

VILNIAUS UNIVERSITETAS
EKOLOGIJOS IR APLINKOTYROS CENTRAS

Kristina Gudaitytė

**Galima organinės medžiagos kaupimosi įtaka atmosferos
evoliucijai (egzistuojančių modelių aptarimas)**

Magistro darbas
(Ekologija)

Mokslinis vadovas: Prof. habil. dr. E. Lekevičius

VILNIUS,
2007

TURINYS

ĮVADAS.....	3
TIKSLAS IR UŽDAVINIAI.....	5
1. ŽEMĖS ATMOSFEROS FORMAVIMASIS.....	6
1.1 Pirminė ir antrinė Žemės atmosfera.....	6
1.2 Abiotinė deguonies kilmė.....	8
2. GYVŪJŲ ORGANIZMŲ EVOLIUCIJOS POVEIKIS ATMOSFERAI.....	10
2.1. Anoksigeninės fotosintezės atsiradimas.....	10
2.2. Hidrosferos gyvųjų organizmų poveikis atmosferai.....	11
2.3. Oksigeninės fotosintezės atsiradimas.....	12
2.4. Augalų evoliucija sausumoje.....	16
2.4.1. Lignino įtaka biomasės augimui ir organinės medžiagos kaupimuisi.....	17
2.4.2. Sumedėjusių augalų įtaka biomasės augimui ir organinės medžiagos kaupimuisi.....	18
2.4.3. Bioįvairovės įtaka biomasės augimui ir organinės medžiagos kaupimuisi.....	25
2.4.4. Simbiozinės sąveikos.....	27
2.5. Jūrų produktyvumo įtaka biomasės augimui ir organinės medžiagos kaupimuisi.....	28
3. ORGANINĖS MEDŽIAGOS RYŠYS SU ATMOSFEROS DUJŲ KIEKIO POKYČIU ³⁰	
4. ATMOSFEROS EVOLIUCIJOS MODELIAI.....	35
4.1 Duomenų informacijos netikslumai.....	47
4.2 Problemos susijusios su modelių kūrimu.....	48
5. DABARTINĖ ŽEMĖS ATMOSFERA.....	51
6. DARBO METODIKA.....	53
APIBENDRINIMAS.....	54
IŠVADOS.....	56
SANTRAUKA.....	57
SUMMARY.....	58
LITERATŪRA.....	59

ĮVADAS

Spėjimai apie ankstyvąją Žemės atmosferos sudėtį ir klimatą tęsiasi apie 30 metų, bet daug neaiškumų lieka iki šiol. Dažniausiai sutariama dėl to, jog iš pradžių, prieš atsirandant gyvybei, atmosferoje buvo labai mažas kiekis deguonies arba tuo metu išvis jo atmosferoje nebūta. Taip pat, kad deguonies koncentracijos sparčiai keitėsi prieš ~ 2 mlrd. metų. Nesutariama tik dėl tikslaus laiko, kada deguonies lygis atmosferoje pradėjo augti, ir sąlygų šiam procesui vykti.

Deguonies kaupimasis atmosferoje dažniausiai siejamas su oksigeninės fotosintezės ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2$) atsiradimu ir gyvybės evoliucija Žemėje. Vos atsiradę patys pirmieji organizmai suskubo augti ir daugintis. Ekosistemos ir visos biosferos biomasės didėjimas buvo viena iš ryškiausių evoliucijos tendencijų. Šis procesas turėjo paskatinti detrito bei organinės kilmės naudingųjų iškasenų kaupimąsi. Kad tokio biomasės didėjimo ir organinės medžiagos kaupimosi Žemės istorijoje tikrai būta, šiuo metu įrodo eksploatuojami dideli organinės kilmės naudingųjų iškasenų kiekiai. Remiantis oksigeninės fotosintezės lygtimi galima teigti, jog kartu su biosferos biomase turėjo didėti ir deguonies kiekis aplinkoje, o tuo tarpu anglies dioksido kiekis turėjo mažėti. Daugelis specialistų mano, jog šią atvirkštinę koreliaciją lėmė biosfera. Iki šiol nėra aišku, ar organinės anglies laidojimo greitis buvo priežastis ar rezultatas deguonies kiekio augimo atmosferoje. Šiuo metu dažniausiai sutinkama hipotezė, kad visas ar beveik visas dabartinis deguonis, esantis surištos ir laisvos būsenos, tikriausiai yra biogeninės kilmės. Tačiau ne visi specialistai pritaria, kad biosfera įtakojo anglies dioksido ir deguonies kiekį atmosferoje. Dalis mokslininkų svarbiausią reikšmę skiria neorganiniams ir geocheminiams veiksniams, kurie, jų nuomone, lemia anglies dioksido pokyčius bei globalių temperatūrų reguliavimą.

Vis dar neaišku, kokia buvo pirminė atmosfera, abejojama, kokios tiksliai dujos sudarė antrinę atmosferą, koku santykiu jos vyravo. Taip pat modeliai, kurie sukurti deguonies ir anglies dioksido kiekiui atmosferoje palyginti ar apskaičiuoti, nėra visiškai tikslūs. Jie dažniausiai būna spekuliatyvūs ir netinkami geologinio laiko atmosferai apibūdinti. Daugelis modeliutojų pabrėžia vieną ar kelis kriterijus, pagal kuriuos apskaičiuoja atmosferos anglies dioksido kiekio pokytį, tačiau neatsižvelgia į daugelį kitų, anglies dioksido kiekį įtakančių veiksnių. Taip atsitinka nesutariant ar veiksnyms tikrai įtakojo anglies dioksido kiekį atmosferoje ir kokį jis poveikį turėjo šių dujų koncentracijoms.. Šiuo metu svarbu išsiaiškinti, ar didėjo deguonies kiekis epochoje, kai didelis anglies kiekis buvo "paimtas" iš apykaitos rato ir sudarė anglies ir naftos sluoksnius, ar kito jis vystantis augalijai ir gyvūnijai, fitoplanktono vešėjimo ir išmirimo periodais. Supratimas apie bendrą deguonies ir anglies dioksido apykaitą biosferoje priklausys

nuo to, kaip gerai biosfera, atmosfera, hidrosfera ir litosfera bus susieta į visumą per visą Žemės geologinį laiką.

DARBO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Darbo tikslas – aptarti literatūros duomenis apie tai, kaip atmosferos sudėčiai galėjo atsiliepti evoliucijos eigoje stebimas suminės biomasės, detrito ir organinės kilmės naudingųjų iškasenų kaupimasis.

Darbo uždaviniai:

1. Apibendrinti priežastis, lėmusias biomasės, detrito ir organinės kilmės naudingųjų iškasenų kaupimąsi;
2. Apibūdinti organinės medžiagos kaupimosi įtaką atmosferos evoliucijai;
3. Aptarti egzistuojančius atmosferos evoliucijos modelius ir jų kūrimo problemas.

1. Žemės atmosferos formavimasis

1.1 Pirminė ir antrinė Žemės atmosfera

Pirminė atmosfera susidarė iš dujų, t.y. iš pirminio ūko. Pirminis ūkas – tai dujų debesys ir dulkės iš kurių susidarė visa Saulės sistema (mūsų visata). Manoma, jog ta atmosfera buvo turtinga tokiais elementais kaip vandenilis (H_2) ir helis (He), remiantis tuo, kad šie elementai labiausiai paplitę visatoje. [17, 23]

Ne visi specialistai sutaria dėl pirminės atmosferos egzistavimo. M. Шидловски mano, jog tik susidariusi Žemė neturėjo savo nuosavo dujų dangalo, o senoji atmosfera turėjo būti antriniu degazacijos produktu, išskiriamu iš mantijos naujai susidariusioje planetoje.

Manoma, kad Žemė formavosi palyginti lėtai, o jos viduje buvo šalta. Tokios sąlygos lėmė, kad Žemė tapo originaliais dujų „spąstais“. Laikui einant Žemės vidus išilo dėl radioaktyvių izotopų skilimo metu išsiskiriančios šilumos. „Spąstuose pagautos“ dujos buvo palaipsniui išlaisvinamos iš Žemės gelmių vykstant vulkanų išsiveržimams. Tokiu būdu pasišalinę dujos suformavo planetos antrinę atmosferą. [17, 23]

Šios vulkaninės dujos buvo redukuotos ir savo sudėtyje turėjo vandenilio, metano ir amoniako. [17]

Metanas (CH_4) ir amoniakas (NH_3) suskaidomi UV spindulių į mažesnius fragmentus. Fragmentai oksiduojasi ir susidaro vandens garai, kurie tuoj pat UV spindulių suskaidomi. Iš pradžių Žemės atmosferą sudarė vanduo, mažas kiekis vandenilio ir keletas vandenilio turinčių junginių. Dėl UV, žaibavimo, vietinių šilumos šaltinių veiklos pasigamino įvairūs ir svarbūs gyvosioms sistemoms junginiai. Žemėje kieto paviršiaus buvimas leido formuotis pastovioms mikro aplinkoms, kuriose susikoncentruodavo junginiai ir galėjo toliau vykti cheminės reakcijos. Manoma, jog kaip tik dėl šios priežasties galėjo pradėti vystytis Žemėje gyvybė. [23]

R. P. Wayne savo veikalė teigia, jog atmosferoje esantis vanduo ir anglies monoksidas (CO), arba anglies dioksidas (CO_2), fotochemijos reakcijų metu galėjo produkuoti organinę medžiagą (HCHO), kuri galėjo būti pirmtaku gyvų organizmų vystymuisi. [35]

Anglies dioksido, vandenilio sulfido ar vandenilio tais laikais aplinkoje greičiausiai būta gana daug. Šias dujas išskirdavo ugnikalniai. [20, 21]

Atmosferoje deguonies visiškai nebuvo arba jo buvo tik pėdsakai, tad atkeliavę iš kosmoso didesni ir mažesni dangaus kūnai nekliudomi pasiekdavo planetos paviršių, palikdami jos kūne

sunkiai beužsitraukiančias žaizdas. Ultravioletinis spinduliavimas, pasiekiantis planetos paviršių, buvo kur kas intensyvesnis, nes tais laikais ozono skydo dar nebuvo. [20, 21]

J. F. Kasting teigia, kad UV filtro funkciją galėjo atlikti CH_2 , kuris susidarydavo iš metano (CH_4) fotolizės metu. [14].

