. Tako, riječni sedimentni na području današnje Škotske raspona su od muljevitih do pješčenjačkih s kosom slojevitošću, a istaloženi su u meandrirajućim rijekama. Južnije, na prostoru današnje Njemačke, u marinskim uvjetima taložili su se pješčenjaci i to u okolišima laguna i estuara u kojima su živjeli školjkaši, ostrakodi, ribe, euripteridi, brahiopodi, a također u njima se taložio i biljni detritus donešen s obližnjeg kopna. Na prostoru vanjskog šelfa uz Stari crveni kontinent, u više marinskom okružju, živjeli su mnogobrojniji brahiopodi, trilobiti, krinoidi, mahovnjaci, koralji i mekušci (tu su se nalazili i tabulostromni grebeni - Njemačka, Ardeni). Još južnije, u dubljevodnom prostoru kraj šelfa (prostor današnje sjeverne Njemačke), taložili su se crni Hunsrück šejlovi u kojima su danas prisutni fosilni ostaci mnoštva bezskeletnih organizama i amonita (u njima se može pratiti evolucija amonita iz nautilida). Ovi šejlovi su taloženi u anoksičnim uvjetima i po tome je ovaj taložni okoliš bio vrlo sličan onom u kojem su se taložili Burgess šejlovi kambrija. Tijekom srednjeg devona more je postupno transgrediralo preko tog južnog rubnog prostora Starog crvenog kontinenta čime su se na starijodevonske kopnene sedimente Starog crvenog kontinenta taložili plitkovodni, a zatim i dubljevodni oceanski sedimenti (sl. 103 - Stratigrafski slijed naslage starijeg i srednjeg devona sjeverne Njemačke nastao kao posljedica postupne transgresije mora na južni rubni dio Starog crvenog kontinenta).

Za razliku od ovog dubokovodnog okoliša, a koji je bio prisutan tek nedaleko od južnog kopnenog dijela Starog crvenog kontinenta (uzak šelf), na prostoru zapadnog dijela Starog crvenog



sl.104

kontinenta plitkovodni marinski prostor postojao je i na većim udaljenostima od njegova kopnenog dijela (širok šelf).

Također, tu, na prostoru zapadnog dijela Starog crvenog kontinenta, intenzitet sedimentacije sa kopna bio je veći no što je bilo spuštanje dna plitkovodnog taložnog prostora, pa je tu dolazilo do zapunjavanja taložnog prostora (regresije) u smjeru zapada. To je tzv. Catskill molasa (sl.104 - *Catskill molasa*) građena u donjem dijelu od marinskih, a kako se ide prema gore u njenom vertikalnom slijedu, od deltnih, pa zatim i od riječnih sedimenata.

Na preostalom dijelu plitkomorskog prostora zapadnog dijela Starog crvenog kontinenta, tijekom druge polovine devona formirali su se tabulostromni grebeni (prostor današnje zapadne Kanade), gradeći atole, lagune i platforme. Danas su oni zbog svoje porozne građe dobri kolektori ugljikovodika. Tijekom famena, nakon nestanka tabulastromnih grebena, iznad njih su se na otvorenom šelfnom prostoru zapadnog dijela Starog crvenog kontinenta istaložili dubljevodni crni muljevi.

Jedan takav srednjo-mlađedevonski tabulostromni greben, ogromnih dimenzija, poznat je iz prostora Canning bazena zapadne Australije i dužine je oko 350 km (devonski Great Barrier Reef).

7.3. Mlađi paleozoik (karbon i perm)

Mlađi paleozoik obuhvaća razdoblje karbona, izrazito bogato vegetacijom, kada su biljke imale do tada još neviđeno rasprostranjenje, bogatstvo oblika i značaj u akumulaciji organske materije od koje su nastala najveća ležišta ugljena. Također, to je i razdoblje perma koncem kojeg je došlo do najvećeg izumiranja živog svijeta u Zemljinoj povijesti.

Karbonski sistem uspostavljen je još 1822. u Velikoj Britaniji, a ime je dobio po bogatim naslagama ugljena često prisutnim unutar taložnih slijedova mlađeg karbona. Za razliku od mlađeg karbona, stariji je karbon prevladavajuće karakteriziran vapnencima (često s fosilim ostacima krinoida). Da se istakne ta razlika, američki geolozi još su u drugoj polovini 19. stoljeća stariji karbon nazvali mississippian (zbog njegove dobre površinske rasprostranjenosti duž doline rijeke Mississippi), a mlađi pennsylvanian (zbog njegove dobre površinske rasprostranjenosti u državi Pennsylvania), tako da su ova dva dijela karbona, od 1953. kada je to i službeno priznato, u Sjevernoj Americi odvojena kao dva zasebna sistema.

Iako je razlika u tipu sedimenata starijeg i mlađeg karbona evidentna i na mnogim drugim dijelovima Zemlje, u Europi geolozi i dalje smatraju karbon jednim sistemom. Na prostoru Njemačke postoji i stara rudarska podjela kojom se stariji karbon, zbog različitih litoloških karakteristika u svom donjem i gornjem dijelu dijeli na dvije litostratigrafske jedinice; donju - kohlenkalk (vapnenci s proslojcima ugljena), i gornju - kulm (dubokomorski fliški razvoj).

Roderick Murchison, koji je uspostavio silurski sistem, a sudjelovao je i u uspostavi devonskog sistema, uspostavio je 1841. u Rusiji i permski sistem. Nazvao ga je po gradu Permu smještenom na zapadnim padinama Urala.

Prema podjeli "Međunarodnog povjerenstva za stratigrafiju", karbon i perm se dijele na: (tab. 8 i 9 - *Podjele karbona i perma*)

PERIOD	EPOHA	DOBA	prije sadašnjosti u milijunima godina
KARBON	Pensilvanijan	Gželij Kasimovij Moskovij Baškirij	304 - 299 307 - 304 315 - 307 323 - 315
	Misisipijan	Serpukovij Vize Turne	331 - 323 346 - 331 358 - 346

tab.8

PERIOD	EPOHA	DOBA	prije sadašnjosti u milijunima godina
PERM	Loping	Čangsingij Vuhiapingij	254 - 252 259 - 254
	Guadalupe	Kapitanij Vordij Roudij	265 - 259 269 - 265 273 - 269
	Cisural	Kungurij Artinskij Sakmarij Aselij	283 - 273 290 - 283 293 - 290 299 - 293

tab.9

7.3.1. Život u mlađem paleozoiku

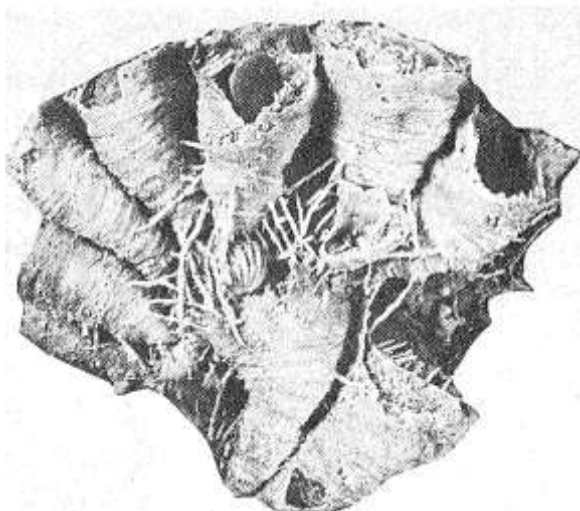
7.3.1.1. More

Nakon devonskog izumiranja neke skupine organizama nisu se više nikad oporavile. Tako, tabulatni koralji i stromatoporidi nikad više nisu bili bitan čimbenik živog svijeta kao do tada. Za razliku od njih, amoniti su se oporavili te su vrlo brzo ponovno postali vrlo raznoliki. Iz devona su "stigili" i morski psi, ribe sa zrakastim perajama, te oklopljene plakoderme koje su ubrzo nakon početka karbona izumrle. Upravo taj nestanak oklopljenih riba (a i nautilida debelih ljuštura) s početka karbona, bila je i najznačajnija promjena u marinskom svijetu mlađeg paleozoika u odnosu na srednji paleozoik. Te slabije pokretne životinje bivale su zamijenjene pokretljivijim skupinama: morskim psima, ribama zrakastih peraja i amonitima. Ta sposobnost bržeg i lakšeg plivanja ribama je bila potrebna zbog razvoja sve efikasnijih grabežljivaca.

Od fitoplanktona je bilo akritarha, no nakon devonskog izumiranja, oni više nikad nisu imali ranije značenje.

Izostankom tabulatnih koralja i stromatoporida, tijekom mlađeg paleozoika grebeni nisu bili osobito razvijeni. Podmorske grebenske humke uglavnom su izgrađivali brahiopodi, mahovnjaci i alge. Od brahiopoda značajna je postala skupina Productidae. Neki od predstavnika ove skupine imali su bodlje s kojima su se pričvršćivali u sediment, a neki od njih su imali i čunjaste ljuštore koje su se bodljama međusobno vezivale u grebensku strukturu, npr. rod *Richthofenia* i *Prororichthofenia* (sl.105 - *Prororichthofenia*).

sl.105



U ranim razvojjima rasta ti su se brahiopodi bodljama hvatali za alge. Nakon što bi alga uginula, brahiopod je svojim bodljama ostao pričvršćen za dno, a kako ga nije direktno dodirivao ljušturu, nije bilo ni opasnosti da će biti zatrpan sedimentom. Udruživanjem takvih nekoliko brahiopoda nastala je početna grebenska struktura koja se postupno nadograđivala mahovnjacima i algama, a čime je greben sve više rastao.

Krinoide su tijekom karbona postigli svoju najveću raznolikost, tvoreći na morskim dnima prostrane krinoidne "livade" (sl.106 - *Starijekarbonska krinoidna livada*). Stoga su fragmenti krinoidnih skeleta i česti strukturni

elementi karbonskih karbonata, a naročito onih koji su se taložili tijekom starijeg karbona na prostorima npr. današnje sjeverne Francuske, Njemačke, Indijane (SAD), Stjenjaka i Grand Canyon-a.

U izgradnji karbonskih vapnenaca, uz krinoide, sudjelovali su i mahovnjaci, a mjestimice naročito i fuzulinidne foraminifere koje su tijekom mlađeg paleozoika (od sredine karbona do kraja perma) bile rasprostranjene u plitkovodnim marinskim prostorima.



sl.106

Mahovnjaci nisu samo pridonosili izgradnji gornjopaleozojskih vapnenaca akumulacijom svojih skeleta, nego su bili značajni i pri "hvatanju" sedimenta čime su sudjelovali u izgradnji podmorskih

muljnih humaka nalik grebenima (sl.107 - *Starijekarbonski muljni humak*), a koji su često dosežali i do same morske površine. Oko takvih humaka obično su bile krinoidne livade.

Tijekom starijeg karbona fuzulinidne foraminifere bile su predstavljene samo s nekoliko rodova, da bi tijekom mlađeg karbona i perma doživjele bujan razvoj. Samo unutar permskih naslaga određeno je oko 5000 vrsta fuzulinidnih foraminifera od kojih su neke bile veličina i od preko 10 cm.

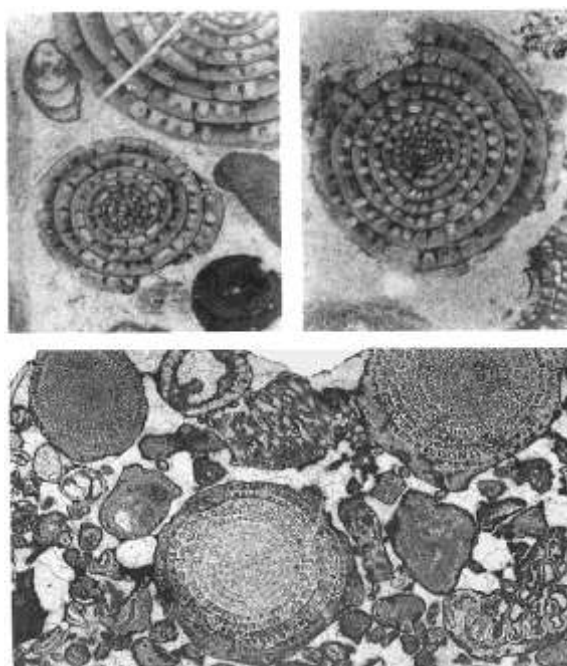
sl.107



Fuzulinidne foraminifere odlični su provodni fosili za razdoblja mlađeg paleozoika; za srednji karbon značajan je rod *Fusulina*, za mlađi karbon rod *Triticites* (sl.108 - *Triticites*, povećanje 10x), za stariji perm rodovi *Pseudofusulina*, *Pseudoschwagerina*, *Schwagerina*, a za srednji i mlađi perm rod *Neoschwagerina* (sl.109 - *Neoschwagerina*, povećanja 20, 30 i 12x - s lijeva na desno).



sl.108



sl.109

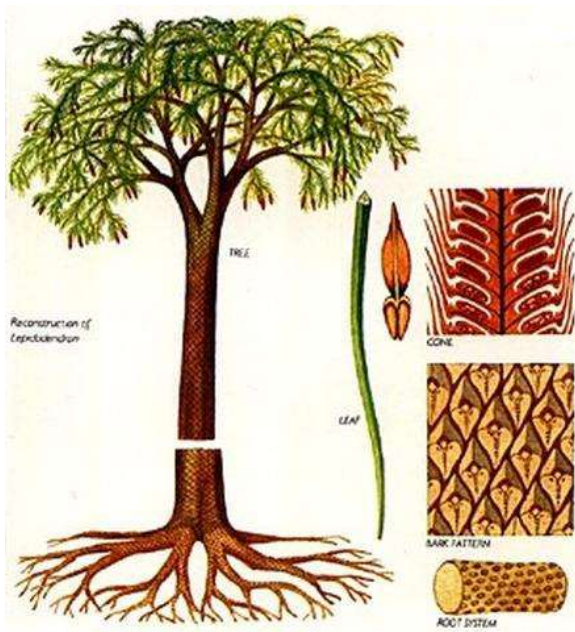
Tijekom mlađeg karbona neke skupine crvenih vapnenačkih algi također su, kao i mahovnjaci, "hvatale" sediment, te su i one imale važnu ulogu u stvaranju podmorskih muljnih humaka (sl.110 - *Mlađekarbonski muljni humak*). Neke su pak skupine algi tijekom perma, zajedno sa spužvama i mahovnjacima, sudjelovale u izgradnji struktura nalik grebenima, npr. vrste crvenih algi *Permocalculus fragilis* i *Gymnocodium bellerophontis*. Takav jedan greben, višekilometarskih dimenzija, nalazi se u zapadnom Texasu, a što je za razdoblje mlađeg paleozoika, kada nema istaknutijih grebenotvornih organizama, zaista raritet. Jedan takav, ali mnogo manji "greben", prisutan je i na našem Velebitu (Tišljar et al., 1991).



sl.110

7.3.1.2. Kopno

Velika akumulacija ugljena nastalog iz bilja akumuliranog tijekom mlađeg karbona, ovom je periodu dala i ime. Niti u jednom drugom razdoblju Zemljine prošlosti, biljke nisu



sl.111

Najznačajniji rodovi nastali su unutar skupine papratnjača - crvotočina (Lycopsida), a to su bili *Lepidodendron* (sl.111 - *Lepidodendron*) i *Sigillaria* (sl.112 - *Sigilaria*) koje su za svoje razmnožavanje trebale vodeni močvarni prostor. *Lepidodendron* je bio češći rod koji je mogao narasti do visine od 30 m, a promjer debla mogao mu je biti i do 1 m. U podnožju ovih "gigantskih papratnjača" živjele su biljke manjih



sl.113

dimenzija od koji su se neke razmnožavale sporama, a neke sjemenkama. Sjemenkama su se razmnožavale Pteridospermae, npr. rod *Neuropteris*, a koje su se tek od 1904. počele razlikovati od onih papratnjača koje su se razmnožavale sporama. Jedan od rodova pteridospermi bio je i *Glossopteris* (sl.113 - *Glossopteris*), značajan po tome što je bio dominantan predstavnik gondwanske glossopteris flore.

