

EVOLUCIJA ATMOSFERE

Razmatranja teorija o tome kako su nastali atmosfera i oceani mora početi od same ideje kako je nastala sama Zemlja. Znanstvenici se danas uglavno slažu da su Terestrički planeti nastali zgušnjavanjem čvrstog materijala koji je nastao kondenzacijom iz Sunčeve maglice (nebule). Bilo koja *primarna atmosfera* (ako je uopće postojala) morala je nestati, na što ukazuju podatci značajnog osiromašenja rijetkih plinova u Zemljinoj atmosferi u usporedbi s kozmičkom zastupljenošću tih plinova.

Pri tim razmišljanjima posebnu pažnju treba posvetiti i tragovima plementih plinova - za Zemlju oni čine oko 1% ukupnog sadržaja svih plinovitih sastojaka atmosfere - jer su oni kemijski inertni što god se događalo u ciklusu elemenata u akvatičnom sustavu ili biosustavu. Njihova prisutnost u atmosferi Zemlje (ali i Venere i Marsa) može nam govoriti o evoluciji na isti način na koji, o evoluciji sedimenata, govore provodni fosili (neki autori stoga plemenite plinove, kad govore o genezi atmosfere i litosfere, nazivaju *plinovitim fosilima*).

Na početku evolucije Zemlje, nebula je morala imati ukupni kemijski sastav sličan kozmičkoj zastupljenosti tvari, ali oslobađanjem hlapljivih tvari iz očvrsljih malih tijela kemijski se je sastav *primarne atmosfere* postupno, i u skladu s time, mijenjao. Čak i u to vrijeme, zračne su se mase držale gravitacijom na rotirajućoj proto-Zemlji i cirkulacija primordijalne globalne atmosfere morala je dovesti do njezine fizičke stratifikacije i kemijske diferencijacije. Koliko i koje kemijske tvari su oslobođene u doba očvršćavanja Zemlje teško je procijeniti. Također je i dvojbeno što se je dogodilo s tim tvarima tada prisutnim u atmosferi.

Neki autori, (primjerice DEGENS) pretpostavljaju da je neki događaj u povijesti Zemlje (DEGENS ga naziva T-Tauri događaj) povezan s pojavom zvjezdanog vjetra moćnom snagom "otpuhao" ukupni sastav primordijalnih plinova iz primarne atmosfere zajedno s hlapljivim tvarima već stvorenim u toj vrlo ranoj fazi stvaranja proto-Zemlje. [toviše, sasvim je moguće da su neki od teških plinova "preživjeli" taj događaj i postali dio sastava novorazvijene *sekundarne atmosfere* koja se počela razvijati prije oko 4 milijarde godine da bi postala zrak koji mi danas udišemo.

Zemlja je izgubila mnoge (i mnogo od) njezinih lakih elemenata - vodika, ugljika i dušika - ali i zadržala najveći dio plementih plinova sadržanih u primitivnoj Sunčevoj nebuli - neon, argon-36, kripton i ksenon. Kako su i drugi terestički planeti bili podvrgnuti "istoj proceduri", usporedba sa sadržajem plementih plinova u atmosferi Venere, Marsa i Zemlje važan je i koristan postupak.

Zbog svoje inertnosti, plementi plinovi, s mogućim izuzetkom ksenona, ne pokazuju afinitet prema stijenama Zemljine kore; ustvari samo ksenon može tvoriti slabe veze s nekim mineralima. Najlakši od njih, helij, može lako odlaziti u svemirski prostor (o čemu je bilo govora ranije), dok ostali - osim moguće djelomičnog gubitka za vrijeme pretpostavljenog T-Tauri događaja - nisu imali šanse nestati iz atmosfere Zemlje. Na taj je način, današnji sadržaj helija u Zemljinoj atmosferi mjera vremena zadržavanja helija. Svi ostali se konzervativno akumuliraju u atmosferi kroz cijelu povijest nastanka Zemlje.

Teški plemeniti plinovi su, prema tome, dijelom ostatci primarne atmosfere, a dijelom su produkti otplinjavanja matičnog tijela. Neki autori čak smatraju da srazovi planetezimala mogu dovesti do erozije atmosfere, što najjednostavnije znači do gubitka atmosfere. Međutim, kao i sve takve procese te je impakte na kemiju atmosfere, naravno, teško kvantificirati, iako je nedvojbeno da su mogući rezultati takvih događaja za Mars, Veneru i Zemlju različiti.

Bez obzira koja je od teorija točna, nedvojbeno je da neradioaktivni plemeniti metali predstavljaju važnu sponu u razumijevanju rane povijesti terestičkih planeta.

A kakva je vremenska veza postanka atmosfere i postanka života na Zemlji ?