P. E. Cloud mano, jog prieš atsirandant ozonui (O_3), alternatyvus atmosferos UV filtras greičiausiai buvo S_8 , kuris susidarydavo iš SO_2 arba H_2S fotolizės metu. [18]

Lyginant su mūsų dabartinėmis žiniomis apie kitų planetų atmosferą, dujinis Žemės apvalkalas yra vienintelis ir unikalus Saulės sistemoje. Kas gi lėmė šį unikalumą? [32]

Šiuo metu tiriamos planetos gali būti mums kaip natūralios laboratorijos, kuriose įmanoma atlikinėti tyrimus, norint sužinoti apie atmosferos ir gyvybės atsiradimą bei raidą. Tokius tyrimus leidžia atlikti esantys panašumai tarp Žemės ir tiriamųjų planetų ankstyvosios istorijos. Šiuo metu tose planetose esančios sąlygos yra tokios, kokios buvo, kai primityvi Žemės atmosfera davė pradžią vystytis gyvybei. Atmosfera planetoje yra būtina sąlyga gyvybei egzistuoti. Sunku įsivaizduoti gyvybės egzistavimą planetoje be deguonies. Tai gali patvirtinti ir Marso (su labai išretėjusia atmosfera) bei atmosferos neturinčio Mėnulio tyrimų duomenys. Tiriant mūsų artimiausias kaimynes (Marsą ir Venerą) Saulės sistemoje, galime pamatyti, jog jų ankstyvosios egzistavimo istorijos labai panašios į mūsų Žemės. Kyla klausimas – tai kodėl jos dabar taip skiriasi nuo mūsų? Abi šios planetos turėjo atmosferą, kurių paviršiuje dominavo tokios dujos kaip anglies dioksidas ir vandens garai. Veneroje atmosfera yra labai tanki, todėl jos paviršius intensyviai sugeria infraraudonuosius spindulius. Dėl to šiai planetai būdingas stiprus ir didelis „Šiltnamio efektas“. Kas lemia aukštą Veneros paviršiaus temperatūrą (475°C). Marse priešingai atmosfera labai reta, todėl planetos paviršius nėra iššildomas, o slėgis yra toks žemas, kad vanduo negali egzistuoti skystame pavidale. Galime padaryti išvadą, jog Marsas per daug šaltas, o Venera per daug karšta, kad ten egzistuotų gyvybė. Jei Žemę pritrauktume arčiau Saulės tokiu pat atstumu kokiu yra Venera, tai Žemėje pakiltų vidutinės metinės temperatūros, o vandenynai iššiltų, išgarindami didelį kiekį vandens į atmosferą. Planeta būtų apgaubta vandens garais, kurie labai padidina infraraudonųjų spindulių sugėrimą. Tai lemtų dar spartesnę temperatūrų kilimą, kol galų gale visas planetoje esantis vanduo išgaruotų. Visas vanduo būtų atmosferoje. Šioje stadijoje UV suskaidytų vandenį. To pasekoje vandenilis išlėktų į visatą, o deguonis jungtųsi su kitomis dujomis ir uolienomis. Galima daryti išvadą, jog Venera per daug arti Saulės, todėl ji tokia nepanaši į mūsų Žemę. [23]

Jeigu mes Žemę atitrauktume toliau nuo Saulės (atstumu kaip Marsas), tai kas tada atsitiktų su mūsų planeta? Ši situacija dar nėra visai aiški. Mes galime spėti, jog pasireikštų „šaldytuvo efektas“. Tai reiškia, kad vidutinės metinės temperatūros žemėtų, susidarytų daugiau sniego, ledynų. Dėl šios priežasties padidėtų atmosferos atsispindėjimas, o vidutinės temperatūros

žemėtų toliau. Remiantis duomenimis, galime teigti, jog ankstesnė Marso atmosfera tikriausiai buvo tankesnė, nei dabartinė. Apie tai sprendžiame pagal vandens „pėdsakus“ Marse. Marso paviršiuje matyti akivaizdžios tekėjusio vandens žymės. Vėl kyla klausimas – tai kodėl Marsas taip pasikeitė ir dabar neturi vandens? Tikriausiai taip atsitiko dėl jo mažo dydžio. Jei jis būtų didesnis, turbūt situacija būtų kitokia. Iš artimiausių Žemei keturių planetų tik ji vienintelė turi reikiamą atstumą nuo Saulės ir tinkamą dydį (Žemė nėra per didelė, kas neleido vandeniliui „pabėgti“ dėl stipraus šios planetos gravitacinio lauko), tai ir lėmė gyvybės atsiradimą Žemėje bei unikalią atmosferą. [23]

Jau galima atsakyti į klausimą, kodėl Žemė vienintelė planeta Saulės sistemoje su tokia gausia gyvybe ir specifine atmosfera. Viena iš priežasčių, tai cheminio elemento anglies ir skysto vandens buvimas. Taip pat kietas planetos paviršius ant kurio gali kauptis skystas vanduo. Tai ypač svarbi sąlyga, nes tokiuose vandens telkiniuose gali vykti įvairios cheminės reakcijos. [2]

1.2 Abiotinė deguonies kilmė

Dėl žymaus deguonies trūkumo litosferoje, Žemės pluta ir mantija negalėjo degazacijos proceso metu teikti atmosferai ir vandenynui molekulinį deguonį. Čia susiduriame su negeologiniu deguonies šaltiniu. Labiausiai atitinkantį energijos šaltinį tokiems procesams užtikrina Saulės radiacija. Laisvas deguonis (O_2), esantis atmosferoje turi būti fotocheminio efekto pasekmė (neorganinis fotocheminis efektas). Deguonis gali būti pagaminamas abiotiškai, t.y. fotodisociacijos metu iš vandens, atpalaiduojant vandenilį į kosmosą. Šis procesas sąlygojamas vandens garų fotolizės aukštutinėje atmosferoje, po kurio seka gravitacinė reakcijos produktų seperacija. Galutinis šių reakcijų rezultatas nusakomas atsilaisvinusio vandenilio „nutekėjimu“ iš gravitacinio lauko. Kai tik vandenilis pasiekia apie 100 km aukštį, jo naujų junginių susidarymo procesai tampa mažai įmanomi (dėl pernelyg žemo atmosferos tankio) ir proporcingai išauga galimybė jam nutekėti. Įrodyta, kad šie neorganiniai deguonies susidarymo procesai pasibaigs esant tam tikrai tolygiai deguonies koncentracijai. [32]

Vandens garų fotodisociacija galėjo gaminti didelį kiekį deguonies tose planetose, kur vyko nesulaikomas „šiltnamio efektas“, bet nėra tikėtina, jog Žemėje vyko šis procesas. Mūsų planetoje laisvas deguonis reaguodavo su redukuota medžiaga. Tačiau nėra įvertinti didžiuliai deguonies kiekiai, kurie „surišti“ į Žemės plutos rezervuarą, kur jis įeina į sulfatų ar trivalentės geležies oksidų sudėtį. [23]

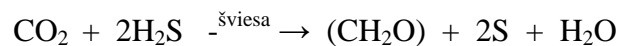
Vis dėlto daugelis specialistų, tarp jų ir R. P. Wayne, nuomonės, jog beveik visas atmosferos deguonis yra susidaręs fotosintezės metu, o neorganinė fotochemija daugiausiai gali pagaminti deguonies tik 10^{-9} dabartinio atmosferos lygio. [35]

Tuo labiau, kad yra pakankamai priežasčių manyti, jog pirminė Žemės atmosfera pagal sudėtį nesiskyrė ypatingai nuo kaimyninių planetų atmosferos, o dabartinė atmosfera turi būti evoliucijos rezultatas, kuris prasidėjo drauge su planetos susidarymu prieš 4, 5 mlrd. metų ir tęsėsi didesnę jos geologinės istorijos dalį. Dabar priimta laikyti, kad ši evoliucija daugiausiai priklausė nuo Žemės biosferos vystymosi, kuri turėjo svarbų poveikį neorganinei aplinkai. [32]

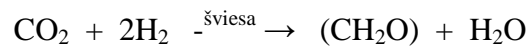
2. Gyvųjų organizmų evoliucijos poveikis atmosferai

2.1 Anoksigeninės fotosintezės atsiradimas

Prieš maždaug 3, 6 mlrd. metų Žemėje pasirodė žaliosios ir purpurinės bakterijos. Jos vykdė anoksigeninę fotosintezę (energijos šaltinis šviesa, vandenilio (elektronų) bei anglies – neorganinės medžiagos, t. y. vandenilio sulfidas ir molekulinis vandenilis):



arba



Šių reakcijų metu išsiskiria siera ir sulfatai. Tokiu būdu šių medžiagų kiekis pradėjo didėti to meto atmosferoje. Tokio tipo fotosintezėms reikalingų medžiagų – anglies dioksido, vandenilio sulfido ar vandenilio aplinkoje būta gana daug. Šias dujas išskirdavo ugnikalniai, be to, jos susidarydavo fermentacijos (rūgimo) metu. Susidariusi organinė medžiaga buvo panaudojama ekosisteminiame katabolizme ir detrito susidarymui. [20, 21]

Kam nors gali susidaryti klaidinantis įspūdis, kad tais tolimesiais laikais ekosistemos būseną buvo stacionari: kiek neorganinių medžiagų per laiko vienetą buvo paverčiama organinėmis, tiek jų buvo grąžinama dėl ekosisteminiame katabolizme. Tai būtų ne visai išsamus vaizdas, tik daugmaž teisingas ekologinio ir visai nekorektiškas evoliucinio laiko skalėje. Jau patys pirmieji organizmai, vos atsiradę, suskubo augti ir daugintis. Ekosistemos ir visos biosferos biomasės didėjimas, atrodo, buvo viena iš ryškiausių evoliucijos tendencijų. O tai reikštų, kad vos tik atsiradusi gyvybė pradėjo keisti savo aplinką, mažindama vienu medžiagų kiekį ir didindama kitų. Užtenka žvilgtelėti į anoksigeninės fotosintezės bei ekosisteminiame anabolizme ir katabolizme lygtis, kad suvoktume, jog kaupiantis biomasei neišvengiamai aplinkoje turėjo mažėti biogenų – CO_2 , NH_3 , H_2 , H_2S , - kiekis. Tokią pat tendenciją turėjo paskatinti ir detrito bei organinės kilmės naudingųjų iškasenų kaupimasis, aišku, jei tokio kaupimosi apskritai būta. Didėjant organinių medžiagų kiekiui, aplinkoje turėjo kauptis taip pat siera bei sulfatai. [20, 21]