Nisu sve papratnjače obitavale u močvarama. Takvi su npr. bili mlađekarbonski rodovi *Calamites* (sl.114 - *Calamites*) i *Annularia* (sl.115 - *Annularia*), a koji su više preferirali suše prostore uz močvare. Kako su se također razmnožavali sporama, smatra se da je okoliš njihova boravka barem sezonski morao biti vlažniji. *Calamites* i *Annularia* spadaju u člankovitu skupinu papratnjača Equisetatae (preslice) kojima grane i listovi rastu iz članaka koji se

imale takav značaj kao u karbonu.

Velika količina biljne materije nakupljala se na prostorima močvara, a kako treba oko nekoliko kubičnih metara biljne materije da nastane jedan kubični metar ugljena, jasno je da su prisutne velike količine karbonskog ugljena za svoj nastanak trebale enormno veliku količinu nakupljene biljne materije.

Starijekarbonska flora po prisutnim biljnim rodovima još je nalikovala mlađedevonskoj, da bi se tijekom mlađeg karbona iz nje razvilo tek nekoliko novih biljnih rodova, no svaki s mnogobrojnim vrstama.



sl.112



sl.114

sl.115



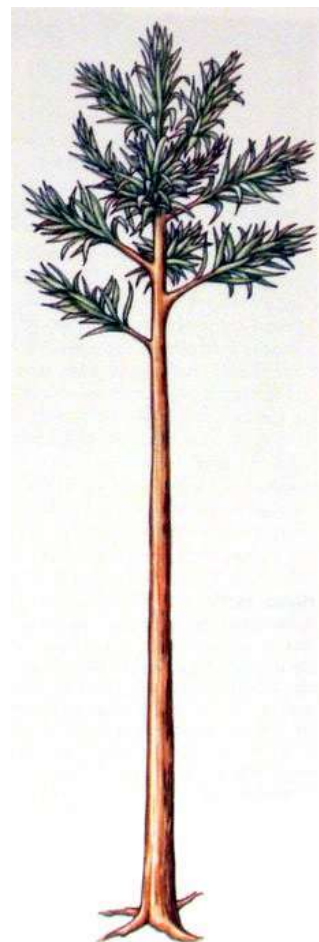
nalaze duž stabla, grana ili korjenja.

Još jedna značajna skupina karbonskih biljaka, a koje su kao i kalamiti obitavale na čvrstom tlu, bile su *Cordaite*s (sl.116 - *Cordaite*s). Predstavnici ove skupine mogli su također narasti do visine od preko 50 m. Kordaiti su se razmnožavali sjemenkama i nisu ovisili niti o barem sezonski vlažnom podneblju, te su zasigurno činili velike šume nalik današnjim šumama crnogorice.

Kordaiti

pripadaju skupini golosjemenjača koje uključuju i sve današnje četinjače (borove, smreke, jele i dr.), npr. mlađekarbonski rod *Walchia* (sl.117 - *Walchia*), kojem se sjemenke nalaze u tvorbama nalik današnjim češerima.

Obilje biljaka koje su se razvile tijekom mlađeg karbona, nastavilo je svoj razvoj i u starijem permu, no ipak u nešto manjem obimu. Do kraja perma preostalo je tek samo nekoliko crvotočina i preslica, dok su svi predstavnici skupine *Cordaite*s izumrli. Od crvotočina i preslica koje su preživjele paleozoik, bile su samo one malih dimenzija od kojih neke žive i danas kao "živi fosili". Inače, upravo je perm bio razdoblje postupne zamjene dominacije papratnjača golosjemenjačama. Tako, tijekom mlađeg perma, pa sve do početka mlađe krede, golosjemenjače postaju prevladavajući kopneni florni element na Zemlji. U mlađepaleozojskim



sl.116

sl.117



slatkovodnim okolišima svoj su razvoj nastavile ribe zrakoperke, a koje su tu živjele zajedno sa slatkovodnim morskim psima koji danas nemaju srodnika. Također tijekom mlađeg paleozoika u slatkovodnim prostorima značajniji su postali i razni slatkovodni školjkaši, a čiji se fosilni ostaci često mogu naći u ležištima gornjokarbonskih ugljena.

Na kopnu, od mlađeg paleozoika pa sve do danas, značajni postaju i kukci. Najstariji su se javili još tijekom starijeg devona, no ti još nisu imali krila. Krila su im se razvila tek tijekom mlađeg karbona, no ti najraniji insekti svoja krila nisu mogli skupiti uz tijelo kao današnji. Poznate su npr. vrsta *Stenodictya lobata* i rod *Meganeura* (sl.118 - *Meganeura*) čiji je raspon krila iznosio do 70-ak cm i to je bio najveći kukac svih vremena. Ostali insekti tog razdoblja uglavnom su imali krila dimenzija sličnih današnjim.



sl.118

sl.119



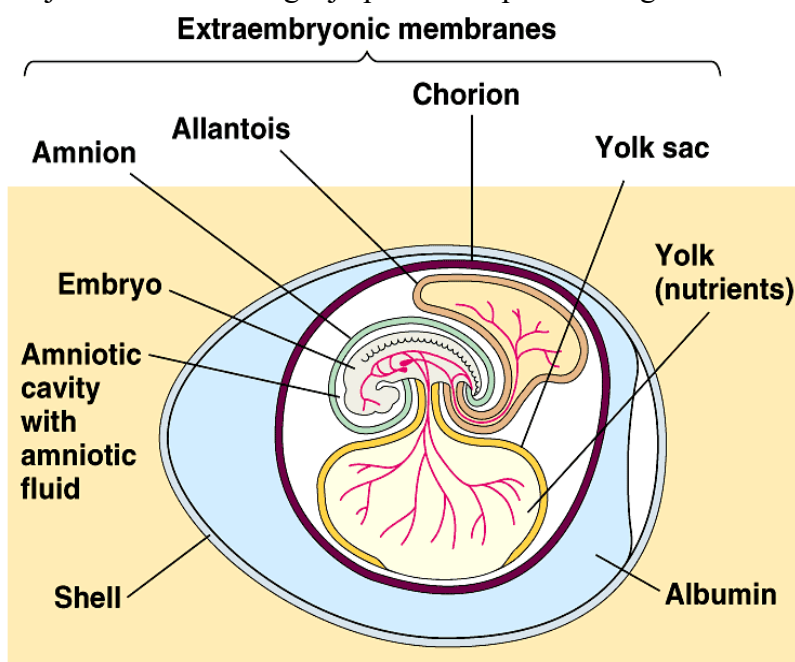
Kralježnjaci (Vertebrata) mlađeg paleozoika uglavnom su živjeli uz rijeke, jezera, močvare ili mora, provodeći dio vremena na kopnu, a dio u vodi. Tijekom starijeg karbona jedini kopneni vertebrati bili su vodozemci (Amphibia). Za razliku od današnjih rijetkih vodozemaca malih dimenzija, tijekom karbona i starijeg perma vodozemci su bili vrlo raznoliki, različitih dimenzija, formi i načina života. Neki su nalikovali današnjim

aligatorima, npr. *Eryops* (sl.119 - *Eryops*), drugi su pak bili poput zmija, neki su bili dužina i do 6 m.

Najstariji ostaci fosilnih gmazova (Reptilia) nađeni su u naslagama mlađeg karbona Joggins formacije Nove Škotske. To je bio rod *Hylonomus* (sl.120 - *Hylonomus*), dužine oko 30-ak cm. Razlika između tih najranijih gmazova i vodozemaca od kojih su potekli, ogleda se tek u neznatnim razlikama u građi čeljusti, lubanje, unutarnjeg uha i kralježnice. Ipak, gmazovi se od vodozemaca bitno razlikuju načinom razmnožavanja. Ključan evolucijski napredak, a koji je i omogućio razvoj gmazova, bio je razvoj amniotskog jajeta (sl.121 - *Građa amniotskog jajeta*). U takvom jajetu, embrio je zaštićen ljuskom i razvija se koristeći nutrijente koji se nalaze unutar jajeta (npr. poput današnjeg kokošnjeg jajeta). Amniotsko jaje građeno je od nutrijonskog žumanjka i dvije ovojnice; u jednoj - amnionu, nalazi se sam embrio, dok druga ovojnica služi za odlaganje produkata probave tog embria. Razvoj amniotskog jajeta po prvi



sl.120



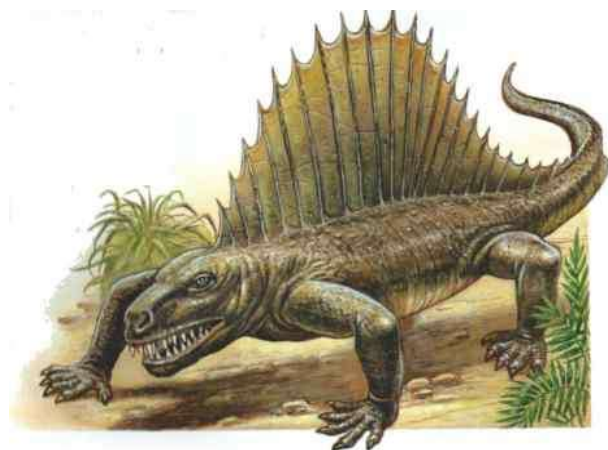
sl.121

je puta omogućio vertebratima razvoj njihovih potomaka izvan vode, a također, i njihovo rasprostranjenje dalje po kopnu (slično kao i kod biljaka nakon razvoja sjemenke). Iako je najstarije fosilno jaje nađeno tek u starijem permu, smatra se da se amniotsko jaje razvilo još tijekom karbona jer od tada i sežu fosilni ostaci najstarijih gmazova.

Napredniji gmazovi razvili su još jednu značajnu prilagodbu: napredniju i jaču čeljust sposobnu

Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

proizvesti snažniji pritisak, kojom se hrana mogla i žvakati. Vodozemci i najprimitivniji gmazovi to nisu mogli, nego su neku drugu životinju zubima mogli samo usmrtniti, a zatim su je ili zubima komadali ili cijelu gutali bez žvakanja.



sl.122

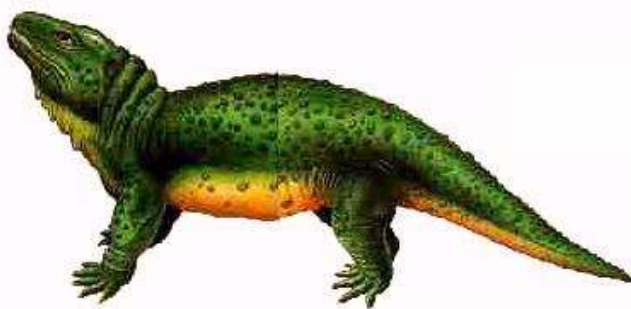
Tijekom perma gmazovi su doživjeli nagli razvoj i sve su više potiskivali vodozemce zbog njihove veće pokretljivosti i naprednije čeljusti. U starijem permu najistaknutiji grabežljivci među gmazovima bili su predstavnici reda Pelycosauria. To su bili gmazovi sa leđnim "jedrom" koje je u stvari predstavljalo kožu razapetu između koštanih žbica, apofiza - vertikalnih nastavaka kralješaka, a što im je vjerojatno služilo za grijanje krvi. Živjeli su u močvarnim predjelima i smatra se da

su neki bili i poluvodene životinje. Iz ove skupine značajni su rodovi: grabežljivac *Dimetrodon* (sl.122 - *Dimetrodon*), veličine današnjeg leoparda i biljojed *Diadectes* (sl.123 - *Diadectes*) (obično dimetrodonova lovina - ima osobine i vodozemca i gmazova).

Dimetrodon je spadao u skupinu gmazova koji imaju dosta sličnosti s kasnijim sisavcima. To se naročito ogleda u građi njegove lubanje, odnosno u donekle diferenciranim zubima, a što je jedna od glavnih karakteristika sisavaca.

Sredinom perma razvila se još jedna skupina gmazova koja je imala još više sličnosti s kasnijim sisavcima.

To su bili predstavnici reda Therapsida, npr. *Inostrancevia* (sl.124 - *Inostrancevia*). Za razliku



sl.123



sl.124

od ostalih gmazova, predstavnici ove skupine imali su noge više okomito položene u odnosu na trup, dok su ostali gmazovi imali gornji dio nogu postrance (paralelno) položene uz trup. Također, imali su i izdiferencirano zubalo: sjekutiće, očnjake, kutnjake. Smatra se da su terapsidi bili donekle toplokrvni, a za izolaciju su imali i dlake slične onima kakve imaju moderni sisavci. Toplokrvnost im je omogućavala dužu aktivnost za razliku od ostalih gmazova koji su se često morali grijati na suncu da prikupe potrebnu energiju. Stoga su se terapsidi i nastavili naglo razvijati tijekom mlađeg perma, dok je broj pelikosauria naglo opadao. Tijekom 5-10 milijuna godina mlađeg perma razvilo se više od 20-ak porodica

terapsida, te su oni tada među velikim vertebratnim organizmima kopnenih okoliša, postali dominantna skupina.

Na dva su mjesta na Zemlji nađena bogata nalazišta fosilnih terapsida s prijelazom naslaga iz karbona u perm: jedno je u Južnoj Africi - Karoo naslage, a drugo na prostoru

Sibira. Fosilni ostaci terapsida na ova dva nalazišta vrlo su različita, a što govori o izrazitoj raznolikosti terapsida na različitim dijelovima tadašnje Zemlje. Također, unutar Karoo naslaga u vertikalnom slijedu moguće je pratiti i opadanje populacije pelikosauria, a sve veću dominaciju terapsida kao tipičnih mesoždera koji su i bili odgovorni za postupni nestanak pelikosauria.

7.3.2. Permsko izumiranje

Permsko izumiranje predstavlja najveće izumiranje živih organizama u povijesti Zemlje. Označavajući kraj paleozojske ere, izumrlo je oko 95 % marinskih organizama i oko 70 % kopnenih organizama. Izumiranje se u najvećem opsegu javilo na nižim geografskim širinama i prevladavajuće je zadesilo bentičke organizme koji su nastanjivali toplu tropsku mora kontinentalnih šelfova (karbonatne platforme). Broj vrsta organizama postupno je opadao tijekom perma, tako da je očito da je izumiranje bilo uvjetovano postupnom promjenom klimatskih uvjeta tijekom perma, ili pak kombinacijom klimatskih i drugih uvjeta, a nije bilo posljedica samo jednog katastrofalnog događaja.

Izumrli su:

- 1) fusulinidne foraminifere
- 2) tabulatni i rugozni koralji
- 3) mnogi briozoi i brahiopodi
- 4) mnogi mekušci
- 5) mnogi bodljikaši (preživio je samo jedan rod krinoida)
- 6) trilobiti
- 7) mnogi konodonti (konačno izumiru u mlađem trijasu)
- 8) izumiranje nije bitnije pogodilo vertebratne organizme. No ipak, smanjivao se broj vodozemaca, povećavao se broj sinapsidnih pelikosauria koji su od srednjeg perma postupno bivali zamjenjivani sinapsidnim terapsidima.
- 9) izumiranje nije također bitnije pogodilo niti biljni svijet, no ipak, dolazi do postupne zamjene glossopteris flore dikrodium florom, odnosno dolazi do zamjene papratnjača golosjemenjačama, a što je u direktnoj vezi sa zatopljanjem i suhom klimom tijekom perma.