Teško bombardiranje završilo je prije oko 3,8 Ggod; život je vjerojatno započeo prije oko 3,5 Ggod, što indiciraju mikrofosili i stromatoliti u nađenim najstarijim sedimentima. Relativno uski vremenski međuprostor između ta dva vremena najvjerojatnije odgovara vremenu potrebnom za početak razvoja života. Prije 3,8 Ggod, najgornji sloj oceana vjerojatno je bio u više navrata evaporiran velikim sudarima. Srazna tijela u promjeru veća od 440 km mogla su evaporirati cijeli ocean, sterilizirajući planet osim, moguće, bakterija koje su živjele u sedimentima ili podmorskim hidrotermalnim sustavima. Događaji te veličine bili su mogući prije 3,8 Ggod, a vjerojatniji prije od oko 4,2 Ggod. Prema tome, iako je život mogao nastajati nekoliko puta za vrijeme prvog dijela Zemljine povijesti, on se vjerojatno nije održao sve do kraja perioda bombardiranja.

Bilo bi interesantno znati kakav je bio sastav atmosfere prije oko 3,8 Ggod jer, barem neke od teorija, pretpostavljaju značajnu ulogu atmosfere u nastanku života na Zemlji. Prije oko 40 godina Miller-Ureyjev eksperiment je pokazao da su mnogi biološki važni organski spojevi, uključujući šećere i aminokiseline, mogli nastati pri izbijanju na principu iskre (simulirani efekt djelovanja svjetlosti) u nekoj $CH_4 - NH_3 - H_2 - H_2O$ atmosferi. Uzastopne reakcije između tih spojeva mogu, u osnovi, dati živu tvar. Međutim, nije sigurno da su CH_4 i NH_3 bili prisutni u atmosferi rane povijesti Zemlje.

Prema tome, eventualna prisutnost CH_4 i NH_3 u primitivnoj atmosferi ovisi i tome je li se oksidacijsko stanje gornjeg plašta mijenjalo s vremenom.

Odgovor na pitanje je li se oksidacijsko stanje plašta mijenjalo nije jednostavno jer se magmatske stijene po svom nastanku obično vrlo brzo i naglo oksidiraju. Ipak treba napomenuti da podatci dijamantnih inkluzija pokazuju da je, barem dio plašta nekad bio reducirani. Plašt se je mogao postupno oksidirati recikliranjem vode s površine uz vulkansko otplinjavanje vodika. Međutim proces kojim bi se plašt doveo u današnje oksidacijsko stanje zahtijeva stotine milijuna do milijardi godina. Prema tome, vrlo je hrabro i najvjerojatnije netočno, u doba nastanka života na Zemlji, pretpostaviti postojanje vulkanskih izvora redukativnih plinova. U odsutnosti vulkanskog izvora metana i amonijaka, u atmosferi nakon perioda bombardiranja vjerojatno su dominirali CO_2 i N_2 , s tragovima CO , H_2 i reduciranih sumpornih plinova. Atmosfera tog sastava obično se označava kao *slabo redukativna atmosfera*.

Drugi veliki problem je problem evolucije kisika koji je paralelan s nastankom života. Danas je najočitija posljedica biološke aktivnosti visoki parcijalni tlak kisika današnje atmosfere. Odavno je poznato da je proces fotosinteze, praćen razgradnjom organskog ugljika, najveći izvor Zemaljskog kisika. Prebiotski nivo koncentracije (parcijalnog pritiska) kisika bio je vrlo nizak, dijelom i zbog toga što nije bilo volumetrijski značajnog izvora kisika prije pojave procesa fotosinteze, ali i dijelom jer su korna i atmosferska odlagališta kisika bila brojna. Disocijacija H_2O kao posljedica djelovanja Sunčeva UV zračenja (*fotodisocijacija vodene pare*), praćena "bijegom" vodika u međuplanetarni prostor, mogla je proizvesti mali ali kontinuirani donos kisika u gornje dijelove atmosfere. Međutim, molekularni kisik mogao je relativno lagano biti iskorišten u povratnoj reakciji s H_2 , pa veći dio, tako nastalog kisika nije ni morao dosegnuti površinu Zemlje.

Odgovor na pitanje kada je počela rasti koncentracija (parcijalni tlak) kisika tijekom evolucije Zemlje i njezine atmosfere treba potražiti u geološkim podacima. Fosilni dokazi koji bi nam mogli reći kada je započeo razvoj zelenih biljaka, a time i fotosinteze vrlo su dvosmisleni. Stromatoliti, nalik modernim algalnim tepisima, produktima plavo-zelenih alga, pronađeni su u stijenama starim gotovo 3 Ggod. (primjerice, nalaz jezerskih stromatolita starih 2,7 Ggod. u Tumbiana formaciji u zapadnoj Australiji). Međutim najstariji od njih mogli su nastati i djelovanjem fotosintetskih bakterija koje upotrebljavaju reducirane spojeve, kao što je to primjerice H_2S i tiosulfat, a ne H_2O , kao donor elektrona (vidi poglavlje 9.5.1.). U svim mogućim slučajevima, prijelaz u fotosintezu zelenih biljaka bio je vrlo postupan, jer su rani organizmi morali razviti encimatske mehanizme da se zaštite od slobodnog kisika. Pretpostavlja se da su ti prijelazi bili aktivni prije oko 2,5 Ggodina.