2.2 Hidrosferos gyvųjų organizmų poveikis atmosferai

Pačioje žemiškosios gyvybės aušroje vandenynų vandens cheminę sudėtį lėmė procesai, vykstantys litosferoje ir atmosferoje. Tačiau vėliau, atsiradus ir išplitus gyvybei – o tai įvyko, kaip manoma, pirmiausia vandenyne – hidrosfera išsivadavo iš besąlygiškos priklausomybės nuo kitų dviejų negyvų Žemės sferų, ir poveikis ėgijo priešingą kryptį: hidrosferoje vykstanti gyvybės plėtra nulėmė tolesnę ir atmosferos, ir litosferos raidą. [20, 21]

1 Lentelė. Gyvybės poveikis vandenynų vandens cheminei sudėčiai per visą evoliucijos laikotarpį. [20]

Eil. Nr.	Parametras	Mažėjo ar didėjo	Pagrindiniai mechanizmai
1.	Rūgštingumas ir ištirpusio CO ₂ koncentracija	Mažėjo	Vulkanų veiklos silpnėjimas; karbonatizacija ir kalcifikacija; CO ₂ asimiliacija (fotosintezė ir chemosintezė)
2.	Ištirpusio O ₂ koncentracija	Didėjo	Oksigeninė fotosintezė
3.	Ištirpusio H ₂ S koncentracija	Mažėjo	Vulkanų veiklos silpnėjimas; anoksigeninė fotosintezė; chemosintezė (bespalvės sierabakterės); abiotinė reakcija su O ₂
4.	Fe ²⁺ koncentracija	Mažėjo	Abiotinė reakcija su laisvu O ₂ ; chemosintezė (gelžbakterės)
5.	Ca kiekis	Didėjo (pradinėse stadijose), po to mažėjo	Išplovimas iš žemynų; vėliau kalcifikacija
6.	Si kiekis	Didėjo (pradinėse stadijose), po to mažėjo	Išplovimas iš žemynų; vėliau biologinė inkrustacija
7.	NH ₄ ⁻	Mažėjo	Vulkanų veiklos silpnėjimas, biologinė asimiliacija; reakcija su laisvu O ₂ ; nitrifikacija
8.	PO ₄ ³⁻	Didėjo (pradinėse stadijose), po to mažėjo	Išplovimas iš žemynų; vėliau biologinė asimiliacija ir panaudojimas skeletams

Lentelėje pateikiamos išvados yra hipotetinio pobūdžio, nes vandenynų cheminės sudėties evoliucijos klausimai yra tokie painūs, kad jiems reikiamai išnarplioti prireiks dar nemažai šios srities specialistų. [20, 21]

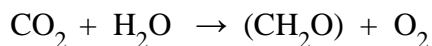
Kažkada, prieš 4 – 3, 5 mlrd. metų, vandens telkinių vanduo buvo gerokai rūgštesnis nei vėlesnėse epochose. Tai aiškinama didesniu atmosferinio CO₂ kiekiu vandenyje, bei kai kurių rūgščių garų (pvz., HCl) išmetimu iš vulkanų. Vėliau vulkanų veikla silpnėjo, o vandenyne

prasidėjo kai kurie procesai galėję sumažinti CO₂ kiekį aplinkoje, t. y. fotosintetikai paimdavo iš vandens anglies dioksidą ir asimiliuodavo jį, taip mažindami vandens rūgštingumą, o terpei pašarmėjus, bikarbonatai pasižymi tendencija virsti netirpiais karbonatais, daugiausia kalcio karbonatais, kurie iškrinta į nuosėdas. Taigi jau gyvybės aušroje, prieš daugiau nei 3, 5 mlrd. metų, egzistavo du mechanizmai, kuriais iš aplinkos buvo surenkamas anglies dioksidas: fotosintetikų sukeliams bikarbonatų virtimas karbonatais (karbonatizacija) ir anglies dioksido, kaip anglies šaltinio, naudojimas biomasei auginti. Galima manyti, kad, kaupiantis biosferos biomasei, iš aplinkos buvo negrįžtamai paimamas ekvivalentus anglies dioksido kiekis. Vėliau, atsiradus stromatolitams, buvo sukurtas dar vienas, trečias, mechanizmas – kalcifikacija, t. y. bikarbonatų naudojimas kalkiniam skeletui auginti. Šie skeletai ilgainiui virsdavo fosilijomis, sudarydami klintis (šiuo metu iškasama kaip kreida), taigi vėl nepalikdavo galimybių anglies dioksidui sugrįžti į ciklą. Tiesa, išėjęs iš ciklo biogeninis ar abiogeninis kalcio karbonatas dėl metamorfizmo po kurio laiko gali vėl atlaisvinti anglies dioksidą ir išmesti jį pro ugnikalnių žiotis į atmosferą, taip baigdamas ciklą. Tačiau pats faktas, kad bent jau biogeninio karbonato atsargos Žemėje yra didelės, rodo, kad greičiausiai jo susidarymo greitis ilgą laiką buvo didesnis nei jo dūlėjimo ir metamorfino skilimo greičiai. Vadinas, laikui bėgant mažėjo ir vandens rūgštingumas, ir kalcio kiekis vandenyje. [20, 21]

Deguonies kaupimasis atmosferoje ir vandenyne turėjo dar vieną svarbią reikšmę fotosintetantiems organizmams. Ištirpęs deguonis vandenyne padidino resursų tinkamumą šiems organizmams. Laisvas deguonis ištirpęs vandenyje padidina vario (Cu) tinkamumą, kuris yra reikalingas fotosintetikų fiziologinėms funkcijoms palaikyti. Be to deguonis silpnina tokių cheminių elementų, kaip geležis (Fe), manganas (Mn) ir selenas (Se) tinkamumą bei naudingumą, dalyvaujant reakcijose, kurių metu pasigamina ląstelėms žalingi deguonies junginiai (H₂O₂, O₂⁻, OH radikalai). Geležis, manganas ir selenas yra atsakingi už šių junginių susidarymą. Tokiu būdu, deguonis pagamintas fotosintezės metu turi eilę svarbių atsakomųjų reakcijų deguonį gaminantiems organizmams. [24]

2.3 Oksigeninės fotosintezės atsiradimo įtaka atmosferai

Prieš 3, 5 – 3, 0 mlrd. metų Žemėje atsiranda melsvabakterės ir jų funkciniai analogai, kurios vykdė oksigeninę fotosintezę (vienas iš reakcijos produktų – molekulinis deguonis):



Ši, oksigeninė fotosintezė yra pranašesnė už anoksigeninę, nes pirminės produkcijos nuo šio momento jau nebegalėjo riboti medžiagos (H_2S , H_2), kurių kiekis to metu vargu ar buvo labai didelis. [20, 21]

Kartu su melsvabakterėmis atsirado dar vienas labai sunkiai skaidomas junginys celiuliozė. Ji įeina į melsvabakterių sienelės sudėtį. Tuo laikotarpiu nebūta bakterijų, kurios gebėtų šį junginį skaidyti. Todėl perėjusi į detritą celiuliozė neišvengiamai išeidavo iš ciklo. Kol atsirado celiuliozę skaidančios bakterijos, turėjo praeiti šiek tiek laiko, taigi logiška manyti, jog toks procesas, kaip detrito kaupimasis turėjo vykti. [20, 21]

Prieš 3, 0 – 2, 5 mlrd. metų redukuotų medžiagų atsargos paviršiniuose vandenyse pamažu seko, taigi čia neišvengiamai turėjo didėti O_2 kiekis. Sunku pasakyti kokio masto katastrofą sukėlė prasidėjęs deguonies kaupimasis vandens ekosistemose. Galimi du kraštutiniai variantai. Vieno iš jų esmė ta, kad vandens tarša deguonimi buvo tokia didelė, kad įvyko masinis išmirimas, baigęsis naftos telkinių susidarymu. Kitas, mažiau drastiškas, labiau tikėtinas variantas: to meto vandenyse būta daug priešnuodžių, kurie ilgam užkirto kelią deguonies kaupimuisi aplinkoje, taigi ir masiniam išmirimui. Manoma, kad svarbiausią antioksidantų vaidmenį suvaidino gausūs to meto vandenyse divalentės geležies junginiai. Deguonies veikiamą geležis oksiduodavosi, pereinavo į trivalentę formą (esant trivalentei geležiai, šios nuosėdos nesusidarytų) ir iškrisdavo į nuosėdas (t. y. magnetitai ir hematitai - šiais laikais eksploatuojamos rūdos). [20, 21]

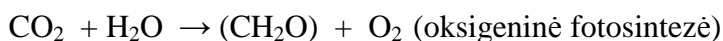
Tuo metu šie procesai turėjo būti aprūpinti didelio deguonies sugėrimo produktyvumo. Manoma, jog anksčiau senosios jūros turėjo būti akumuliuojančiomis sistemomis ištirpusiems divalentės geležies jonams. Šie jonai turėjo idealias sąlygas deguonies panaudojimui (Fe^{2+} tapdavo Fe^{3+}). Augant senojoje atmosferoje oksidacijos potencialui, divalentės geležies oksidacija perėjo į kontinentus. Sumažėjo Fe^{2+} patekimas į vandenyną, o vėliau divalentė geležis prarado sugebėjimą prisijungti deguonį. Vis didesni O_2 kiekiai galėjo išsiskirti į atmosferą. Esant mažam dūlėjimo greičiui, kontinentuose (čia uolienos lėtai iro ir jų atstatomieji komponentai pasidarydavo prieinami deguonies poveikiui) nauja, stacionari būklė buvo galutinai nustatyta dėl ženkliai išaugusio O_2 lygio, kuriam esant, naujoji sugėrimo funkcija atitiko deguonies susidarymo greitį. [32]