Uzroci permskog izumiranja najvjerojatnije su višestruki, te se može pretpostaviti da je do njega došlo uzajamnim djelovanjem sljedećih faktora:

- 1) Vulkanske erupcije - na prostoru Sibira na kraju perma dešavale su se najveće vulkanske erupcije i izljevi u povijesti Zemlje. Tragovi ovih erupcija i izljeva vidljivi su na prostoru oko sibirskog grada Tura, a također i na širem prostoru oko Yakutska, Norilska i Irkutska. Taj je prostor prekriven s oko 2 milijuna kvadratnih kilometara lave i piroklastita, dok se ukupni volumen te lave procjenjuje na oko 1-4 milijuna kubičnih kilometara. Ove erupcije su intenzivno trajale oko milijun godina. Velika količina piroklastita upućuje da su ove erupcije bile eksplozivnog tipa, što je omogućavalo izbacivanje velike količine plina i prašine u Zemljinu atmosferu. To je na Zemlji izazivalo smanjenje intenziteta Sunčeve energije, opadanje temperature na Zemljinoj površini, a vjerojatno i promjenu sastava atmosfere. Pepeo i sumporni aerosol koji je u atmosferi mogao boraviti i do tisuću godina, zasigurno su dovodili do zahlađenja klime i do glacijacija na visokim geografskim širinama Pangea-e. Zaista, na kraju perma zabilježen je i najveći pad morske razine u povijesti Zemlje, a što je vjerojatno bilo posljedica izrazitih glacijacija na Pangei.

Istovremeno, velika količina ugljičnog dioksida, metana i vodene pare u atmosferi koji su propuštali sunčeve zrake na Zemlju, intenzivno su zagrijavale Zemljinu površinu na nižim geografskim širinama, ali nisu dopuštale povratak te topline nazad kroz atmosferu (efekt

staklenika). Ovi plinovi u atmosferi boravili su mnogo duže no prašina i utjecali su na zagrijavanje klime kroz milijune godina.

Emisija svih navedenih plinova tijekom tih ogromnih permskih vulkanskih erupcija u Sibiru, zasigurno je u najvećoj mjeri uništila i ozonski omotač, a što se onda vrlo nepovoljno odražavalo na živi svijet Zemlje.

2) Impakt - krajem 20. stoljeća istraživači su otkrili kemijske dokaze za udar meteora u Zemlju upravo prije 251 milijun godina. Naime, na prostoru Japana, Kine i Mađarske u većoj su koncentraciji otkrivene kompleksne ugljikove molekule, a koje sadrže izotope helija i argona kozmičkog porijekla. Također, već su i od ranije bile poznate iridijske anomalije (iridij je na Zemlji rijedak, ali je čest u meteoritima koji pri prolasku kroz atmosferu isparavaju, kada se iridij oslobađa, te se kasnije duže vrijeme taloži na Zemlju) i nalazi stišovita ("šokirani" kvarc koji može nastati samo pod ogromnim pritiskom udara nekog meteorita) na prostoru Antartike i Australije, i to upravo iz kopnenih naslaga sa granice perm-trijas. Ipak, ovi nalazi su mnogo skromniji i nejasniji nego oni s granice kreda-tercijar, a jedan od razloga tomu je zasigurno i to što je perm bio puno ranije, te je taj materijal bio izložen dijagenetskim procesima i/ili trošenju puno duže vrijeme. Oko granice paleozoika i mezozoika zaista je došlo do serije impakata, a jedan od njih bio je od najvećeg objekta koji je ikada pogodio Zemlju. Tako je jedan 40 kilometarski krater nađen u Brazilu i datira otprilike 250 mil. god., jedan 23 kilometarski krater od prije 225 mil. god. i jedan 100 kilometarski od prije 220 mil. god. nađeni su na prostoru Kanade (Manitoba i Quebec), dok je jedan od prije 215 mil. god. nađen i na području Ukrajine.

U novije vrijeme otkrivene su u kopnenim naslagama s granice perm-trijas i nakupine stanica gljiva, što može ukazivati na nagli pomor biljnog svijeta u to vrijeme, a za što može biti odgovoran upravo impakt.

3) Klima - klima se periodički mijenjala; povremeno je bila jako topla, a povremeno jako hladna. Formiranjem Pangee kontinentalni prostor postaje ogroman, a što u njegovoj unutrašnjosti, bez utjecaja s mora, dovodi do uspostave tople i vrlo suhe klime, te do izrazitih sezonskih klimatskih promjena u smislu vrlo toplo i suho, a zatim vrlo hladno i suho.

Kako je već rečeno, na zatopljenje, a i zahlađenje klime tijekom perma zasigurno su utjecale ogromne vulkanske erupcije na prostoru Sibira. U razdobljima zatopljenja klime dolazilo je i do zagrijavanja mora što je nepovoljno utjecalo na izlučivanje skeleta kod mnogih bentičkih organizama, a također, sve suša klima u tropskim i subtropskim prostorima uništavala je močvare, a time sa njima i biljni i životinjski svijet koji ih je nastanjivao.

Dokazi povremenih zahlađenja i glacijacija vidljivi su iz postojanja starije- i srednjopermskih morena na polarnim prostorima ondašnje Pangea-e (Australija, Sibir), a također i iz postojanja velikih pješčanih dina i evaporita na umjerenijih prostorima koji ukazuju na hladan i suhi okoliš. Zahlađivanje klime je hladilo mora, a time smanjivalo tropski i subtropski prostor koji je bio prevladavajući "proizvođač" karbonata. Stoga udio karbonatnih stijena naglo opada na granici perm-trijas.

Uzastopna mijenjanja toplih i hladnih razdoblja na Zemlji, nije odgovarala većini organizama, te su oni izumirali. Hlađenje mora u tropskim prostorima nije ostavljala nikakvu šansu organizmima za eventualnu selidbu u toplije krajeve, te su se oni morali ili prilagoditi, ili izumrijeti. U razdobljima hladnije klime i globalno niske morske razine, na površinu mora iz njegovih dubljih dijelova u znatno većim količinama dolazili su ugljični dioksid, sumporovodik, a vjerojatno i metan, a što je smrtno djelovalo na organizme koji su navikli na drugačije uvjete. Također, uvjeti periodički niskog globalnog morskog nivoa dovodili su na površinu i dubokomorske anoksične vode, a što je također izazivalo pomor plitkovodnih organizama. Također, tijekom globalno niskog morskog nivoa dolazi do smanjenja šelfnih prostora, upravo najbujnije nastanjenih bentičkim organizmima.

Na organizme je mogla utjecati i promjena saliniteta oceana tijekom hladnijih i toplijih razdoblja, čemu se većina organizama nije mogla prilagoditi.

4) Formiranje Pangea-e - formiranjem ogromnog, jedinstvenog kontinenta Pangea-e, klima na njemu je postala negostoljubiva; suha i vruća u unutrašnjosti (zbog velike udaljenosti od mora), a hladna i suha na višim geografskim širinama. U takvim uvjetima prehrambeni resursi su bili vrlo ograničeni, a što se nepovoljno odražavalo na živi svijet (hrane je bilo malo, a konkurencija je bila velika). Formiranje Pangea-e rezultiralo je i stagnacijom oceana u kojima se dogodila stratifikacija vode; gore je bio oksičan, a dolje anoksičan okoliš.

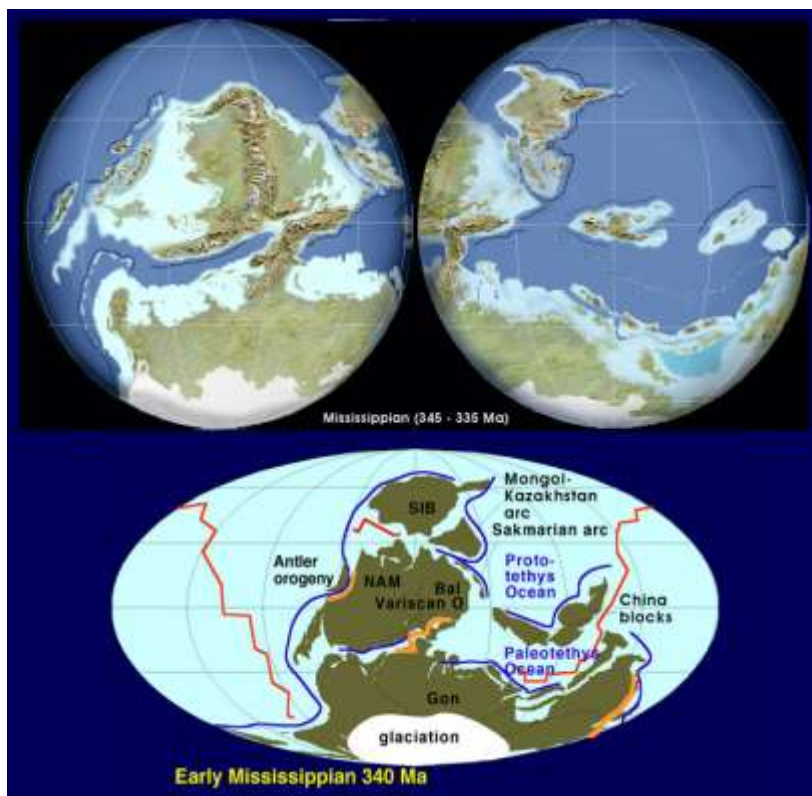
Reljef Pangea-e je bio nizak i tijekom topljenja karbonsko-srednjopermskih ledenih pokrova dolazilo je do ekstremnih poplava koje su smanjivale kopnena prostranstva i mijenjale nivo podzemnih voda. Nakon toga, razdoblja regresija su pak isušivala do tada prostrana preplavljena područja naseljena mnogobrojnim organizmima, a takvim ekstremnim promjenama okoliša neki se organizmi nisu mogli prilagoditi.

Formiranjem ogromnog, jedinstvenog kontinenta Pangea-e smanjena je površina šelfnih prostora, a što je uzrokovalo veću konkurenciju među bentičkim organizmima na preostalom novoformiranom šelfnom prostoru oko Pangea-e, te izumiranje slabijih.

Na primjeru konodonata moguće je vidjeti kako su organizmi mogli preživjeti permsko izumiranje. Naime, konodonti su potpuno preživjeli permsko izumiranje i neke vrste konodonata istovremeno su živjele i u hladnim i u vrućim okolišima. Iz toga slijedi da su izumiranje lako preživjeli samo oni organizmi koji su se mogli lako prilagoditi periodički mijenjajućim klimatskim, odnosno, temperaturnim promjenama. Na takav zaključak ukazuje i fauna s početka mezozoika. Naime, i u morima i na kopnu ona nije bila osobito raznovrsna, a živjela je na širokim i klimatski bitno različitim prostranstvima Zemlje.

7.3.3. Paleogeografija mlađeg paleozoika

Tijekom mlađeg paleozoika postojeći kontinentalni prostori približavali su se jedan



drugom, da bi se krajem paleozoika, početkom mezozoika, svi spojili u jedinstveni kontinent (superkontinent) nazvan Pangea, a koji je bio okružen jedinstvenim oceanom nazvanim Panthalassa. Na početku karbona kontinentalni prostori Zemlje bili su vrlo blizu jedan drugom. Stari crveni kontinent nalazio se sjeverno od Gondwane, a razdvajao ih je ocean Paleotethys. Sjevernim dijelom starog crvenog kontinenta prolazio je ekvator i to je bilo prostor gdje su se tada na njemu, kao i u devonu, formirale znatne količine ugljena. Na

prostoru Gondwane, oko južnog pola, od početka karbona formirali su se prostrani kontinentalni ledenjaci koji su tamo postojali sve do početka mlađeg perma.

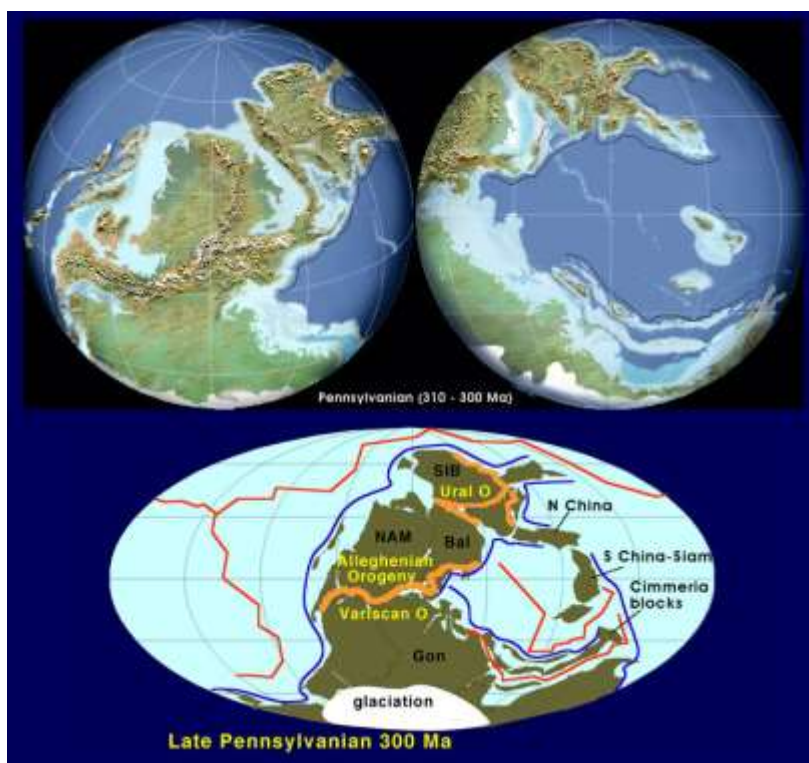
Znači, mlađi paleozoik je bio razdoblje ne samo velikih promjena u živom svijetu, nego i velikih razlika u klimi. Najveće količine ugljena formirale su se tijekom mlađeg karbona, kako na nižim, tako i na višim geografskim širinama, a čak i u blizini gondwanskih polarnih ledenjaka.

Tijekom starijeg karbona na prostranim šelfnim područjima dolazilo je do taloženja vapnenaca (za razliku od "ugljevitog" mlađeg karbona), uglavnom građenih od fragmenata krinoida koji su tada imali vrlo raznovrstan i bujan razvoj. Paleogeografska situacija na Starom crvenom kontinentu uglavnom je odgovarala onoj iz devona. U njegovim istočnim dijelovima formirao se ugljen, na zapadu u plitkom moru taložili su se vapnenci (no bez tabulostromnih grebena) i evaporiti, a na jugu, na području današnje Škotske još iz devona nastavili su se taložiti kopneni riječni sedimenti starog crvenog pješčenjaka. Na šelfnom dijelu toga prostora taložili su se karbonati (današnja Engleska), a dalje na jug dubokomorski crni šejlovi (današnja Njemačka).

Tijekom starijeg karbona postupnim zatvaranjem zapadnog dijela Paleotethysa (ocean nastao odmicanjem Hun mikrokontinenta od Gondwane počevši od mlađeg ordovicija), odnosno početnom kolizijom Starog crvenog kontinenta i Gondwane, započinje hercinska (variscička) orogeneza (u Americi se zove alegenijska). U zoni kolizije kontinenta tijekom srednjeg-mlađeg karbona na gondwanskoj strani (sjeverna Afrika) izdignuo se planinski lanac Mauritanida (Maroko, Zapadna Sahara), na laurencijskoj strani (istočni dio Sjeverne Amerike) planinski lanac južnih Apalača, u njihovom nastavku ka jugu Ouachita planine, dok su se na prostoru Europe izdigli hercinidi (Južna Engleska, Španjolska, Portugal, Njemačka, Francuska, Poljska) (sl. 125 i 126 - *Hercinska orogeneza*). Tijekom starijeg i srednjeg karbona Hun mikrokontinent nastavio se kretati ka sjeveru, što je tijekom mlađeg karbona, njegovom kolizijom sa Sibirijom, uzrokovalo postupno i konačno zatvaranje Prototethysa. Tijekom srednjeg-mlađeg perma Sibirija je kolidirala i sa sjevernim dijelom Starog crvenog kontinenta čime se izdigao planinski lanac Urala. Što se pak tiče Apalača, vidljivo je da su oni formirani tijekom triju orogeneza; Takonske, Akadijske i Alegenijske.