Ali vratimo se mi geološkim dokazima o porastu nivoa kisika u atmosferi Zemlje. Prve pojave tzv. *crvenih naslaga ("red beds")*, ležišta nastalih u oksičnih uvjetima, vezuju se za vrijeme prije oko 2 Ggod., dok su ležišta bogata *detritičnim piritom i uraninitom*, tj. ležišta nastala u anoksičnim uvjetima, najvećim dijelom nastala prije tog vremena. Ti su minerali uglavnom oksidirani u uvjetima trošenja pod visokim parcijalnim tlakom kisika u današnjoj atmosferi. Nadalje, geološki dokazi govore da su *slojevite formacije ležišta željeza ("banded iron formations" - BIFs)* nastajale sve do oko 1,85 Ggod., ali ne i nakon toga. Pretpostavlja se da taloženje tih formacija zahtijeva anoksične uvjete dubokog oceana koji bi omogućili dugi transport željeza u topljivoj formi fero-iona. Bez obzira je li fero-ion u oceanima bio uzrok ili popratni efekt niskog atmosferskog pritiska O₂, jasno je da je O₂ bio sasvim podređen sastojak u atmosferi sve dotle dok je duboki ocean bio anoksičan. Tek nakon što je donos kisika do oceanskog dna postao dovoljan da iscrpi (oksidira) pohranilište Fe²⁺, postalo je moguće da parcijalni pritisak molekularnog kisika počne rasti do današnje razine. Prema tome, povijest taloženja uslojenih formacija ležišta željeza je iznimno značajan dokaz prijelaza u kisikom bogatu atmosferu. **Ovi nam pokazatelji govore da je do porasta razine kisika u atmosferi došlo, ako sumiramo pretpostavke više autora, između 2 i 1,9 Ggod (milijardi godina).**

U zaključku možemo reći da se evolucija atmosfere može promatrati u odnosu prema sljedećim faktorima:

- 1. Sastavu praatmosfere,**
- 2. Dodacima tijekom geološke prošlosti,i**
- 3. Gubitcima tijekom geološke prošlosti.**

O pretpostavljenom sastavu praatmosfere već smo govorili, a ovdje ćemo samo sumirati naše zaključke o dodacima i gubitcima u atmosferi za vrijeme geološke prošlosti.

Dodatci atmosferi tijekom geološke prošlosti mogu se promatrati u odnosu prema glavnim izvorima prinosa atmosferi koji bi bili :

- 1) plinovi oslobođeni kristalizacijom magmi;*
- 2) kisik nastao fotokemijskom disocijacijom vodene pare;*
- 3) kisik nastao procesom fotosinteze;*
- 4) helij od radioaktivnog raspada urana i torija; i*
- 5) argon od radioaktivnog raspada kalija.*

Atmosferski gubitci tijekom geološke prošlosti mogu se sumirati, kao :

1) Gubitci kisika kao posljedica oksidacijskih procesa uključujući i tvorbu vode,

2) Gubitci ugljikovog dioksida kao posljedica nastanka ugljena, nafte i uključivanje u organsku tvar sadržanu u sedimentima;

3) Gubitci ugljikovog dioksida kao posljedica nastanka kalcijskih i magnezijских karbonata;

4) Gubitci dušika kao posljedica stvaranja oksida dušika u zraku i aktivnosti nitratnih bakterija u tlu; i

5) Gubitci vodika i helija iz gravitacijskog polja Zemlje.

Iako mnogi detalji iz evolucije Zemljine atmosfere nisu do kraja riješeni, opća je slika manje više jasna. Nastanak atmosfere koja sadrži N_2 i CO_2 te ocean s H_2O čini se da je vezan i prirodna posljedica planetarnog očvršćivanja u područjima terestičkih planeta. Slabo reducirana *primitivna (primarna, praatmosfera, proto - atmosfera)* predstavlja pogodan okoliš za nastanak i održanje života, bez obzira jesu li važni biološki izvorišni pramaterijali i spojevi sintetizirani tu ili su došli na Zemlju izvana. Količinski, atmosferski kisik je prirodno rastao, ali ne odmah po nastanku Zemlje, fotosintezom i razgradnjom organske tvari. U isto vrijeme koncentracije CO_2 i drugih plinova "staklenika" opadaju tako da kompenziraju efekt sjajnosti Sunca. Relativna stabilna klima kroz Zemljinu povijest rezultat je negativnog feedbacka između atmosferskog CO_2 , površinske temperature i brzine trošenja silikatnih stijena.