Tai buvo lemtingas posūkis atmosferos evoliucijoje – aplinka iš redukuotos pamažu, bet neišvengiamai virsta oksiduota, joje mažėja H_2S , CO , H_2 , CH_4 ir NH_3 , tačiau daugėja sulfatų,

nitratų bei kitų azoto oksidų. H_2S (oksiduodamasi virsdavo sieros rūgštimi), CO (virsdavo anglies dioksidu), H_2 (virsdavo vandeniui), CH_4 (virsdavo anglies dioksidu ir vandeniui), NH_4^+ (virsdavo azoto oksidais). [20, 21]

Tokia įvykių eiga turėjo drastiškai atsiliepti žaliosioms bei purpurinėms bakterijoms, naudojusioms H_2S , H_2 ir NH_3 kaip biogenus. Taigi melsvabakterės susidorojo su savo konkurentėmis ne tik pradėjusios naudoti vandenį kaip vandenilio ir elektronų šaltinį, ne tik užteršdamos aplinką deguonimi, bet ir sumažindamos redukuotų junginių kiekį. Kadangi redukuotų medžiagų atsargos paviršiniuose vandenyse seko, o deguonies kiekis didėjo, tai gamintojai (melsvabakterės), gyvenę šioje adaptyvioje zonoje, buvo priverstos iš pradžių įgyti atsparumą deguoniui, o po to, kaip tai paprastai atsitinka, tapti priklausomomis nuo jo. Taip ilgainiui atsirado aerobinis kvėpavimas – visiškai nauja, nepaprastai efektyvi katabolizmo forma, turėjusi lemiamos įtakos po to ėjusiai gyvybės evoliucijai. [20, 21]

Prieš 2, 5 – 2, 0 mlrd. metų anglies ir deguonies ciklui tais laikais, kaip ir dabar, didžiausią reikšmę turėjo oksigeninė fotosintezė ir aerobinis kvėpavimas:

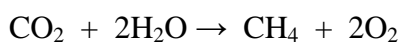


Tikriausiai jau tada būta stacionarios būsenos – ekosisteminis anabolizmas buvo atsveriamas katabolizmu, o tai leisdavo stabilizuoti biomasę ir anglies dioksido bei deguonies kiekį aplinkoje. Tačiau, jei žiūrėtume ne per ekologinio, o per evoliucinio laiko prizmę, tai biosferos biomasė greičiausiai pasižymėjo tendencija pamažu augti. Panašu, kad biosferos mastu didėjo ir detrito bei išėjusios iš ciklo organinės medžiagos kiekiai. Taigi anglies ir deguonies ciklas jau tada vargu ar buvo idealus ta prasme, kad oksigeninė fotosintezė vyko šiek tiek intensyviau už aerobinį kvėpavimą. Todėl kartu su biosferos biomase didėjo ir deguonies kiekis aplinkoje, tuo tarpu anglies dioksido kiekis turėjo mažėti. [20, 21]

Maždaug prieš 2, 3 mlrd. metų vyko perėjimas iš anoksinės atmosferos į oksinę. Dėl pirminio deguonies augimo laiko sutaria daugelis mokslininkų, tačiau kokios priežastys lėmė šį procesą – iki šiol pasilieka ginčytinu klausimu. [14]

Dažniausiai deguonies kaupimasis atmosferoje sietinas su gyvybės vystymusi Žemėje, tačiau yra manančių, jog šį deguonies didėjimą lėmė kiti veiksniai. J. F. Kasting, remdamasis D. C. Catling teigia, jog pradinio deguonies augimo paaiškinimas yra labiau geologinis, nei biologinis. D. C. Catling išskėlė prielaidą, kad perėjimą nuo žemų prie aukštų deguonies koncentracijų lėmė padidėjęs vandenilio paleidimas į kosmosą. Dėl to vėlyvojo Archėjaus ir ankstyvojo

Proterozojaus (prieš 3,0 – 2,3 mlrd. metų) atmosferoje buvo didelės metano koncentracijos. Vandenilis galėjo greičiau ištrūkti iš mažai deguonies turinčios atmosferos, kurioje buvo susikaupę daug redukuotų dujų, tokių kaip vandenilis (H₂) ir metanas (CH₄). Didžioji dalis vandenilio iš pradžių įėjo į vandens sudėtį. Vandeniliui išėjus į kosmosą, deguonis kaupėsi Žemėje. Likęs deguonis palaipsniui didino viršutinės mantijos oksidacinę būklę. Vulkanų dujos su laiku tapo labiau oksiduotos, galų gale pereinama į daug deguonies turinčią atmosferą. Tai įvyko tada, kai fotosintezės metu pagaminamo deguonies kiekis tapo didesnis nei redukuotų dujų išsiveržusių vulkanizmo metu. Bet ši idėja pasirodo esanti neteisinga. Atlikti tyrimai parodė, jog mantijos oksidacijos būseną nesikeitė pastebimai per ilgą laiko tarpą. D. C. Catling pateikė keletą naujų paaiškinimų šiam argumentui. Pirmiausiai jis iškėlė prielaidą, kad vandenilio paleidimo į kosmosą tempas galėjo būti stipriai padidintas dėl biogeninio metano kaupimosi Archėjaus atmosferoje. Kaip jis teigia, daugiausiai šio metano buvo pagaminta vykstant organinės medžiagos, pagamintos fotosintezės metu, anaerobiniam skaidymui:



Jeigu deguonis buvo sunaudojamas greičiau nei metanas, o taip ir buvo, todėl atmosfera išliko anoksinė. Šis aiškinimas atitinka vėlyvojo Archėjaus šiltą klimatą, neskaitant žemos CO₂ koncentracijos atmosferoje. Metanas (CH₄) taip pat yra „šiltnamio efekto“ dujos, kurios palaiko neišvengiamą šiltėjimą. Kitas aiškinimas, pasiūlytas D. C. Catling, teigia, kad likęs deguonis po vandenilio išėjimo į kosmosą, buvo greitai suvartojamas žemyno plutos oksidacijai. [14]

R. P. Wayne prieštarauja šiai J. F. Kasting pateiktai hipotezei ir jos aiškinimui. Autorius teigia, jog beveik visas atmosferos deguonis yra susidaręs fotosintezės metu, neorganinė fotochemija daugiausiai gali pagaminti deguonies tik 10⁻⁹ dabartinio atmosferos lygio. [35]

Visas arba beveik visas dabartinis deguonis, esantis surištos ir laisvos būsenos, tikriausiai yra biogeninės kilmės. Prieš atsirandant gyvybei deguonies atmosferoje turbūt nebūta visai. Tokia yra daugumos specialistų nuomonė. Kas kita anglies dioksidas. Manoma, kad jo kiekis prieš kelis milijardus metų buvo kur kas didesnis nei dabar, ir šis skirtumas galėjo siekti net tūkstančius kartų. [20, 21]

Nesunku suvokti, jog ne tik biomasės, bet ir detrito kaupimasis biosferoje didina laisvo deguonies kiekį. Galų gale ir detrito išėjimas iš ciklo bei virtimas organinės kilmės naudingosiomis iškasenomis – ar tai ne grįžtamosios reakcijos su deguonimi (oksidavimosi) išvengimas? [20, 21]

Galima apibendrinti dar aiškiau, samprotaujant iš kito galo: biogeninės kilmės deguonies visose keturiose Žemės sferose yra susikaupę tiek, kad jis be liekanos sureaguotų su biosferos

anglimi, esančia biomasėje, detrite ir organinės kilmės naudingosiose iškasenose. Jei toks totalinis oksidavimas įvyktų, aplinkoje susikaupytų milžiniškas anglies oksidų ir vandens kiekis, o laisvas deguonis išnyktų. Visai galimas dalykas, kad po tokios globalinės katastrofos Žemės atmosfera vėl sugrižtų į tą padėtį, kurioje ji buvo prieš 4,0 – 3,0 mlrd. metų. [20, 21]

Deguonis gal ir sureaguotų be liekanos, o štai ar be liekanos sureaguotų organinė anglis – jau keblesnis klausimas. Mes neįvertinome kai kurių labai svarbių atmosferos evoliucijos dalyvių. Oksigeniniai fotosintetikai – ne vieninteliai organinės medžiagos gamintojai biosferoje. Yra dar anoksigeniniai fotosintetikai ir chemosintetikai. Pirminei produkcijai pagaminti jie iš aplinkos asimiliuoja CO₂, bet neišskiria O₂. Gal net pusę milijardo metų CO₂ buvo iš aplinkos asimiliuojamas neišskiriant O₂. Tokiu būdu kaupėsi organinė medžiaga detrito pavidalu. Todėl deguonis su anglimi gal ir sureaguotų be liekanos, tačiau dar liktų tam tikras kiekis, gal ir nemažas, nesureagavusios anglies, asimiliuotos ne oksigeninės fotosintezės būdu. [20, 21]

2.4 Augalų evoliucija sausumoje

Deguonies kaupimasis atmosferoje turėjo ir kitą svarbią naudą gyviesiems organizmams, t. y. ozono (O₃) susiformavimas, kurio dėka gyvybė galėjo egzistuoti ne tik vandenyje, bet ir sausumoje (iki to laiko gyvybė egzistavo tik vandenyne). Deguonis, esantis atmosferoje, veikiamas UV skyla į atomus (O). Atomai gali vėl susijungti su kitais deguonies atomais, sudarydami O₂. Kai atomai jungiasi su deguonies molekulėm (O₂), susidaro ozonas (O₃), kuris turi savybę „sugerti“ gyvybei žalingas trumpąsias ultravioletines bangas (UV). Tarp O₂ ir O₃ susidaro filtras nuo UV, kuris leido įsikurti gyvybei sausumoje. Be to, kaip J. F. Kasting teigia, ozono sluoksnio susiformavimas buvo vienas iš veiksnių, kuris lėmė deguonies kaupimąsi atmosferoje. Ozonas galėjo susidaryti tik tada, kai deguonies kiekis atmosferoje buvo pakankamas jo susidarymui. Tai buvo svarbus momentas ir pradinė sąlyga gyvybės paplitimui sausumoje. [1]