Kolizijama svih ovih kontinentalnih fragmenata u okviru hercinske orogeneze, nastala je Pangea; njen sjeverni dio naziva se Laurazija (Stari crveni kontinent + Sibirija i Kina), a južni i dalje Gondwana.

Tijekom starijeg karbona fusulinidne foraminifere i mnoge druge skupine organizama nastanjivale su gotovo sve šelfne Zemaljske prostore osim Srednjokontinentalne provincije ("Midcontinent Province") na današnjem prostoru centralnog i središnjeg SAD-a. To stoga jer je taj prostor



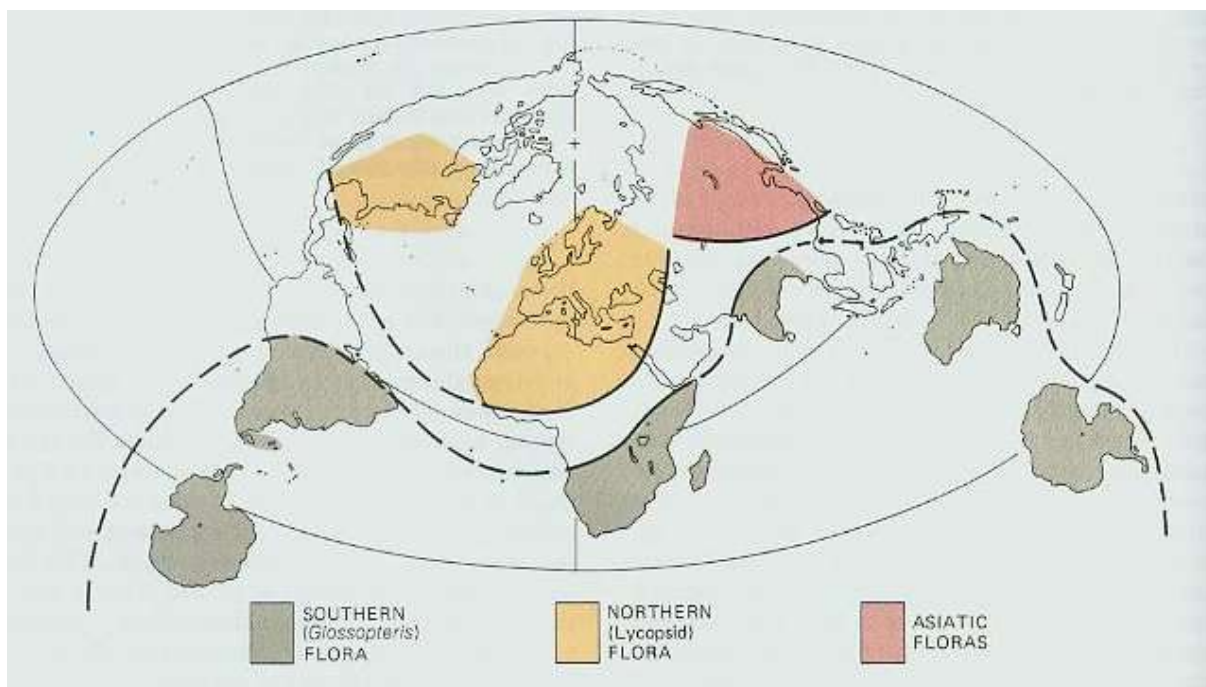
sl.126

od ostalog kontinentalnog prostora Starog crvenog kontinenta bio odvojen planinskim lancem Apalača, odnosno kaledonida, formiranih pri koliziji Baltike i Laurencije u okviru kaledonske orogeneze. Tijekom mlađeg karbona, a zbog spajanja Gondwane i Starog crvenog kontinenta u okviru hercinske orogeneze, živi svijet Srednjokontinentalne provincije proširio se time i na prostor Gondwane.

Na hercinskom orogenezom novostvorenom velikom kopnenom prostoru postojale su vrlo izrazite temperaturne razlike između ekvatorijalnog i polarnog prostora. Kontinentalni ledenjaci Gondwane proširili su se ka sjeveru čak do 30. stupnja južne geografske širine i to je bio prostor karbonsko - srednjopermske oledbe Gondwane (Karoo oledba), a koja je bila intenzivnija i vremenski duža od mlađeordovicijske oledbe. Zaista je čudno kako su relativno blizu ovih kontinentalnih glečera nastajali i ugljeni, a nastajali su čak i na hladnim prostorima Gondwane. Znači, na relativno malim udaljenostima, klima se mijenjala naglo (oštar klimatski gradijent), ili su pak tadašnje biljke imale širu "ekološku valenciju".

Glossopteris flora, koja je sudjelovala u formiranju ležišta ugljena na području umjerenog klimatskog pojasa Gondwane, bitno se razlikovala od euramerijske ili sjeverne flore (Europa + Sjeverna Amerika), od koje su i nastajali ugljeni u tropskom pojasu. Dominantne biljke euramerijske flore bili su *Lepidodendron* i *Sigillaria* (flora crvotočina) i dok su oni bili prisutni i unutar glossopteris flore, mnogi rodovi glossopteris flore nisu bili prisutni unutar euramerijske flore. Glossopteris flora bila je prisutna i na sjevernim kontinentalnim prostorima, no samo na onim područjima koja su se tijekom mlađeg karbona nalazila daleko na sjeveru, kao što je to bio slučaj sa Sibirijom.

U prostorima izrazitijih sezonskih promjena klime, tj. u umjerenom klimatskom pojasu, stabla formiraju godove (tijekom zime u deblu sporo rastu male stanice, a tijekom proljeća veće i u većoj količini, pa se to vidi kao jedan prsten = god), dok u prostorima manje-više jednolične klime ne. Tako, dok stabla glossopteris flore imaju godove, stabla euramerijske flore, ili ih uopće nemaju (jednoličan rast stanica bez istaknutijih prstena većih



sl.127

stanica), ili su godovi slabo istaknuti kao što je to slučaj i u današnjim tropima.

Zbog oštrog klimatskog gradijenta i složenih topografskih odnosa permska flora je bila vrlo izdiferencirana. Postojale su glossopteris flora, sjevernoamerička flora, europska flora, azijske flore (sibirska flora, kineska flora) (sl. 127 - *Permske kopnene flore*). A i svaka od ovih flora je imala nekoliko podflora koje su nastale kao posljedica njihova razdvajanja

izdignutim planinskim lancima. Tako, flora na zapadnoj strani Apalača, značajno se razlikovala od one na istočnoj strani Apalača.

Tijekom perma dolazilo je do promjene klime. Tako, početkom perma na južnom dijelu Gondwane, a i na prostoru sjeverne Laurazije, kontinentalne oledbe bile su vrlo izražene, a što je vidljivo iz česte prisutnosti izbrazdanih stijenskih fragmenata formiranih kretanjem ledenjaka. Prema kraju perma, klima na tim visokim geografskim širinama postaje sve toplija, tako da je npr. na prostoru današnje Australije, unutar plitkomorskih šelfnih sedimenata, zamijećeno postupno obogaćenje prisutne faune sa vrstama koje su dolazile iz ekvatorijalnog pojasa. Tako, pri kraju perma, preko Gondwane se raširila nova flora pteridospermi nazvana *dicrodium* flora, nazvana po prevladavajućem rodu *Dicrodium*, koja je postupno zamijenjivala glossopteris floru i koja se iz ekvatorijalnog pojasa sa zatopljenjem klime proširila i na jug.

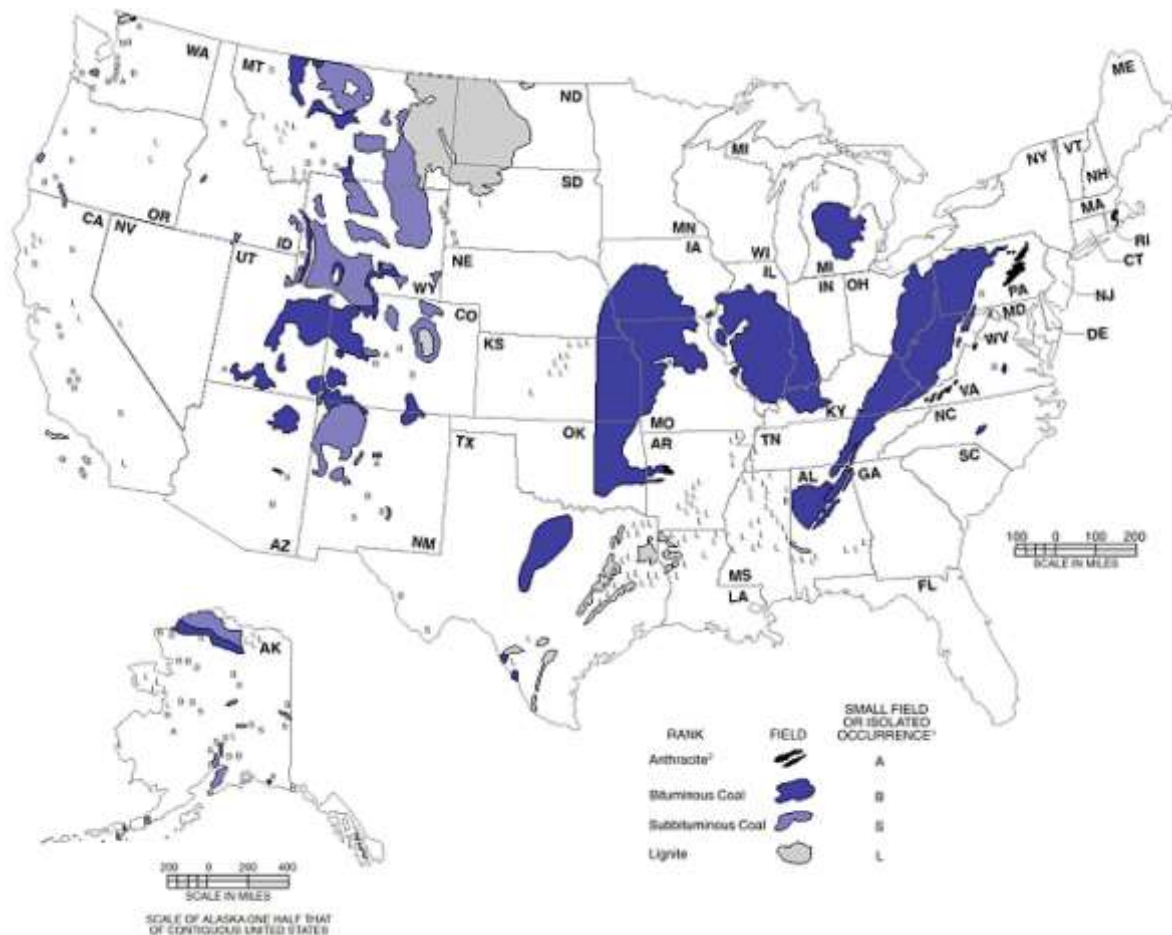
I na sjevernim visokim geografskim širinama Laurazije desio se isti scenarij klimatsko-vegetacijskih promjena, odnosno zatopljenje klime te postupna zamjena papratnjača golosjemenjačama. Ipak, u dijelovima Sjeverne Amerike i Europe koji su se nalazili bliže ekvatoru, papratnjače su postupno nestale iz drugog razloga. Naime, ovdje je klima postala suša i to je bio glavni razlog postupnog povlačenja papratnjača koje su do tada nastanjivale te vlažne tropske prostore i davale obilje biljnog materijala za kasniji nastanak ugljena. Također, ovi novouspostavljeni suhi i vrući klimatski uvjeti oko ekvatora uzrokovali su na plitkomorskim šelfnim prostorima i formiranje debelih naslaga evaporita, kao što je to bio npr. slučaj na današnjim jugozapadnim dijelovima SAD-a i na prostoru sjeverne Poljske, sjeverne Njemačke i dijelovima Rusije. Tako, zbog toga su tijekom perma i nastale najveće koncentracije kamene soli u čitavoj povijesti Zemlje. Te naslage nazivaju se "*zechstein*" (rudni kamen).

Znači, na prijelazu iz karbona u perm, na jugozapadnim dijelovima SAD-a i u dijelovima sjeverne Europe, akumulacija biljne materije papratnjača opada, a sve značajniji postaju pustinski sedimenti dina. Ovdje izumiru i mnoge biljke, tako da je u toj mlađepermskoj flori prevladavajući rod *Walchia*, golosjemenjača koja je izgleda dobro uspijevala u tom suhom i toplom okolišu.

7.3.4. Karbonska ležišta ugljena

Tijekom mlađeg karbona, prostor izdužućeg orogena Hercinida prolazio je kroz višefazna boranja, te su se na takvom prostoru, u depresijama između istaknutih planinskih masiva, lako i često formirala topografska udubljenja, koja su bila zapunjavana molasnim sedimentom donanim rijekama iz viših planinskih predjela, a koja su mjestimice postajala i močvare, kao što je npr. bilo na prostoru današnje Njemačke i južne Engleske. Ove močvare povremeno su bivale i zapunjavane tim molasnim sedimentom, čime se u uvjetima bez kisika biljna materija pretvarala u ugljen. Također, močvare su se formirale i u priobalju kontinentalnih prostora. Takva zbivanja događala su se kako na prostorima današnje Sjeverne Amerike, tako i na prostorima današnje Europe.

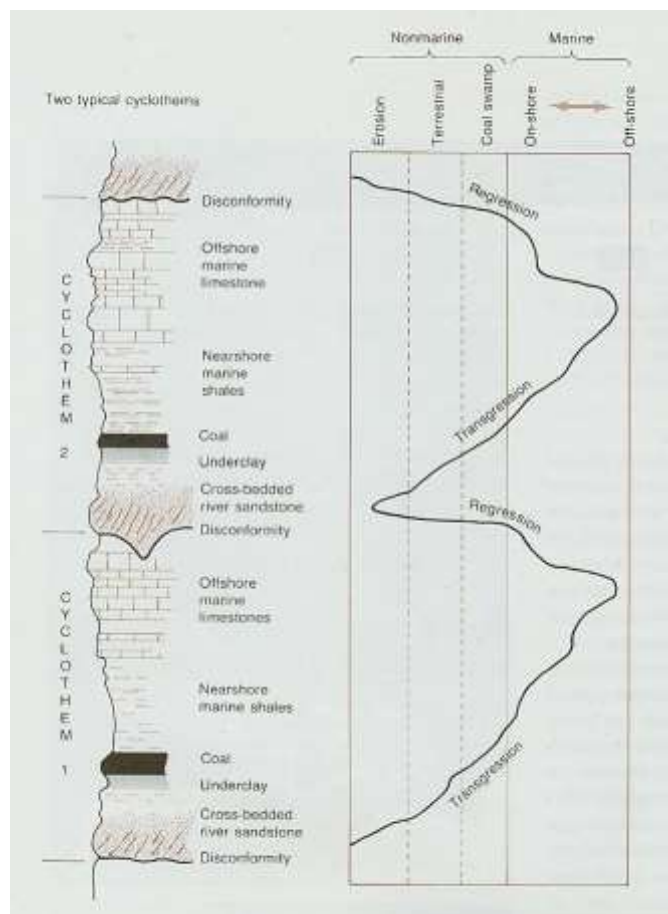
Jedna od značajnih karakteristika gornjokarbonskih ugljenih ležišta jest izmjena metarski debelih ugljenih slojeva sa slojevima bez ugljena. Ova cikličnost mogla se javiti iz dva razloga: ili zbog lateralnih migracija riječnih korita meandrirajućih rijeka, što je bilo prisutno kod ugljenih ležišta u unutrašnjosti kontinentalnih prostora, ili pak zbog globalnih oscilacija morske razine, a što je bilo prisutno kod ugljenih ležišta u marinskom priobalju kontinentalnih prostora.



sl.128

Pri napuštanju riječnog korita kod meandrirajućih rijeka, taj je prostor prijašnjeg korita postao močvara i tu se akumulirala biljna tvar. Ponovnim vraćanjem riječnog korita na taj prostor, taložio se riječni sediment koji je prekrivao biljnu tvar, a koja se, ostajući bez kisika, nije raspadala nego je od nje karbonizacijom nastajao ugljen (limnička ležišta ugljena). Ponovnom selidbom riječnog korita, tu je opet nastala močvara i takav se proces višefazno ponavljao. Takva ležišta ugljena karakteristična su za SAD državu Pennsylvaniju.