Paplitusi nuomonė, kad gyvybė sausumoje įsikūrė ne anksčiau kaip silūre, t. y. prieš kiek daugiau kaip 400 mln. metų. Tačiau specialistai dabar jau neabejoja, kad gyvybė pradėjo skverbtis į sausumą dar prekambre, o tiksliau – prieš maždaug 600 mln. metų. [20, 21]

Vėlyvajame ordovike, t. y. prieš maždaug 450 mln. metų, atsiranda dar labai primityvios kerpsamanės ir kerpės. Jos dar labiau pagreitina uolienų dūlėjimą ir dirvožemio formavimą. [20, 21]

Prieš ~ 450 mln. metų prasidėjusi embriofitų evoliucija lėmė daug didesnius, pirminės produkcijos pagaminimo greičius. Pirminės produkcijos kiekis žymiai didesnis, nei prieš embriofitus sausumoje vyravusių dumblių floros pagaminta biomasė. [24]

Pirmieji sausumos augalai buvo žoliniai, nesumedėję. Jie buvo neprisitaikę gyventi naujomis sąlygomis, ypač užėjus sausroms, todėl masiškai žūdavo (kaupėsi detritas). Tačiau galima manyti, kad nuo pat sausumos užkariavimo pradžios egzistavo galingas atrankos spaudimas, skatinantis lignino, medienos bei krūmų ir medžių atsiradimą (devono viduryje). [20, 21]

2.4.1 Lignino įtaka biomasės didėjimui ir organinės medžiagos kaupimuisi

Organinės anglies, kuri susidaro sausumoje fotosintezės metu, laidojimo efektyvumas priklauso nuo tos medžiagos atsparumo heterotrofų sunaudojimui. Tik tie junginiai, kurie yra labiausiai atsparūs biosuskaidymui, gali būti palaidojami kaip organinė medžiaga. [20]

Nėra abejonės, kad iš pradžių dirvoje turėjo kauptis ligninas – naujas, sunkiai skaidomas junginys, o tik po to tam tikro evoliucijos laikotarpio galėjo iškilti ligniną skaidantys grybai ar bakterijos. Tačiau skaidymo greitis vis tiek visą laiką buvo mažesnis nei pirminė produkcija, tad galėjo kauptis biomasė. [20, 21]

Ligninas taip pat apsaugo augalus nuo UV, nes jo sudėtyje esantys benzeno žiedai sugeria šiuos gyvybei žalingus spindulius, be to ligninas sunkiai užsidega ir turi savybę apanglėti. Šios lignino savybės lėmė spartų augalų paplitimą Žemėje, jų biomasės padidėjimą ir aišku po to sekantį didelį organinės medžiagos laidojimą. Tokiu būdu deguonies kiekis atmosferoje galėjo sparčiai augti. [27]

J. M. Robinson lignino atsiradimą taip pat sieja su padidėjusia pirmine produkcija, t. y. biomase ir augalų evoliucija. Šį teiginį pagrindžia padidėjusiu augalų vertikaliuoju ir horizontaliuoju augimu. Atsiradus ligninui augalų aukštis išaugo nuo 10 cm iki 20 m, atitinkamai turėjo išaugti ir biomasė, o kartu su biomase ir organinės anglies laidojimas. [27]

Ankstyvajame silūre ligninas savo sudėtimi buvo panašus į dabartinį ligniną, tačiau šiek tiek skyrėsi nuo dabartinio savo komponentais. Tik vėlyvajame silūre ir ankstyvajame devone rasti labiau į dabartinį ligniną panašūs fragmentai. Iškastinių fosilijų duomenys iškelia prielaidą tendencijai, kad senesni taksonai turėjo didesnę lignino kiekį nei jaunesni taksonai. Tikėtina, kad dabartiniai augalai vidutiniškai turi dvigubai mažiau lignino, nei vėlyvojo Paleozojaus augalai. [27]

2 Lentelė. Lignino kiekio pokytis evoliucijos eigoje. [27]

Augalų grupė	Periodas	Pastabos	Būdingas lignino kiekis %
Mediški pataisai	Dominavo karbone, išnyko Perme	Dažniausiai turėjo peridermį su 38 - 55% lignino, dažniausiai buvo atsparūs skaidymui	45%
Paparčiai	Karbonas, permas	Daug lignino paparčių kamienuose	> 40%
Senoviniai plikasėkliai	Permas	Daugelis reliktnių, irimui atsparių, plikasėklių (sekvojos, kedrai) su daug dervų turinčia mediena ir 30 - 35% lignino	>30%
Tropikų gaubtasėkliai	Kreida	Medienoje > 20% lignino	25%
Plikasėkliai	Kreida	Medienoje 20 - 30% lignino	23%
Vidutinių platumų gaubtasėkliai	Paleogenas	Medienoje < 20% lignino	17%
Dviskilčiai augalai	Neogenas	Lignino įvertinimas sunkus, bet dažniausiai kiekis mažas	15%
Žoliniai augalai	Neogenas	C3 žoliniuose augaluose 5 -10% lignino, tropikų C4 žoliniuose lignino kiekis didesnis, bet ne < 13%	8%

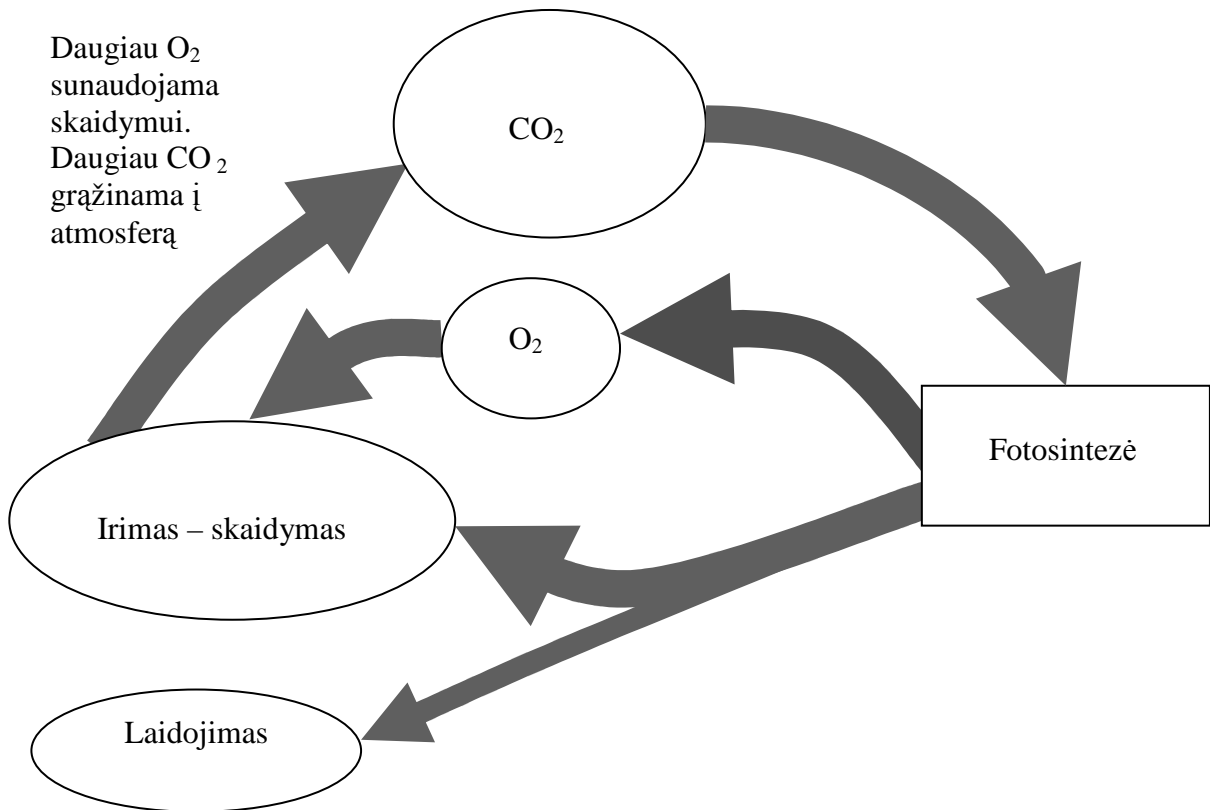
2.4.2 Sumedėjusių augalų įtaka biomasės augimui ir organinės medžiagos kaupimuisi

J. C. G. Walker mano, jog padidėjęs fotosintezės greitis, kuris susijęs su plačiu augalų paplitimu Žemėje, buvo biologinių inovacijų, tokių kaip sumedėjusių ir žiedinių augalų atsiradimas, priežastis. Dėl šių inovacijų, padidėjusio fotosintezės greičio, turėjo padidėti ir biomasė (paviršiaus organinė medžiaga). [33]