U drugom slučaju, u marinskom priobalju močvare se formiraju za vrijeme faze transgresije, kada se nadiranjem mora na kopnu formiraju močvare bogate velikom količinom biljne materije. Tijekom marinske faze dolazi do taloženja marinskih sedimenata preko sedimenata močvara, čime se biljna materija prekriva, a zatim se more ponovno postupno povlači čime



sl.129

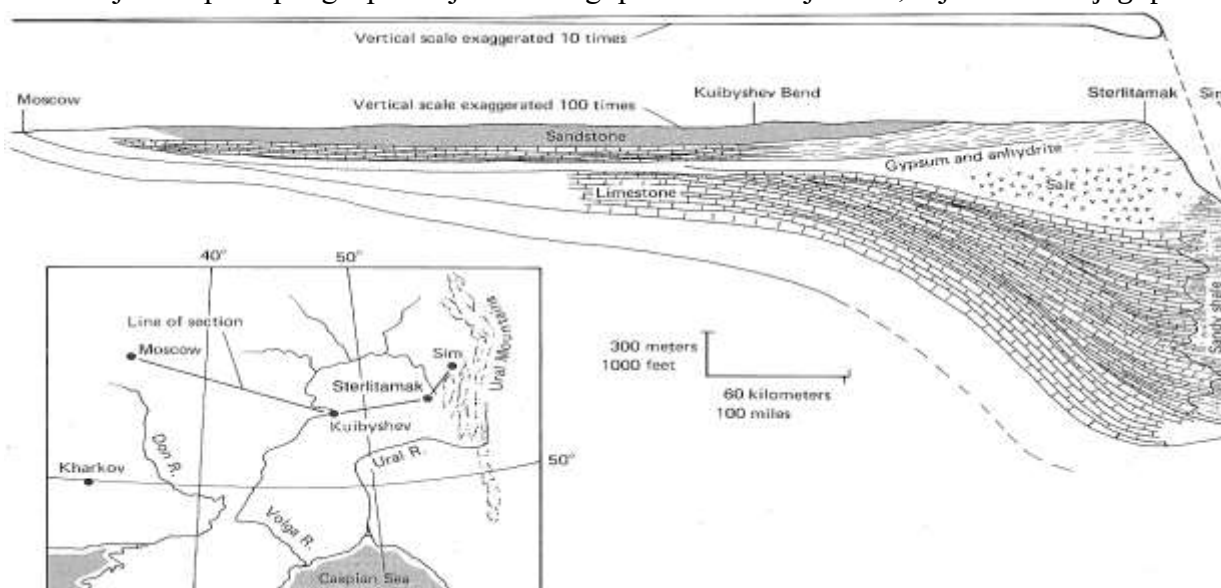
dolazi do nove regresije i ciklus se ponavlja (paralička ležišta ugljena). Takvi ciklusi u Sjevernoj Americi prisutni su na prostorima današnjih SAD-a (sl.128 - *Površinsko rasprostranjenje ležišta ugljena na prostoru SAD-a*) i tu se nazivaju ciklotemi (sl.129 - *Dva tipična ciklotema*), a oni prisutni u Velikoj Britaniji, nazivaju se "coal measures". Značajnih ležišta ugljena ima i u Njemačkoj, npr. u Ruhr-skoj oblasti.

Ove faze regresija i transgresija bile su posljedica periodičkih oledbi na prostoru Gondwane, a o čijem postojanju u vremenskom rasponu između karbona i srednjeg perma postoje jasni sedimentni zapisi na mnogim predjelima bivše Gondwane. Pri tome, kontinentalni ledenjaci nisu se otapali istovremeno. Tako, postoje sedimentni zapisi iz kojih je vidljivo da su se kontinentalni ledenjaci u jednoj fazi prije otopili u Južnoj Americi, a tek onda u Australiji. Znači, vremena otapanja i formiranja tih ledenjaka nisu bila zajednička. Iz toga slijedi da su glavne faze transgresija i regresija bile povezane s razdobljima prosječno najvećih količina otopljenog, odnosno formiranog leda. Također, transgresije i regresije ponekad su naglo prestajale, tj. bile su različita trajanja, tako da nema potpune pravilnosti niti u rasprostranjenju, niti u pojavnosti, a niti u debljinama ugljenih slojeva. S druge strane pak, tijekom faza regresija velik dio podinskih naslaga je mogao biti i erodiran, tako da npr. iznad ugljenog sloja odmah može doći kopneni sediment, dok između njih nedostaje marinski sediment koji je bio erodiran.

Postavlja se pitanje: "A zašto takvih zbivanja nije bilo i tijekom pleistocena, kada je također bilo više faza stvaranja i otapanja kontinentalnih ledenjaka ?" Odgovor je: "Zato jer su tijekom pleistocena kontinentalni rubovi bili bitno strmiji no tijekom mlađeg karbona, pa stoga i nije dolazilo do preplavlivanja prostranih zaravnjenih dijelova kontinenata". Također, iako su porast i pad morske razine tijekom mlađeg karbona bili relativno mali, preplavljena su bila vrlo prostrana područja, koja se npr. protežu od današnje Pennsylvanije do Kansa, a što govori o vrlo niskom reljefu mlađekarbonskih kontinenata (niski hipsometrijski gradijent).

7.3.5. Evaporiti Ruske ploče i sjeverne Europe

Tijekom mlađeg paleozoika kolidirala su dva sjeverna kontinentalna fragmenta; sjeverni dio Starog crvenog kontinenta i Sibirije, čime je došlo do izdizanja planinskog lanca Urala i konačnog formiranja cjelovite Pangee. Duž zapadnog dijela Urala tijekom te kolizije došlo je do postupnog spuštanje taložnog prostora u kojem se, tijekom starijeg perma,



istaložilo oko 5 km plitkovodnih karbonata (sl.130 - *Presjek kroz permske sedimente između Moskve i*

sl.130

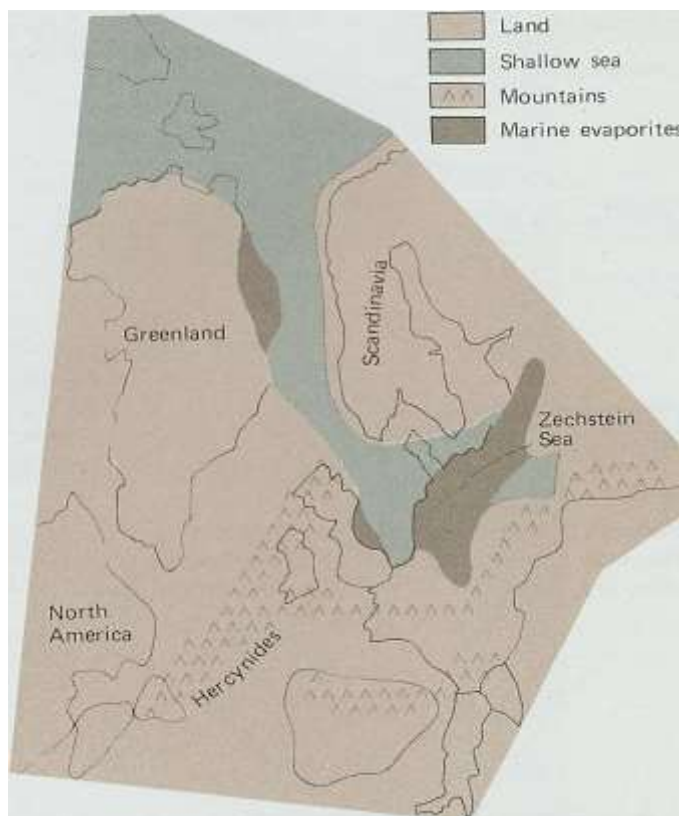
Urala). Gubitkom veze tog plitkovodnog taložnog prostora s okolnim oceanskim prostorom, on je postao hipersalin, te su se tu, tijekom mlađeg perma, počeli taložiti evaporiti. Na te su se evaporitne naslage u najmlađem permu, u području ruske gubernije Perm, istaložili i kopneni klastiti, a prema nazivu te regije i istoimenog grada, permski sistem je i dobio ime.

Tijekom mlađeg perma slična taložna zbivanja dešavala su se i nešto zapadnije. Naime, na prostor današnje sjeverne Njemačke, Sjevernog mora i istočnog Grenlanda, sa sjevera je duž Skandinavije došlo do transgresije i do formiranja plitkomorskog prostora, tzv. Zechsteinskog mora (sl.131 -

Zechsteinsko more preplavljivalo je sjevernu Europu tijekom mlađeg perma). U području

današnje Njemačke, zechsteinski slijed naslaga mlađeg perma započinje transgresivnim konglomeratima koji označavaju početak te transgresije, a iznad njih slijedi ciklička izmjena četiri nivoa vapnenaca u izmjeni s četiri nivoa evaporita. Ova ciklička izmjena vapnenaca i evaporita ukazuje na četiri faze postojanja i četiri faze prekida veze tog plitkog mora s otvorenim oceanom. Svaki evaporitni nivo građen je od halita (kuhinjske soli), a u najizoliranijim dijelovima bazena i kaliske soli koja se istaložila u razdobljima najizrazitijeg isparavanja morske vode. Ovi zechsteinski evaporiti u području sjeverozapadne Njemačke debeli su oko 1 km i komercijalno se eksploatiraju. U njihovoj podini nalaze se kopneni klastiti koji se nazivaju rotliegendes (crvena podina – "New Red Sandstone" - novi crveni pješčenjak - u Engleskoj), a koji predstavljaju molasu nastalu trošenjem hercinida. Temeljem ovakve građe permskih naslaga na prostoru Njemačke, perm se u njoj obično i dijeli samo na dva dijela; "rotliegendes" i "zechstein".

Istovremeni gornjopermski evaporiti taložili su se i na prostoru Delaware bazena zapadnog Texasa, a što jasno upućuje na vruću i suhu klimu, a koja je tijekom mlađeg paleozoika i karakterizirala ekvatorijalna područja Zemlje.



sl.131

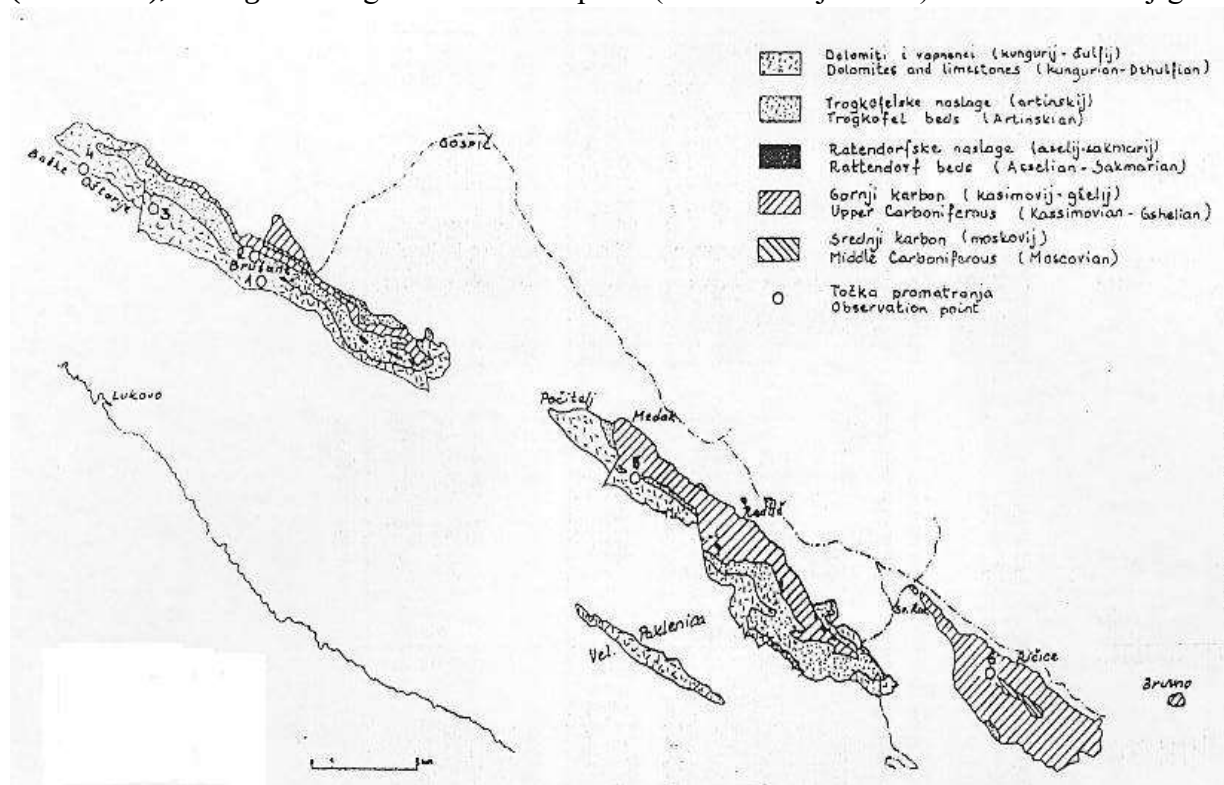
7.3.6. Paleozoik Hrvatske

Među najstarije stijene u Hrvatskoj ranije su se ubrajali metamorfiti (graniti, škriljavci, filiti i dr.) "istočnog gorja" sjeverne Hrvatske (Medvednica, Psunj, Papuk, Požeška gora, itd.). Novija istraživanja pokazuju da se radi o metamorfittima nastalim tijekom hercinske orogeneze, iako ima elemenata i kasnijih faza kaledonske orogeneze. Ipak, pomanjkanje fosila, rasjedni kontakti s okolnim stijenama, te nesigurni podaci dobiveni mjerenjem radiometrijske starosti, često onemogućavaju preciznije određivanje njihove stratigrafske pripadnosti.

Loše sačuvanim graptolitima u crnim šejlovima Medvednice (*Climacograptus*) dokazan je najviši ordovicij, odnosno, vjerojatnije stariji silur.

Stariji devon, te stariji i mlađi karbon, dokazani su nalascima konodonata u vapnenačkim ulošcima na prostoru Medvednice, a također i kod Dvora na Uni.

Fragmentarno, u malim izdancima, naslage srednjeg karbona prisutne su na Baniji (fusulinide), naslage mlađeg karbona na Papuku (flora u škriljancima) i u Samoborskoj gori



sl.132

(*Sigillaria*), a također fragmentarno, u manjim ili većim izdancima, klastične naslage perma prisutne su i u Gorskom kotaru (Fužine-Lokve-Skrad), na Baniji i Kordunu, na Medvednici, Samoborskoj gori, Ivanščici i Marija-goričkim brdima. Na širem prostoru Srba, Kaldreme, Knina, Sinja i Drniša poznat je i karbonatno-evaporitni (gipsni) kompleks naslaga mlađeg perma. Na području Papuka i Psunja nalazi se i tzv. Radlovački kompleks građen i od slejtova, škriljavih metapješčenjaka, filitita, kvarcita i metakonglomerata, starosti protolita raspona od mlađeg silura do srednjeg karbona, dokazano palinološkim istraživanjima i nalascima karbonske flore.

No ipak, naslage mlađeg paleozoika na većem prostranstvu i u kontinuitetu površinski su rasprostranjene samo na području sjevernih, ličkih, padina Velebita (sl.132 - *Rasprostranjenje gornjopaleozojskih naslaga na ličkoj strani Velebita* - Kochansky-Devide et al., 1982).

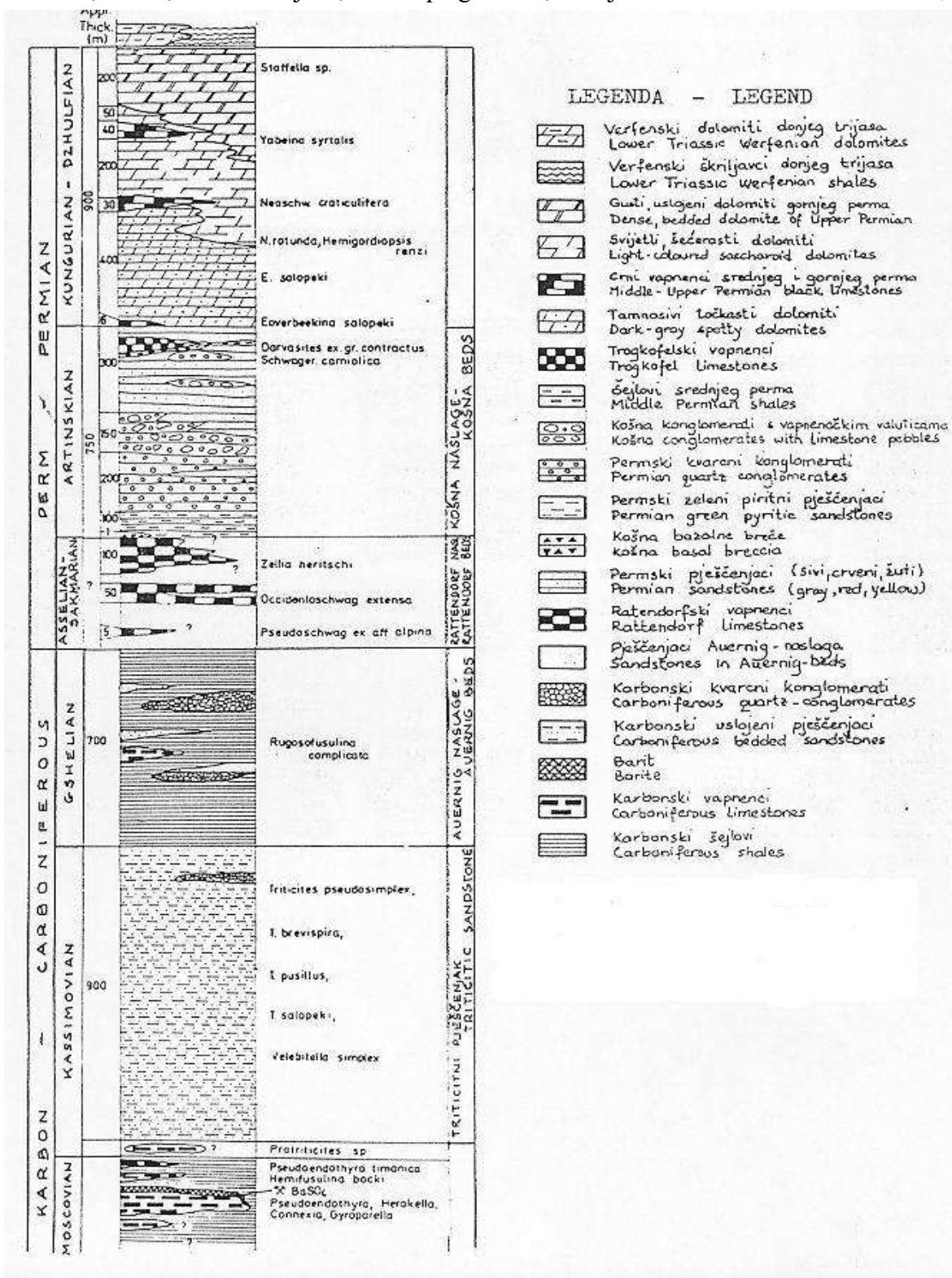
7.3.6.1. Stratigrafski slijed gornjopaleozojskih naslaga na Velebitu (sl.133 - Kochansky-Devide et al., 1982)

7.3.6.1.1. Karbon

Uzduž sjeveroistočnog podnožja Velebita, mjestimice na površini izdanjuju naslage karbona. Najstarije su one iz srednjeg karbona koje su prisutne na području paleozojskog prodora Sv. Rok-Štikada. Litološki su istovrsnih karakteristika kao i naslage mlađeg karbona. Ove naslage istaložene su na prostoru sjeveroistočnog, pasivnog, šelfnog ruba Gondwane.

Karbonske naslage na ovom prostoru izgrađuju tri tipa naslaga:

1) Pješčenjaci i šejlovi - temeljni su i prevladavajući litološki tip karbona na ovom prostoru. Pješčenjaci su predstavljeni kvarc grauvakama i litičnim grauvakama. Izgrađuje ih kvarc, muskovit, klorit, čestice stijena, nešto plagioklasa, a mjestimice i karbonatni detritus, te



sl.133

ugljevita tvar. Ovi su pješčenjaci mjestimice vrlo fosiliferni, ali su ti fosilni ostaci loše očuvani. Često se mogu naći brahiopodi (rodovi *Chonetes*, *Linoproductus*, *Marginifera*, *Choristites* i dr.), školjkaši, te kopneno bilje. Trilobiti i briozoi su vrlo rijetki.

Matriks ovih pješčenjaka je kloritno-sericitni, a predstavlja proizvod dijagenetske izmjene primarno prisutnog glinenog mulja.

Šejlovi su tanko uslojeni (pločasti) i javljaju se unutar pješčenjaka u formi centimetarskih do višemetarskih uložaka. Izgrađeni su od kvarca, sericita, klorita, muskovita, plagioklasa, pirita, kaolinita i organske (ugljevite) tvari.

Mlađekarbonska starost ovih naslaga utvrđena je mnogobrojnom zajednicom fuzulinida. Najčešće vrste su: *Triticites pseudosimplex*, *T. pusillus* i *T. salopeki* i dr. Stoga se pješčenjački dio ovih naslaga naziva "*triticitni pješčenjaci*".

2) Kvarcni konglomerati - javljaju se kao leće unutar pješčenjaka i glinenih škriljavaca i "zreliji" su od njih, tj. sadrže samo najrezistentnije valutice kao što su kvarc, kvarcit, rožnjak. Znatno su rjeđe čestice tufa, siltita i glinenih škriljavaca. Valutice su srednje sortirane, a uložene su u sitnozrnato vezivo istog sastava. Odlikuju se graduiranom slojevitošću s debljinom slojeva od 0.5 - 2 m. To su oligomiktni kvarcni konglomerati sa subzaobljenim kvarc-rožnjačkim zrnima do nekoliko cm promjera. Cement je sericitno-kloritni, oskudan je, te su valutice često u izravnom dodiru. Ponekad je ovaj dodir i konveks-konkavan, pa ove naslage ponekad imaju gotovo strukturu kvarcita.

3) Vapnenci - u višim dijelovima gornjokarbonskih klastita ima nekoliko leća i proslojaka vapnenaca. Najčešće su gromadasti i raspucani, u obliku nepravilnih blokova različite veličine koji strše iz okolnih erodiranih glinenih škriljavaca. Ovi vapnenci su fosiliferni i sadrže fragmente krinoida, školjkaša, brahiopoda i briozoa. Najčešće se radi o bioklastičnim vekston-pekstonima i floutstonima koji uz česte bioklastične fragmente i fuzulinidne foraminifere (npr. *Rugosofusulina alpina*), sadrže i dosta terigene komponente. Njen se udio izrazito povećava kako se ide ka podinskim, odnosno krovinskim pješčenjacima unutar kojih se nalaze.

Karbonske naslage taložene su u marinskom prostoru uz sjeveroistočni šelfni rub Gondwane, a koji se zapunjavao siliciklastičnim materijalom donanim tekucicama s gondwanskog kopna. Na blizinu kopna, odnosno na rubni dio tog šelfnog prostora, jasno ukazuju mjestimični nalazi kopnenog bilja.

Mjestimični nalazi vapnenaca ukazuju na razdoblja slabijeg donosa terigene komponente s obližnjeg gondwanskog kopna, ili pak na privremenu izoliranost tog dijela prostora od terigenog utjecaja.

7.3.6.1.2. Perm

Permske naslage također izdanjuju na prostoru paleozojskih tektonskih prodora uz sjeverno podnožje Velebita, te u Velikoj Paklenici. Taložni uvjeti uz sjeveroistočni rub Gondwane, na prijelazu karbona u perm, nisu se bitnije promijenili. No ipak, kako se ide u više nivoe starijeg perma, karbonatna komponenta postaje sve dominantnija, te je unutar tih vapnenaca utvrđena bogata fosilina zajednica ratendorfskog nivoa (naziv prema ratendorfskim vapnencima iz starijeg perma Karničkih Alpi), npr. sa *Zellia galathea*, *Pseudoschwagerina velebitica*, *Schubertella kingi* i dr. (područje Divosela). Ovi vapnenci su litološki gotovo identični onima iz mlađeg karbona.

Na prijelazu starijeg u srednji perm došlo je do izdizanja (emerzije) i mjestimice do intenzivne erozije nastalog reljefa kada se u zaostalim marinskim paleodepresijama tijekom artinska, talože pješčenjaci i konglomerati, a zatim, tijekom mlađeg dijela srednjeg perma, započinje taloženje karbonatne serije koje traje sve do kraja perma.

1) Pješčenjaci - unutar nivoa pješčenjaka mogu se razlikovati dva osnovna tipa: piritični pješčenjaci i pješčenjaci gredenskog tipa. Piritični pješčenjaci se od ovih drugih izdvajaju po svojoj zelenoj boji koja potječe od veće količine autigenog i detritičnog klorita, a naročito po

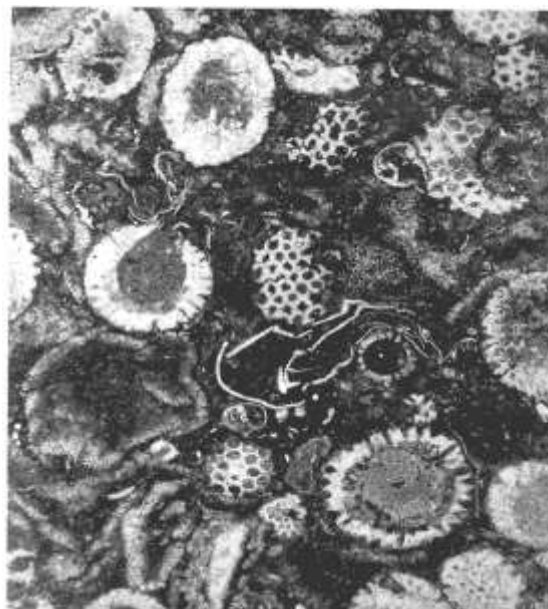
sadržaju pirita. Oba ova tipa pješčenjaka su u stvari grauvske građene od kvarca, čestica stijena, feldspata muskovita i klorita. Matriks im je kloritno-sericitni.

Prisutnost pirita ukazuje na reduktivne uvjete sedimentacije, a prisutnost kloritno-sericitnog matriksa upućuje na marinsku sredinu koja je sa svojim sadržajem Mg i K iona, omogućila pretvorbu terigenog mulja u stabilne minerale marinske sredine.

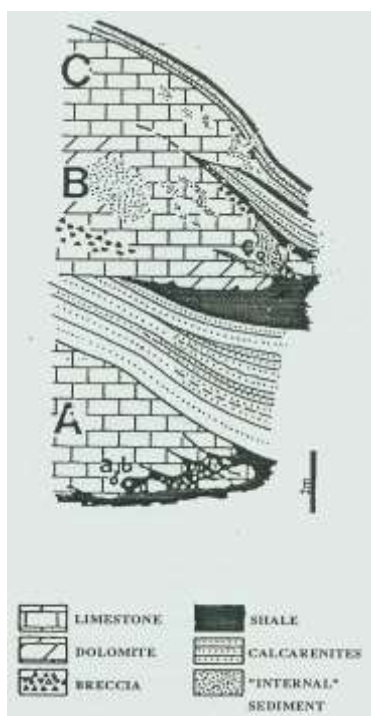
2) Konglomerati - unutar nivoa konglomerata također se mogu razlikovati dva osnovna tipa; kvarcni konglomerati i petromiktni konglomerati. Kvarcni konglomerati su sitnozrnati izgrađeni pretežito od ulomaka kvarca, kvarcita i rožnjaka, a u manjoj mjeri od silita, pješčenjaka i staklastog tufa. Vezivo je oskudno, te ovi konglomerati predstavljaju "zrelije" varijetete petromiktinih konglomerata.

Prisutni petromiktni konglomerati u literaturi se nazivaju "*košna naslage*". Izgrađeni su od krupnih, loše sortiranih valutica (2-25 cm) različitih stijena: vapnenaca, pješčenjaka, silita, rožnjaka, glinenih škriljavaca, dok su čestice kvarca rjeđe. Fosilni ostaci unutar ovih konglomerata vezani su za vapnenačke valutice iz podinskih karbonskih vapnenaca i ratendorfskih vapnenaca. Konglomerati su razvijeni unutar pješčenjaka gredenskog tipa s kojima se vertikalno i lateralno izmjenjuju. Petromiktina priroda detritusa ukazuje na raznovrsne ishodišne stijene, tj. potječe iz tek uzdignutih dijelova starije podloge starijeg perma i karbona.

3) Karbonati - Na užem području između Baških



sl.134



sl.135

Oštarija i Brušana razvijene su tri zone tamnosivih vapnenaca, razdvojene debelim zonama dolomita (permjskih dolomita ima i u Velikoj Paklenici), taložene tijekom mlađeg dijela srednjeg perma i mlađeg perma.

Prva od ovih vapnenačkih zona debljine od oko 20 m, leži normalno na klastitima artinska. U njoj su česti fosilni nalazi dasikladaceja *Mizzia velebitana* (sl.134 - *Mizzia velebitana*, *povećanje 12x*), *Mizzia yabei*, fuzulinida *Eoverbeekina salopeki* i dr., a česti su i nautilidi, gastropodi, brahiopodi i krinoidi.