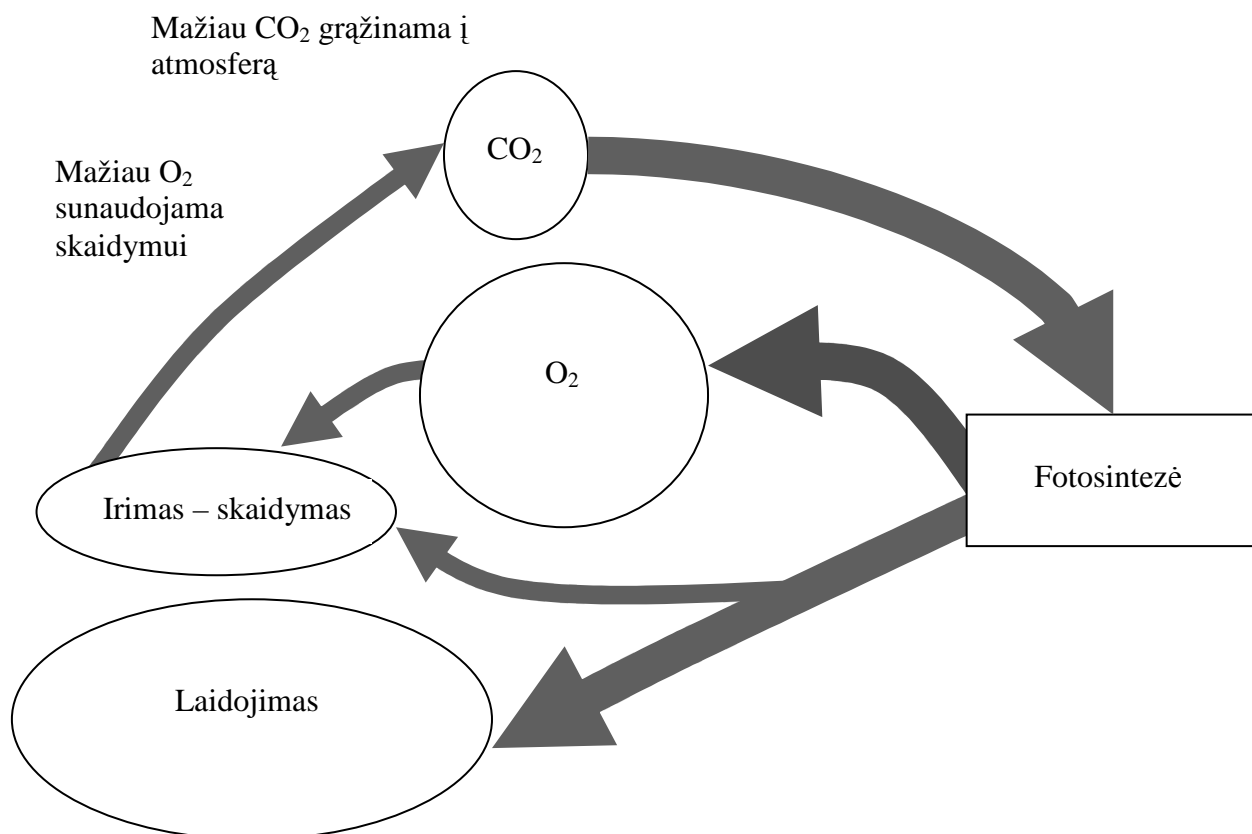
Kaupiantis biosferoje organinei medžiagai, deguonies kiekis aplinkoje galėjo didėti. Ar tokio kaupimosi tikrai būta? Specialistai į šį klausimą atsako teigiamai: taip, biosferos biomasė, tegu ir su pertrūkiais, visą laiką didėjo. Vyko ir ekstensyvus, ir intensyvus augimas. Pastarasis susijęs su biomasės didėjimu ploto ar tūrio vienetu. [20, 21]

Anglies laidojimas turėjo vykti šiek tiek greičiau, nei jos skaidymas (aerobinis kvėpavimas) – tai ir buvo pagrindinė priežastis kauptis O₂ atmosferoje. Vykstant mažesniame laidojimo tempui,

deguonis sunaudojamas organinės medžiagos skaidymui, aerobiniam kvėpavimui ir erozijos bei išplovimo metu vykstančiai senesnės organinės anglies oksidacijai.



1 pav. Organinės medžiagos laidojimas vyksta lėčiau nei jos skaidymas, todėl atmosferoje O₂ kiekis mažėja, o CO₂ kiekis didėja. [31]



2 pav. Organinės medžiagos laidojimas vyksta greičiau nei jos skaidymas, todėl atmosferoje O₂ kiekis didėja, o CO₂ mažėja. [31]

Didelis organinės anglies laidojimo greitis turėjo stipriai paveikti deguonies ir anglies dioksido koncentracijas atmosferoje. Bedeguonė aplinka ir deguonies trūkumas buvo svarbiausios vietos organinės anglies laidojimui ir jos „konservavimui“ (anoksinės sąlygos buvo plačiai paplitę visoje Žemėje). Tokios, organinei angliai laidoti tinkamos vietos susidarydavo vandenynuose, vandenynų dugnuose arba užlietuose sausumos plotuose, kur užsistovėjęs vanduo sukurdavo bedegones pelkes. Tokios pelkės užėmė didelius sausumos plotus. Jose buvo palaidotas didelis organinės medžiagos kiekis (medžiai ir jų dalys). Kai kurios iš šių pelkių tapo akmens anglies klodais. Deguonies trūkumas leido žuvusių augalų dalims išlikti ant dugno ir ilgainiui būti giliai palaidotiems, išvengiant irimo procesų. Taip organinė medžiaga kaupėsi vandenynų ir pelkių dugnuose su nuosėdomis, dumbliu ir kitais nešmenimis, kas lėmė išskirtinį fosilijų išsaugojimą, didelį organinių išteklių susiformavimą Žemės plutoje. Organinės anglies laidojimas buvo ypač spartus karbono periode (nuo to kilęs karbono periodo pavadinimas, angl. k. carbon - anglis). Tai laikas kai primityvūs ir prie aplinkos sąlygų nespėję prisitaikyti medžiai buvo intensyviai laidojami pelkėse. Medžių liekanos kaupėsi bedeguoniuose pelkių dugnuose ir virsdavo durpėmis, o vėliau akmens anglimi. [31]

Anglys yra suakmenėjusios organinės iškasenos, kurios gali parodyti daug organinių ir ekologinių pasikeitimų požymių. Kai kurie iš jų gali reikšti organinės anglies ciklo pokyčius. Daugelyje permio periodo anglių sudėtyje yra neįtikėtinais gerai išsaugotų struktūrų, vadinamų „anglies kamuoliai“. Kaip jie susiformavo šiuo metu diskutuojamas klausimas, tačiau aišku, kad per paskutinius 270 mln. metų tokie anglies balionai nesusidarydavo. Šitoje anglyje yra neįprastai didelis kiekis medžio anglių, kuris dažniausiai sudaro daugiau nei 10% anglies masės. Šiuolaikinės durpės ar pleistoceno rausvosios anglys retai turi vos keletą procentų medžio anglių. Sunku paaiškinti šį procesą pelkių ekologijoje, kai susidaro toks didelis medžio anglių kiekis. Kitas šių anglių skiriamasis bruožas, tai gerai išsilaikiusi ląstelių sienelių struktūra, kurioje gausu ugniai atsparių junginių. Tai tikriausiai ir leido nesuirti bei gerai išsilaikyti šioms ląstelėms. [27, 3]

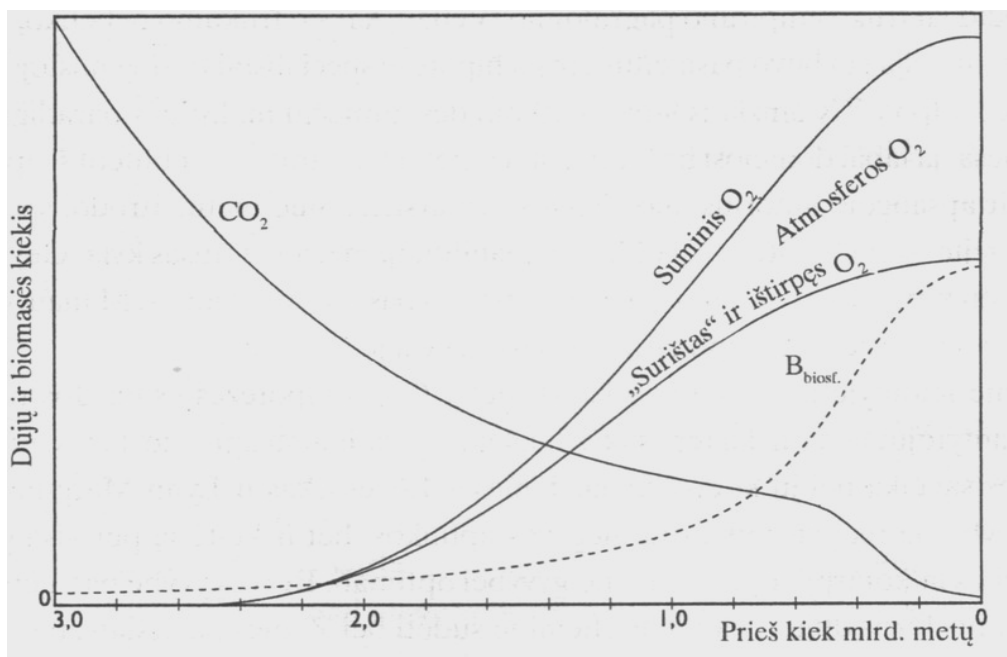
Kreidos periodu žemynų pakraščiuose kaupėsi daug organikos turintys dumbliai, kur su žuvusiu planktonu ir iš sausumos atneštų augalų nuosėdų sudarydavo dumblą, kuris galiausiai virsdavo juodos spalvos skalūnais, nes turėjo didelį anglies kiekį. Šiuo periodu anksčiau susidariusios nuosėdos buvo veikiamos slėgio ir aukštų temperatūrų. Dėl šios priežasties organinės anglies telkiniai pereinavo į skystą ar dujinį pavidalą. Tai sudarė galimybę mišiniams persikelti per uolienų poras į gilesnius Žemės sluoksnius, kur buvo suspausti požeminių rezervų ir šiuo metu eksploatuojami kaip nafta ar gamtinės dujos. [31]

Nėra jokių abejonių, kad didėjo ir detrito bei organinės kilmės naudingųjų iškasenų kiekis. Šis faktas labai svarbus, nes skaičiavimai rodo, kad vien akmens anglies pavidalu anglies yra susikaupusios keliasdešimt kartų daugiau nei jos yra visoje biosferos biomasėje. Jeigu šie skaičiavimai pasitvirtintų, būtume priversti gerokai pakeisti savo pažiūras į atmosferos sudėties kitimus praeityje. [20, 21]

Kaip žinoma, akmens anglies klodai formavosi karbone, perme, juroje, kreidoje, paleogene ir netgi neogene. Karbone ir perme nepaprastai išaugo ir biosferos biomasė. Taigi per tą laikotarpį deguonies kiekis atmosferoje turėjo padidėti mažiausiai kelis kartus, o per visą laikotarpį, praėjusį nuo gyvybės išėjimo į sausumą iki šių laikų, - gal dešimt ar daugiau kartų. [20, 21]