Druga zona vapnenaca, debljine je oko 60 m, i najfosiliferniji je nivo ove karbonatne serije. Na jednom njenom dijelu, na Velebitu, vidljive su i tri faze rasta jednog manjeg grebena (sl.135 - *Velebitski permjski "greben"* - *Tišljar et al., 1991*). Radi se o tri intervala tamnih, djelomice dolomitiziranih vapnenaca bogatih organskom materijom i fosilima, tako da je ovdje izdvojeno oko 85 različitih mikro i makro vrsta. Prisutne su dasikladaceje *Mizzia velebitana*, *Mizzia yabei*, fuzulinida *Neoschwagerina craticulifera*, crvene alge *Gymnocodium bellerophonis* i *Permocalculus tenellus*, te mnogobrojni brahiopodi iz skupina spiriferida, eneteletida, produktida. Ovi



vapnenci su odvojeni intervalima crnih šejlova, kalkarenita i breča, a koji su mjestimice graduirani i laminirani, a mjestimice potpuno nesortirani. Formiranje grebena započelo je naseljavanjem izbočina na morskom dnu fenestelidnim briozoima, a zatim njihovim obavijanjem cijanobakterijama. Na to su se hvatali drugi briozoi i kalcispongije (npr. *Colospongia dubia*), koje su u kasnijim fazama razvoja "grebena" postale njegov prevladavajući građevni element. Svaka faza rasta grebena (bile su tri) završila je njegovim prekrivanjem olujno donešenim intervalom crnih šejlova, kalkarenita i breča (oluje), da bi nakon nekog vremena rast grebena bio obnovljen.

Treća zona, debljine 50 m, fosilno je slična drugoj, no sadrži još i neke "dodatne" vrste; npr. *Permocalculus fragilis*, a znatno češće i fuzulinidu *Yabeina syrtalis* (sl.136 - *Yabeina syrtalis*, povećanje 10x).

Ovi vapnenački horizonti (zone) izmjenjuju se sa znatno debljim (nekoliko stotina metara) horizontima dolomita. Iznad prve vapnenačke zone dolaze tzv. "micijski ili točkasti dolomiti", vrlo bogati koraljima, brahiopodima, mekušcima (*Bellerophon*, *Pleurotomaria*, *Edmondia* i dr.), a osobito različitim mikrofosilima: micijama i fuzulinidnim foraminiferama. To su ranodijagenetski dolomiti, a česte mnogobrojne krupnije bijele točke u njima predstavljaju rekristalizirane skeletne fragmente koralja *Waagenophyllum*.

Iznad druge vapnenačke zone slijede "šećerasti ili neošvagerinski dolomiti". Za razliku od micijaskih, fosilni ostaci su zbog kasnodijagenetske dolomitizacije ovdje znatno rijede prisutni, a tek su na prijelazu u treću vapnenačku zonu fosili ponovno vrlo česti.

Iznad treće vapnenačke zone nalaze se "granični dolomiti". Najčešće su kriptokristalasti s vrlo rijetkim fosilnim ostacima. Ovi dolomiti prelaze u pjeskovite dolomite starijeg trijasa. Ovaj prijelaz je označen najprije tragovima, a zatim sve većom količinom terigenog detritusa u dolomitima, tipičnog za stariji trijas.

LITERATURA

COOPER, J.D., MILER, R.H. & PATTERSON, J. (1990): **A Trip Through Time: Principals of Historical Geology**. Merrill Publishing Co., 531p.

HERAK, M. (1990): **Geologija**. Školska knjiga, Zagreb, 399p.

KOCHANSKY-DEVIDE, V., SREMAC, J., JELASKA, V. & PALČIĆ, I. (1982): **Geološka ekskurzija. Vodič ekskurzije**. Terenski sastanak Velebit IGCP-Projekt br. 5, 16-40.

LEVIN, L.H. (2003): **The Earth Through Time**. John Wiley & Sons, 632p.

PLUMMER, C.C. & McGEARY (1993): **Physical Geology**. Wm. C. Brown Publishers, 537p.

PROTHERO, D. R. & DOTT, R. H. (2001): **Evolution of the Earth**. McGraw-Hill 2. Science/Engineering/Math, 672p.

SARTORIO, D. & VENTURINI, S. (1988): **Southern Tethys Biofacies**. Agip S.p.A., S. Donato Milanese, 231p.

SREMAC, J. & MIHAJLOVIĆ-PAVLOVIĆ, M. (1983): **Graptoliti Medvednice (Zagrebačke gore)**. Rad Jugosl. akad. znan. umjetn., 404, 65-68.

STANLEY, S.M. (1989): **Earth and Life Through Time**. W. H. Freeman and Co., 689p.

TIŠLJAR, J., VLAHOVIĆ, I., SREMAC, J., VELIĆ, I., VESELI, V. & STANKOVIĆ, D. 1991): **Excursion A - Velebit Mt permian-Jurassic**. Int. simp. on the Adriatic carbonate platform. In: VLAHOVIĆ, I. & VELIĆ, I. (Eds.): Excursion guide book, 4-34.

WICANDER, R., MONROE, J.S. (1989): **Historical Geology - Evolution of the Earth and Life Through Time**. West Publishing Co., 576p.

LITERATURA - DODATAK (Porijeklo slika - izvori)

Sl.1 - <http://earthobservatory.nasa.gov/Library/Giants/Steno/Images/bishop.jpg>

Sl.2 - Plummer, C.C. & McGeary (1993): Physical Geology. Wm. C. Brown Publishers, 537p.

Sl.3 - <http://www.usgs.gov/aboutusgs/images/collections/575002.jpg>

Sl.4 - <http://www.usgs.gov/aboutusgs/images/collections/575005.jpg>

Sl.5 - <http://www.usgs.gov/aboutusgs/images/collections/575009.jpg>

Sl.6 - <http://www.sil.si.edu/digitalcollections/hst/scientific-identity/thumbnails/TNSIL14-C6-09.jpg>

Sl.7 - <http://www.encyclopédie-enlignee.com/Images/2/200px-charleslyell.jpg>

Sl.8 - http://www3.interscience.wiley.com:8100/legacy/college/levin/0470000201/chap_tutorial/ch01/images/le01_10.gif

Sl.9 - <http://human-nature.com/images/darwinincr.gif>

Sl.15 - <http://www.google.hr/imgres?imgurl=http://farm4.static.flickr.com>
Sl.18, 19, 66 - Cooper, J.D., Miler, R.H. & Patterson, J. (1990): A Trip Through Time: Principals of Historical Geology. Merrill Publishing Co., 531p.
Sl., 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 20, 25, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 49, 45, 47, 48, 54, 55, 58, 62, 63, 64, 65, 85, 86, 97, 104 - Levin, L.H. (2003): The Earth Through Time. John Wiley & Sons, 632p.
Sl.21 - <https://www.slideshare.net/Vyankyo/stratigraphy-and-history-of-earth-58696273>
Sl.22 - <https://en.wikipedia.org/wiki/Biozone>
Sl.22a - <http://stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2019-05.jpg>
tab.1 - <http://www.palaeos.com/Timescale/timescale.html>
Sl.23 - <http://images.google.com/imgres?imgurl=http://www.meteorites.ru/images/yefrem-2.jpg&imgrefurl=http://www.meteorites.ru/kollekton-e.html&h=240&w=320&sz=25&tbnid=nNZQsO2FXNN-MM:&tbnh=84&tbnw=113&hl=hr&start=3&prev=/images%3Fq%3Dthe%2Boldest%2Bmeteorites%26svnum%3D10%26hl%3Dhr%26lr%3D%26sa%3DN>
Sl.24 - <http://solarsystem.nasa.gov/scitech/images/inset-20040425-748-2.jpg>
Sl.26 - http://www.star.ucl.ac.uk/~rhdt/diploma/lecture_4/primordial.jpg
tab.2 - <http://www.palaeos.com/Timescale/timescale.html>
Sl.38 - <http://www.lakeneosho.org/images/Strom2.JPG>
Sl.41 - <http://euclid.dne.wvfiernet.net/~jvg/Bio208/InfectDisease%20graphics/Miller's%20exp.gif>
Sl. 29, 42, 49, 50, 51, 52, 57, 67, 68, 70, 71, 74, 75, 76, 94, 95, 100, 103, 105, 106, 107, 110, 129, 130, 131 - Stanley, S.M. (1989): Earth and Life Through Time. W. H. Freeman and Co., 689p.
Sl.43 - <http://ijolite.geology.uiuc.edu/02SprgClass/geo117/Ocean%20images/i466.jpg>
tab.3 - <http://www.palaeos.com/Timescale/timescale.html>
Sl.46 - <http://images.google.hr/imgres?imgurl=http://www.uni-tuebingen.de/uni/qvo/pm/pm2005/gifs/pm-05-100-01gr.jpg&imgrefurl=http://www.uni-tuebingen.de/uni/qvo/pm/pm2005/pm-05-100-01.html&h=389&w=600&sz=281&tbnid=ZbZsSpvgTijc9M:&tbnh=86&tbnw=133&hl=hr&start=2&prev=/images%3Fq%3DBanded%2Biron%2Bformations%26svnum%3D10%26hl%3Dhr%26lr%3D%26sa%3DN>
Sl.56 - <http://sun2.science.wayne.edu/~geology/DSCN0011.JPG>
tab.4 - <http://www.palaeos.com/Timescale/timescale.html>
tab.5 - <http://www.palaeos.com/Timescale/timescale.html>
Sl.59 - <http://hoopermuseum.earthsci.carleton.ca/camex/tommo.gif>
Sl.60 - http://www.fossilmuseum.net/Fossil_Galleries/Russian_Trilobites/Bergeroniellus_asiatikus/RUT722C.jpg
Sl.61 - <http://members.aol.com/Waucoba5/dv/poletaarcho7a.jpg>
Sl.69 - http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/Ear_Camb.jpg
Sl.72, 73 - <https://trenton.mcz.harvard.edu/tectonic>
tab.6 - <http://www.palaeos.com/Timescale/timescale.html>
tab.7 - <http://www.palaeos.com/Timescale/timescale.html>
Sl.77 - <http://www.commersen.se/ungafakta/varldshaven/urhaven/rygggrlosa/bilder/pterygotus.gif>
Sl.78 - <http://www.hughmiller.org/images/photos/hughmilleria.jpg>
Sl.79 - <http://homepage2.nifty.com/PhD-mukai/Fishmodels/chocolasaurs/P9160002.JPG>
Sl.80 - <http://www.ittiofauna.org/webmuseum/agnati/images/pteraspis.jpg>
Sl.81 - <http://www.sciteclibrary.ru/istgeo/img/16.jpg>
Sl.82 - <http://www.biologycorner.com/resources/jaw-evolution.jpg>

- Sl.83** - http://visindavefur.hi.is/myndir/dunkleosteus_120204.jpg
- Sl.84** - <http://www.elasmo-research.org/education/evolution/evol-image/cladoselache.gif>
- Sl.87** - <http://www.ne.jp/asahi/dinosaur/araki/im/eus1.jpg>
- Sl.88** - <http://www.emc.maricopa.edu/faculty/farabee/BIOBK/comparison.gif>
- Sl.89** - <http://www.uni-muenster.de/GeoPalaeontologie/Palaeo/Palbot/agl.gif>
- Sl.90** - http://www.museum.fm/2D_Web/Land%20Plants/img/land03.gif
- Sl.91** - <http://www.palaeos.com/Plants/Lycophytes/Images/Baragwanathia.gif>
- Sl.92** - <http://www.ut.ee/BGGM/eluareng/rhynia1.jpg>
- Sl.93** - <http://www.palaeos.com/Vertebrates/Units/150Tetrapoda/Images/Protolepidodendron.gif>
- Sl.96** - <http://www.devoniantimes.org/who/images/R-archaeopteris.jpg>
- Sl.98** - <http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/430NAt.jpg>
- Sl.99** - <http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/400NAt.jpg>
- Sl.101** - <http://www.geo.cornell.edu/geology/classes/geol326/images/siccarpt.gif>
- Sl.102** - <http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/370NAt.jpg>
- tab.8** - <http://www.palaeos.com/Timescale/timescale.html>
- tab.9** - <http://www.palaeos.com/Timescale/timescale.html>
- Sl.108, 109, 134, 136** - Sartorio, D. & Venturini, S. (1988): Southern Tethys Biofacies. Agip S.p.A., S. Donato Milanese, 231p.
- Sl.111** - http://www.webnick.org/petrefaktum/images/thumb_color/Lepidodendron.jpg
- Sl.112** - <http://www.shef.ac.uk/aps/apsrtp/fletcher-ben/sigillaria.jpg>
- Sl.113** - <http://triton.supereva.it/glossopteris.jpg>
- Sl.114** - <http://folk.uio.no/ohammer/calamites.jpg>
- Sl.115** - <http://www.ucmp.berkeley.edu/plants/sphenophyta/annularia.gif>
- Sl.116** - http://www.dsb.unipi.it/~gianni/didattica/n_lez12/cordaite.jpg
- Sl.117** - <http://www.colby.edu/~ragastal/Images/walchia.gif>
- Sl.118** - http://hoopermuseum.earthsci.carleton.ca/2001_dragonfly_sk/fossil4_files/meganeu.jpg
- Sl.119** - <http://www.prismenfernglas.de/images/paleo/eryops01.JPG>
- Sl.120** - <http://www.johnsibbick.com/images/prehis-image/hylo.jpg>
- Sl.121** - <http://io.uwinnipeg.ca/~simmons/16cm05/1116/34-19-AmnioticEgg-L.gif>
- Sl.122** - <http://www.bov.ch/anthony/dimetrodon.jpg>
- Sl.123** - http://venado.conce.plaza.cl/~dinos/links/dinos/fotos/c_diade.jpg
- Sl.124** - <http://www.mathematical.com/dinosinostranrecon.gif>
- Sl.125** - <http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/Miss.jpg>
- Sl.126** - <http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/Penn.jpg>
- Sl.127** - Prothero, D. R. & Dott, R. H. (2001): Evolution of the Earth. McGraw-Hill 2. science/Engineering/Math, 672p.
- Sl.128** - http://www.lucatechnologies.com/resources/files/Web_Files/Case_Study_-_PRB/Coal%20Bearing%20Areas%20Map.jpg
- Sl.132, 133** - Kochansky-Devide, V., Sremac, J., Jelaska, V. & Palčić, I. (1982): Geološka ekskurzija. Vodič ekskurzije. Terenski sastanak Velebit IGCP-Projekt br. 5, 16-40.
- Sl.135** - Tišljarić, J., Vlahović, I., Sremac, J., Velić, I., Veseli, V. & Stanković, D. (1991): Excursion A - Velebit Mt permian-Jurassic. Int. simp. on the Adriatic carbonate platform. In: Vlahović, I. & Velić, I. (Eds.): Excursion guide book, 4-34.

KAZALO

A

abisalni facijes 24
Acanthodii 67
Actinopterygii 68
Aeron 63
Aglaophyton 70
Agnatha 55
Ajfel 64
Akadij 53
akadijska orogeneza 74, 90
akritarhi 46, 65, 75
akrozona 21
Aldanella 54
aldanski štit 32
alegenijska orogeneza 90
alge 42, 46, 47, 66, 69, 80, 81, 99
amoniti 66, 80
amnionsko jaje 85
Anabarella 54
Anabarites 54
anabarski štit 32
Angara 32
angola-kasai štit 33
Animikiea 46
Annularia 83
Anomalocaris 56
Apalači 74, 90, 92
apofiza 86
apsolutna starost 19
Archaeocyathida 55
Archaeopteris 72
Archaeosphaeroides barbertonensis 37
arhaik (arheozoik) 23, 29, 30, 35, 36, 37, 38, 43, 44, 45, 49, 50
Artinskij 80
Aselij 80
Asteroxylon 70
Avalonija 61, 73

B

Bajkonurian oledba 51
baltički štit 32
Baltika 59, 62, 73
Banded Iron Formations (BIF) 44
Banija 96
Baragwanathia 70

Barberton planine 34, 36, 37
Baškirij 79
batijalni facijes 24
Bazenske grupe 26
Becquerel, Henry 15
Bellerophon 100
Belt supergrupa 47
Bergeroniellus asiaticus 54
bezčeljusnice 55, 67
biostratigrafski sustav 22
biotop 24
bodljikaši 55, 87,
brahiopodi 54, 55, 57, 66, 75, 77, 80, 81, 87, 97, 99, 100
brazilski štit 32
Brongniart, Alexander 10
Bryozoa 57, 58
Bucheria 70
Bulawayan grupa 37
Burgess shale fauna 55, 56, 77

C

Calamites 83
Camenella 54
Catskill molasa 78
cenozona 21
Chaleuria 72
Cheirolepis 68
Chengjiang fauna 56, 57
Choanichthyes 68
Chondrichthyes 68
Chonetes 97
chordata 55, 56
Choristites 97
Chuar grupa 46, 47
cijanobakterije 42, 45, 47, 69
cikloidne ljuske 68
ciklotemi 94
Cisural 80
Cladoselache 68
Climacograptus 96
Cloudina 48
"coal measures" 94
Coelacanthi 69
Colospongia dubia 100
Columbia 49
Coniferophytina 72
Cooksonia 70
Cordaites 84

crni dimnjaci 44
Crossopterygii 69
crveni slojevi 45
Cambria 52
Cuvier, G. 7, 10, 11
Cycadophytina 72
Cyclomedusa 48

Č

Čangsingij 80
čeljust 55, 67, 68, 73, 85, 86
član 21
člankonošci 72

D

Dapingian 53
Darivil 53
Darwin, C. 11, 12
Dawsonites 70
deoksiribonukleinska kiselina 38
devon 63
Devonshire 63
Diadectes 86
Dickinsonia 48
Dicotyledoneae 72
dicrodium flora 92
difuzna (solarna) nebula 26
dijatomejski facijes 24
Dimetrodon 86
dinoŕlegelati 46
Dipnoi 69
Dipterus 69
doba 23
dropstone 50
Drumian 52
Dunkleosteus 68
dvodihalice 75
Dvor na Uni 96

E

Ediacara fauna 33, 48, 54
Ediakarij 43
Edmondia 100
Efremovka 26
Ektazij 43
Ems 64
endobentos 75

Eoarhaik 30
eon 23
Eoastrion 46
Eosphaera 46
Eoverbeekina salopeki 99
epibola 21
epoha 23
Equisetatae (preslice) 71, 83
era 23
Eryops 85
eukarioti 41, 42, 47
euramerijska (sjeverna) flora 91
eurihalini organizmi 24
euripteridi 66, 77
euritermni organizmi 24
Eusthenopteron 69
Euthacanthus 67

F

facijes 24
facijesni fosili 24
Famen 64, 75, 78
fanerozoik 23
faza diverzifikacije 58
faza dominacije 58
faza kolonizacije 58
faza stabilizacije 58
Fenosarmacija 32
feri ion 44
fero ion 44
Fig tree grupa 36, 37, 46
Filicatae (paprati) 71
filozona 22
fitoplankton 65, 80
Fizička geologija 6
Floian 53
"Flötzgebirge" 8
Fomitchella 54
foredeep basin 61
formacija 21
Fortunian 52
fotokemijske reakcije 28, 43
Fox, S.W. 39, 40
Fran 64, 75
Fusulina 82
fusulinide 96
fuzulinidne foraminifere 81, 82, 98

G

ganoidne ljuske 68
Gaskirs oledba 51
Gazhangian 52
Geike, A. 9
geokronologija 13
geokronološki sustav 21, 22, 23
geološka vremenska ljestvica 19, 20
georgij 53
glacijalni facijes 24
glacioeustatički rast morske razine 60
glavonošci 66
globigerinski facijes 24
Glossopteris 83
glossopteris flora 87, 91, 92
gmazovi 85, 86
golosjemenjače 71, 72, 84
Gondwana 60, 61, 63
Gorst 63
Gowganda formacija 50, 51
grafein 7
granični dolomiti 100
granuliti 34, 36
graptoliti 57, 65, 96
Great Oxygenation Event 50
greben 18, 25, 55, 58, 60, 63, 65, 66, 73, 75, 77, 78, 80, 81, 82, 90, 99, 100
gredenski pješčenjaci 98, 99
grinstoni 34, 35
Grinvil provincija 32
grupa 21
Guadalupe 80
Gunflintia 46
Gunflint formacija 46
Gželij 79
Gymnocodium bellerophontis 82, 99

H

hadij 23, 26
hadijska (prvotna) atmosfera 27
Halley, E. 14
Hallucigenia 56
Hangenberg događaj 75
hematit 44, 45
Hemicyclaspis 67
hercinidi 90
hercinska (variscička) orogeneza 90
hipertermofilni mikrobi 40

Hirnant 53
Historijska geologija 6
Homer 63
Homo sapiens 6
Hughmilleria 66
Hunsrück šejlovi 77
Hutton, J. 8
Hylonomus 85

I

Iapetus 60, 73
Ichthyostega 73
impakt 26, 88
indijski kraton 33
Inostrancevia 86
International Commission
on Stratigraphy 26
intervalna zona 22
Ivanščica 96
izotopi 15, 19

J

jezerski (lakustrički) facijes 24, 36, 50
ježinci 55, 58
Jiangshanian 52
Joly, J. 14

K

Kakabekia 46
kaledonidi 31, 74, 76, 91
kaledonska orogeneza 74, 76, 91
Kalimij 43
kambrij 52
kambrijska eksplozija života 57
Kapitanij 80
karbon 79
karbonati 35, 49, 60, 90, 99
Karoo naslage 86, 87, 91
Kasimovij 79
katastrofizam 10
Katian 53
Kellwaser događaj 75
kemijski fosili 38
kemosintetski mikrobi 41
Kenorland 49
kenozoik 24, 19, 23, 68
Kildinosphaera lophostriata 46

Kimberella 48
 kineska flora 91
 Kodeks stratigrafske nomenklature 21
 kohlenkalk 79
 komatit 29, 34
 konodonti 87, 89
 kontinentalna kora 29
 kopneni (terestrički) facijes 24
 koralji 55, 65, 66, 77, 80, 87
 kordaiti 84
 košna naslage 99
 kralježnjaci 63, 69, 85
 kraton 31
 kraton Konga 49, 59
 krinoidi 55, 57, 58, 66, 77, 81, 99
 Kriogenij 43, 51
 Kriptik 26
 kritosjemenjače 71, 72
 kronostratigrafski sustav 21
 konglomerati 32, 34, 36, 50, 95, 98, 99
 kukci 63, 84,
 kulm 79
 Kungurij 80

L

Ladlov 63
 Landooverij 63
 Lapworth, C. 52
Lapworthella 54
 Laurazija 90
 Laurencija 32, 49, 59, 60, 61, 62, 74, 76, 91
Lepidodendron 83, 91
 limnička ležišta ugljena 93
Linoproductus 97
 litostratigrafski sustav 21
 litotropi 41
 Logan, W. 30
 Lohkov 64
 Loping 80
 lord Kelvin 15
 Ludford 63
 Lycopodiatae (crvotočine) 71
 Lycopsidea 70, 83
 Lyell, C. 11
Lyngbya 46

M

magnetit 38, 44
 magnetobakterije 38
 mahovnjaci 80, 81
 malvinokafrička provincija 75
Marginifera 97
 Marija-gorička brda 96
 Marinoan oledba 51
 Marjumiid interval 61
Marrella 56
 maseni spektrometar 16
 Mauritanidi 90
 Medvednica 95
 Međunarodno povjerenstvo za stratigrafiju 20
Meganeura 84
 mekušci 77
 metoda "*fission tracks*" 19
 metoda kalij-argon 18
 metoda rubidij-stroncij 18
 metoda termoluminiscencije 19
 metoda ugljika 18
 metoda uran-olovo 18
 metoda uran-torij 18
 Mezoarhaik 30
 Mezoproterozoik 43
 mezozoik 23
 micijski (točkasti) dolomiti 100
 mikrosfere 40
 Miller, Stanley 39
 Mirovia 49
 Mississippian 79
Mizzia velebitana 99
Mizzia yabei 99
 mješoviti facijes 24
 močvarni facijes 24
 Monocotyledoneae 72
 Moodies grupa 36
 morene 25, 50, 62
 morski (marinski) facijes 24
 Moskovij 79
 Murchison, R. 52, 63, 79
 Murchison meteorit 40

N

nadplimni facijes 24
 nautilidi 55, 58, 66, 99
 Nektarij 26

nekton 24, 66, 67
Neoarhaik 30
Neoproterozoik 43
Neoschwagerina 82, 99
Neoschwagerina craticulifera 99
neošvagerinski dolomiti 100
neptunisti 8
Neuropteris 83
New Red Sandstone 95
novi crveni pješčenjak 95

O

oaze kisika 48
oceanska kora 29
Old Red Sandstone 73
Olenellus 53
Olenus 53
Onverwacht grupa 36
Opabinia 56
Ordovices, 52
ordovicij 52
organska juha 40
Orosirij 43
Osteichthyes 68
ostrakodermi 67, 68
Orthida 64
Oscillatoria 46
ostrakodi 55, 77
otočno gorje 95
Ouachita planine 90

P

padinski facijes 24
Paibian 52
Paleoarhaik 30
Paleoproterozoik 43
Paleotethys 89, 90
paleozoik 23
Pangea 45, 87, 88, 89, 90
Panotija 49, 59
Panthalassa 89
paprtnjače 70, 71, 83, 92
Papuk 95, 96
Paradoxides 53, 60
paralička ležišta ugljena 94
Parana bazen 75
Parvancorina 48
patagonijski štit 32

pelikosauria 86, 87
Pelomyxa palustris 42
pelud 71
Pelycosauria 86
Pennsylvanian 79
period 23
perm 79
Permocalculus fragilis 82, 100
Permocalculus tenellus 99
Phycodes pedum 53
Pikaia 56
Pilbara štit 33, 34, 36, 37
pirit 44
piritični pješčenjaci 98
Pisces 66, 67
pješčenjaci 26, 29, 33, 35, 36, 48, 49, 77, 96, 97, 98
Placodermi 68
plankton 24
platforma 31
Playfair, J. 9
Pleurotomaria 100
plimni facijes 24
plitkomorski (neritski) facijes 24
plutonisti 8
podplimni facijes 24
Pongola supergrupa 36, 37
Potsdamij 53
Požeška gora 95
Prag 64
praživi 47
prekambrij 30
Pridolij 63
princip biološke sukcesije 10, 13, 19
princip izvornog bočnog kontinuiteta 7
princip izvorne horizontalnosti 7
princip kosog presjecanja 11, 13
princip superpozicije 7
princip uklopaka 11, 13
princip uniformizma 9
Productidae 80
prokarioti 41
Prororichthofenia 80
protenoidi 39, 40
proterozoik (algonkij) 23, 30, 43
Protogondwana 49, 59
protokontinenti 34, 35
Protolaurazija 49, 59
Protolipidodendron 70
Prototethys 49, 60, 90

protozoa 42, 47
 provodni (vaskularni) sustav 70
 prvotna Zemljina hidrosfera 28
Pseudofusulina 82
 pseudomorfi 38
Pseudoschwagerina 82, 98
Pseudoschwagerina velebitica 98
 Psilophytatae 71
 Psunj 95
Pteraspis 67
 Pteridophyta 70
 Pteridospermae 72, 83
 Pterocephaliid interval 61
Pterygotus 66
 pustinski facijes 24
 puževi 64

R

Racij 43
 radioaktivnost 14, 15
 radiometrijska starost 15, 50
 Radlovački kompleks 96
 ramenonošci 55
 rasponska zona 21
 ratendorfski nivo 98, 99
red beds 45
 regresija 61, 89, 94
 relativna starost 13
 Reptilia 85
 resoperke 69, 75
Richthofenia 80
 ribe 63, 68, 73, 75, 77, 80, 84
 riječni (fluvijalni) facijes 24
 rodezijsko-transvalski štit 33
 Rodinija 49, 59
rotliegendes 95
 Roudij 80
 Rudan 63
Rugosofusulina alpina 98
Rhynia 70
Rhynia rožnjaci 72

S

Sakmarij 80
 Samoborska gora 96
 Sandbian 53
Schubertella kingi 98
Schwagerina 82

Sedgwick, Adam 52, 63
 Serpukovij 79
 sesilni bentos 24
 Sibirija 32, 49, 59, 90, 91, 94
 sibirska flora 91
 Sibirski kraton 32
 Siccar Point 76
 Siderij 43
Sigillaria 83, 91, 96
 silikatno trošenje 51
 silur 63
 sjemenka 71, 83, 84
 sjevernoamerički (laurencijski) kraton 31
 Sjevernoameričko povjerenstvo za stratigrafsku nomenklaturu 21
 Sjevernoamerički stratigrafski kodeks 21
 slatkovodni (limnički) facijes 24
 sloj 7
 Smith, William 10
 Snowball Earth 51
 spiljski facijes 24
 spore 58, 70, 71, 72
Spriggina 48
 spužve 48, 56, 58, 65
 srednjooceanski hrbat 35, 40, 44, 60
 Stage 2 52
 Stage 3 52
 Stage 4 52
 Stage 10 52
 standardni profil ili stratotip 19
 Stari crveni kontinent 76, 89, 90
 stari crveni pješčenjak 73, 74, 76
 Stariji Imbrij 26
 Staterij 43
 Stenij 43
 Steno, Nicolaus 7
Stenodictya lobata 84
 stenohalini organizmi 24
 stenotermni organizmi 24
 stratigrafija 7
 stratigrafska klasifikacija 21
 stratum 7
Streptococcus bakterija 40
 stromatoliti 33, 37, 45, 58
 stromatoporidi 58, 65, 66, 80
 Sturtijan oledba 51
 supergrupa 21

Š

šejlovi 8, 34, 35, 36, 56, 57, 77, 90, 96, 98, 99, 100
Šinvud 63
školjkaši 57, 64, 75, 77, 84, 97
štit 31

T

tabulostromni grebeni 65, 77, 78
takonska orogeneza 61, 62
Takonski otočni vulkanski luk 61
Takonski foreland bazen 61
tanzanijski štit 33
tektonoeustatički rast morske razine 60
Telih 63
terapsidi 86, 87
Therapsida 86
Thomson, William 15
tilit 50
tomotijski kat 53
Tonij 43
Trakaste željezovite naslage 33, 44, 45
Trans-Hudson orogen 49
transgresija 52, 60, 94
transkontinentalni luk 76
Tremadok 53
Tribrachidium 48
trilobiti 54, 57, 60, 64, 97
Triticites 82
Triticites pseudosimplex 98
Triticites pusillus 98
Triticites salopeki 98
triticitni pješčenjaci 98
tri zone tamnosivih vapnenaca 99
turbiditni facijes 24
Turne 79

U

"Übergangsgebirge" 8
ukrajinski štit 32
Ural 79, 90, 94, 95
"Urgebirge" 8

V

vagilni bentos 24

Vaalbara 49
varve 50
Velebit 82, 96, 98, 99
Vendij 43, 48
Venlok 63
Vertebrata 69, 73, 85
Vize 79
vrijeme poluraspada 16, 17, 18
vodozemci 69, 72, 73, 75, 85, 86
Vordij 80
vršna zona 22
Vuhiapingij 80

Z

zajednička biozona 21
zapadnoafrički štit 33
zechstein 92, 95
Zellia galathea 98
zvjezdače 55, 58

Ž

Žive 64

W

Waagenophyllum 100
Walchia 84, 92
Walcott, Charles 55
Wallace, Alfred Russel 12
Warrawoona grupa 37
Werner, Abraham 8
Whewell, William 9
Whittington, Harry 56
Witwatersrand supergrupa 34, 36, 45
Wopmay orogen 49
Wuliuan 52

Y

Yabeina syrtalis 100
Yellowknife 29
Yigarn štit 33