Didėjant deguonies kiekiui, CO₂ kiekis aplinkoje turėjo ekvivalentiškai sumažėti, kaip numato oksigeninės fotosintezės stochiometrija. Ši išvada, suprantama, teisinga tik su sąlyga, kad šių dujų kiekiui neturėjo didesnės įtakos kiti reiškiniai. Pavyzdžiui ji teisinga tik jei greitis, kuriuo atmosferos anglies dioksidas buvo nuolat papildomas iš ugnikalnių bei dūlėjant karbonatinėms uolienoms, buvo maždaug lygus abiogeninės karbonatizacijos ir biogeninės kalcifikacijos greičiui (duomenų nėra). Tačiau turint omenyje, kad per visą gyvybės istorijos Žemės laikotarpį susikaupė nemažos biogeninių karbonatų atsargos, panašu, kad bent jau kalcifikacija galėjo gerokai sumažinti CO₂ kiekį aplinkoje. [20, 21]

Tarp anglies dioksido ir deguonies kaitos būta atvirkštinės koreliacijos: anglies dioksido kiekis nuolat mažėjo, o deguonies didėjo. Šiuo metu dar neatsakytas klausimas ar deguonies kiekis didėjo palaipsniui, ar šis pokytis buvo staigus (Scientific American, 1994). Dauguma specialistų neabejoja, kad šias tendencijas lėmė biosfera. [20, 21]



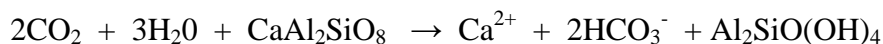
3 pav. Kaip numato anoksigeninės ir oksigeninės fotosintezės reakcijos, biosferos biomasė ($B_{\text{biosf.}}$) augimą lydėjo CO₂ kiekio atmosferoje mažėjimas ir O₂ susikaupimas aplinkoje. Grafike nėra nurodyta nei detrito, nei organinės kilmės naudingųjų iškasenų kaupimosi dinamika, taip pat turėjusi nemažos įtakos šių dujų kiekiui. [20]

Nors yra ir kitokių nuomonių dėl CO₂ ir O₂ kiekio pokyčio atmosferoje. T. M. Lenton mano, jog atmosferos O₂ augo nereguliariai – pulsuojančiai, o A. H. Knoll teigia, kad O₂ kiekis ilgą laiko tarpą buvo pastovus – kiek jo pagaminama fotosintezės metu, tiek jo ir sunaudojama biologinio bei geologinio aktyvumo metu.

Su A. H. Knoll nuomone sutinka ir L. S. Stanley. Pagal jį, ilgą geologinio laiko tarpą CO₂ ir O₂ lygiai atmosferoje buvo palyginti stabilūs, nes organinės anglies laidojimas atitiko erozijos greitį. Palaidotos žuvusių augalų dalys sudarė redukuotus anglies junginius, tačiau erozijos proceso metu šie junginiai buvo oksiduojami. Autorius teigia, jog ši pusiausvyra tarp erozijos ir laidojimo greičių lėmė CO₂ ir O₂ kiekių stabilumą atmosferoje. Tik tada, kai bendras organinės anglies laidojimo greitis sparčiai išaugo, deguonies kiekis atmosferoje galėjo didėti. Nors S. M.

Stanley teigia, jog organinės anglies laidojimas ne vienintelis veiksnys lėmęs didesnę deguonies kiekį. CO₂ išteklių mažėjimas atmosferoje, kintant redukuotos anglies kiekiui organiniuose anglies ištekliuose, taip pat labai svarbus veiksnys atmosferos deguonies kiekio pokyčiams. S. M. Stanley šį veiksnių traktuoja kaip svarbesnį, nei organinės medžiagos laidojimą, turėjusį didesnę įtakos CO₂ mažėjimui. Kaip autorius teigia, ypač dideli CO₂ koncentracijos pokyčiai atmosferoje vyko dėl cheminių reakcijų, sukeliančių uolienu ir mineralų skaidymą žemės paviršiuje, bei jų išplovimą į vandenynus. Ir tik tada kai redukuoti anglies junginiai buvo palaidoti giliai žemėje, ir negalėjo oksiduotis, o erozijos greitis tapo mažesnis nei organinės anglies laidojimas, deguonies kiekis atmosferoje galėjo sparčiai augti.[31]

P. G. Falkowski ir Y. Rosenthal CO₂ koncentracijų mažėjimą atmosferoje sieja su dirvožemio formavimusi. Sumedėję, ligniną formuojantys sausumos augalai padidino organinių medžiagų laidojimą (šį teiginį jie pagrindžia fosilinių iškasenų gausumu ir įvairove). Kaip autoriai teigia, organinės medžiagos laidojimas lėmė dirvožemio formavimąsi. Dirvožemio formavimasis mažino CO₂ kiekį atmosferoje:



HCO₃⁻ buvimas vandenyje tiekia neorganinę anglį, nusėdamas kaip Ca²⁺ ir Mg²⁺ karbonatai (dolomitai ir klintys). P. G. Falkowski ir Y. Rosenthal teigia, jog CO₂ tiekimo greitis į atmosferą ir vandenyną metamorfizmo bei vulkanizmo metu neprilygo neorganinės anglies nuosėdų susidarymo tempui išplovimo metu. Tokiu būdu CO₂ kiekis atmosferoje mažėjo. [12]

Ne visi specialistai vienodos nuomonės siejant CO₂ mažėjimą atmosferoje su organinės anglies laidojimu. Daugelis iš jų šių dujų mažėjimą sieja su padidėjusiu mineralinių medžiagų išplovimu žemynuose, kurių paspartino sumedėjusių augalų paplitimas sausumoje.

S. M. Stanley teigia, jog CO₂ dujų mažėjimą devone ir karbone lėmė padidėjęs išplovimo greitis sausumoje. Devone išplovimas suintensyvėjo dėl augalų evoliucijos, kas leido jiems įsikurti prie pelkių, ežerų ir upių. Tokiu būdu miškai pirmą kartą plačiai paplito Žemėje. Pirminis miškų paplitimas ir ilgesnės augalų šaknų sistemos išsivystymas paspartino erozijos bei mineralinių medžiagų išplovimo intensyvumą ~ 7 kartus (dėl drėgmės kaupimosi ir vandens apykaitos miškuose), nei jis buvo prieš tai. Dėl šios priežasties CO₂ koncentracija atmosferoje turėjo mažėti. [31]

J. A. Raven kaip S. M. Stanley nuomonės, jog atmosferos CO₂ sumažėjimui per praėjusius 450 mln. metų daugiausiai įtakos turėjo padidėjęs, sausumos augalų sukeltas, uolienu išplovimas, kuris įtakoją neorganinės ir organinės anglies sedimentaciją bei palaidotas organinės medžiagos „užkonservavimą“, išvengiant CO₂ grąžinimo į atmosferą. [24]

T. M. Lenton svarbią reikšmę, O₂ kiekio kontroliavimui atmosferoje, skiria maistinėms medžiagoms (azotui ir fosforui). Jis teigia, jog ilgą laiką tarp sausumos organinės anglies produkcija buvo ribojama maistinių medžiagų tiekimo, o ypač tokių kaip fosforas ir azotas. Fosforo reikšmė augalų produktyvumui daug didesnė, nei manyta iki šiol (dirvožemiuose, kurių amžius ~ 1 mln. metų, fosforas tampa vienintele, augimą ribojančia, maistingą medžiaga. Fosforo šaltinis yra uolienos, todėl jo tiekimas labai priklauso nuo uolienu išplovimo. Nuo šio fosforo išplovimo pokyčio priklauso organinės medžiagos kaupimasis sausumos ekosistemose ir jų bendrosios masės praradimas, kas įtakoja sausumos organinės medžiagos laidojimo pokytį, todėl fosforo daug turinčių mineralų išplovimas yra labai svarbus deguonies kiekio atmosferoje kontroliavimui. Didžiausias fosforo šaltinis yra nuosėdinių fosfatų (apatitų) išplovimas, o išplovimo greitis yra stipriai įtakojamas augalų aktyvumo. Augalai ištraukdami fosforą iš uolienu ir paversdami jį biologiškai tinkama forma, skatina sausumos ir jūros produktyvumą, o tuo pačiu ir organinės anglies laidojimą (pagrindinė deguonies kaupimosi priežastis atmosferoje). T. M. Lenton teigia, jog be augalų fosforo išplovimas būtų nepakankamas, o biologiškai tinkamo fosforo nuolatinis srautas į sausumą ir vandenyną būtų sustabdytas. Autorius mano, jog dėl augalų poveikio padidėjęs fosforo išplovimas galėjo būti pagrindinė priežastis deguonies kiekio padidėjimui iki dabartinės koncentracijos. Tik atsiradus augalams, fosforo išplovimas ir organinės anglies laidojimas buvo lėtesnis, o deguonies koncentracija atmosferoje žymiai mažesnė. [22]

R. A. Berner kaip ir T. M. Lenton sutinka, jog fosforas ne tik dabar, bet ir gana seniai buvo augimą ribojančiu veiksniu, tačiau labiau pabrėžia geologinių, nei biologinių procesų svarbą, tokių kaip kalnodara, kuri palankiai veikia eroziją ir fosfatų mineralų išplovimą į vandenynus bei CO₂ pokytį atmosferoje per geologinį laiką (to pasekoje didėja pirminė produkcija, auga deguonies kiekis atmosferoje). Nors neatmeta galimybės, jog kalnų erozijos didesniai intensyvumui daug reikšmės turėjo jų augalija (geologiniai – biologiniai veiksniai). [3]

D. J. Des Marais ir kt. tokios pat nuomonės kaip ir R. A. Berner, jog Žemės paviršiaus oksidacijos procesus skatino biologinių procesų sąveika su geologiniais procesais, tačiau geologiniai veiksniai šioms procesams turėjo daugiau reikšmės, nei biologiniai. [11]

J. C. G. Walker teigimu, organinės medžiagos skaidymą, o ypač mineralų, katalizuoja gyvieji organizmai, tačiau šių reakcijų greičių gyvieji organizmai nereguliuoja. Jei nebūtų Žemėje gyvybės, silikatinų mineralų skaidymasis vyktų greičiau, taip kompensuodamas organinės medžiagos nebuvimą nuosėdinėse uolienose. Reakcijos, kurių metu vartojamas deguonis, galėjo vykti ir nesant gyvybei Žemėje. [33]

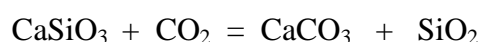
Taigi ne visi specialistai vieningos nuomonės dėl augalų įtakos CO₂ kiekio mažėjimui atmosferoje. J. C. G. Walker teigimu, gyvybės atsiradimas Žemėje buvo pagrindinė priežastis

kauptis O₂ šaltiniui atmosferoje. CO₂ koncentracijos atmosferoje taip pat susijusios su gyvybe, tačiau ilgai trunkantis šių dujų kiekio pokytis aplinkoje tikriausiai nuo gyvybės nepriklausė. Tikėtina, kad biologinės struktūros pasikeitimas turėjo svarbų, tačiau galimas daiktas laikiną įtaką atmosferos CO₂ koncentracijoms atmosferoje. Autorius mano, jog augalų įtaka CO₂ kiekio pokyčiams atmosferoje, o tuo pačiu klimatui ir „šiltnamio efektui“, yra neaiški bei spekuliatyvi. Kaip jis teigia, labiau tikėtina, jog ne biologinės struktūros pasikeitimas, o didėjantys žemynų plotai galėjo toliau mažinti CO₂ kiekį atmosferoje, susidarant karbonatų nuosėdoms. C. G. Walker tvirtina, jog sausumos augalai galėjo tiesiogiai veikti nebent vietinį klimatą, keisdami Žemės paviršiaus atsispindėjimą (albedo) arba įtakodami vandens garų koncentracijas savo aplinkoje per vandens išgarinimą. Nėra aišku ar tokie veiksniai turėjo įtakos globaliam klimatui. Šių veiksmų poveikis globaliam klimatui tikriausiai buvo nežymus bei šalutinis, o globalios vidutinės temperatūros galėjo pasikeisti ne daugiau nei keli laipsniai. [33]

2.4.3 Bioįvairovės įtaka biomasės augimui ir organinės medžiagos kaupimuisi

D. J. Des Marais ir kt. tvirtina, jog Žemės plutos organinių rezervų augimą ir paviršiaus oksidaciją turėjo stipriai įtakoti flora ir fauna. Jų manymu, logiška susieti eukariotų deguonies poreikį su jų gausumu ir įvairove, augant deguonies kiekiui atmosferoje. Su padidėjusiu eukariotų gausumu ir įvairove tikriausiai turėjo augti ir organinės anglies išteklių. [11]

D. H. Rothman taip pat įrodinėja ryšį tarp bioįvairovės ir anglies ciklo pokyčio. Savo veikale jis didžiausią dėmesį skiria biologiniams veiksniams, kurie turėjo svarbų poveikį anglies ciklui Fanerozojaus eone (0 – 543 mln. metų). Jis teigia, jog CO₂ lygio mažėjimo priežastis buvo bioįvairovės didėjimas (genotipo pokytis atsiradęs dėl konkurencijos apribotiems ištekliams), kurį galėjo sąlygoti tektoninio aktyvumo sukeltas CO₂ lygio sumažėjimas. Autorius teigia, jog CO₂ lygio svyravimai pirmiausiai vyko dėl pasikeitimų biosferoje, o tik vėliau šiems svyravimams turėjo įtakos geologiniai ir geofiziniai procesai. Nors D. H. Rothman neatmeta galimybės, jog šie procesai taip pat turėjo daug įtakos CO₂ lygio pokyčiui atmosferoje:



Reakcija iš kairės į dešinę schematiškai pavaizduoja CO₂ „sugėrimą“ iš atmosferos ir netirpių karbonatų susidarymą vandenyje (CO₂ vandenyje virsta HCO₃⁻ ir sudaro karbonatus). Reakcija iš dešinės į kairę vaizduoja metamorfizmą bei degazaciją ir po to sekantį CO₂ grąžinimą į atmosferą, vandenynus. [28]

D. H. Rothman išnagrinėjęs du duomenų tipus, t. y. paleontologinius jūros gyvūnų ir sausumos augalų įvairovės duomenis bei anglies izotopų pasiskirstymą tarp anglies palaidotos organinėje formoje ir anglies palaidotos karbonatų pavidale, rado nenumatytą, svarbų ryšį tarp šių duomenų tipų (per praėjusius 400 mln. metų). Jis teigia, jog šis ryšys tarp bioįvairovės ir anglies izotopų suteikia įrodymą bei parodo CO₂ lygio svyravimus atmosferoje ir vandenyne per ilgą laiko tarpą. [28]

Paleontologiniai jūrų gyvūnų ir sausumos augalų įvairovės duomenys yra siejami su anglies izotopų pasiskirstymo įvertinimais organinėje medžiagoje per praėjusius 400 mln. metų. Apie sąsają tarp CO₂ lygio ir įvairovės galima spręsti iš prielaidos, kad didėjanti augalų įvairovė skatino didėjantį uolienu išplovimą, kas padidino anglies perėjimą iš atmosferos į uolienas ir maistingųjų medžiagų išplovimą į vandenynus. CO₂ koncentracijų priklausomybė nuo anglies izotopų pasiskirstymo rodo, kad sausumos augalų įvairovė lėmė CO₂ lygio mažėjimą. Apie prielaidą, kad globali bioįvairovė augo su globalia biomase, galima spręsti iš organinės anglies išteklių dydžio (anglies „užkonservavimo“). Anglies „užkonservavimas“ rodo, kad ilgalaikiams CO₂ lygio svyravimams poveikį darė anglies rezervų dydžio pokyčiai. Taigi paleontologiniai bioįvairovės duomenys teikia papildomus CO₂ lygio pokyčio apytikrius apskaičiavimus praeityje. [28]

Auganti augalų įvairovė lėmė augalų „migraciją“ į aukštesnes vietas, didesnių sausumos plotų uželdinimą, o tai padidino uolienu erozijos ir mineralinių medžiagų išplovimo greitį į vandenyną. Šių procesų greitis turėjo priklausyti ne tik nuo mechaninio uolienu ardymo (gerai išsivysčiusi šaknų sistema), bet ir nuo cheminių medžiagų sudėties dirvožemyje (augalų šaknys metabolizmu metu išskiria organines rūgštis, kurios tirpdo uolienas). D. H. Rothman teigia, jog augalų šaknų kvėpavimo metu išsiskyres CO₂ parūgština dirvą, tokiu būdu dirvožemio išplovimo tempas greitėja. Padidėjęs uolienu išplovimas dėl sausumos augalų aktyvumo, padidino į vandenyną nešamų maistingųjų medžiagų, tokių kaip fosforas, kiekį, ko pasekoje padidėjo jūros bioįvairovė ir produktyvumas. Autorius tvirtina, jog per prėjusius 370 mln. metų cheminio išplovimo tempas augo su bioįvairove, o bioįvairovė su globaliu produktyvumu ir biomase. [28]

D. H. Rothman savo veikale pateikia atitinkamą sąryšį tarp anglies rezervų dydžio svyravimų. Šie organinės ir neorganinės anglies dydžio svyravimai biosferoje, atmosferoje bei hidrosferoje yra papildantys vienas kitą. D. H. Rothman išskiria tris anglies rezervus: skystasis rezervas (CO₂ kiekis vandenyne ir atmosferoje), biologinis (biomasė plus biologinės nuosėdos)

ir geologinis (uolienos). Didėjant CO₂ kiekiui auga ir skystasis anglies rezervas. Biologinio anglies rezervo biomasė auga su padidėjusia bioįvairove. Biologinio ir skystojo anglies rezervo masių svyravimas yra tarpusavyje susijęs. Ilgai trunkantis skystojo rezervo išsekimas nėra numatytas tik su biologinio anglies rezervo augimu, t. y. šio šaltinio didėjimu. Dažniausiai šių rezervų svyravimai yra papildantys vienas kitą. Dėl šios priežasties apytikris, bet kurio rezervo kiekio pasikeitimo apskaičiavimas suteikia apytikrį kito rezervo pasikeitimo apskaičiavimą. Aišku, biologinis anglies rezervas turi būti gerokai didesnis už skystąjį, kad palaikytų pakankamą bioįvairovę Žemėje. Geologinio rezervo kiekio svyravimai yra mažesni nei biologinio ar skystojo rezervų, neskaitant to fakto, kad uolienų sudėtyje beveik visa Žemės anglis. Kadangi Žemės bendroji anglis yra „užkonservuota“, tai biologinio, skystojo ir geologinio rezervuarų suma yra pastovus dydis. [28]

Bioįvairovės ryšį su CO₂ lygiu atmosferoje savo veikale aptarinėja ir P. G. Falkowski, Y. Rosenthal. Jie mano, kad santykį tarp jūros genčių skaičiaus ir CO₂ lygio sunkiai galima paaiškinti, kadangi Fanerozojuje jūros ekosistemų produktyvumas buvo stipriai ribojamas maisto išteklių. Tuo tarpu sausumos šeimų (vienu taksonominiu lygiu aukščiau nei gentis) skaičius gali būti kaip įrodymas šios organizmų grupės įvairovės ir rodyti sąryšį tarp bioįvairovės bei padidėjusio produktyvumo sausumos ekosistemose. Genčių skaičius jūrose nebūtinai vaizduoja bioįvairovę ir produktyvumo didėjimą vandens ekosistemoje. Vandens ekosistemų produktyvumas galėjo padidėti tik Mezozojuje, kai į seklias jūras iš kontinentų buvo atnešamas didelis kiekis maistinių medžiagų. Tuo metu buvo palaidojamas didelis kiekis organinės medžiagos. [12]

P. G. Falkowski, Y. Rosenthal teigia, jog norint tiksliau išsiaiškinti ryšį tarp CO₂ lygio ir bioįvairovės, reikia atidžiau patikrinti mechanizmus, kurie atsakingi už jų (bioįvairovės ir CO₂ lygio) palaikymą. [12]

2.4.4. Simbiozinės sąveikos

J. M. Robinson savo veikale pateikia megasimbiozinių sąveikų sąvoką, kuri apima didelio masto aukštesnio laipsnio taksonų tarpusavio prisitaikymą, t. y. augalų ir grybų karalysčių anaboliniai/ kataboliniai vaidmenys. Tokių dviejų karalysčių, t. y. augalų (anabolinis vaidmuo) ir grybų (katabolinis vaidmuo) simbiozė žymiai pagreitina fotosintetinančių augalų gebėjimą išgauti iš uolienų maistines medžiagas ir vandenį. Autorius spėlioja, jog tokių sąveikų pergrupavimas turi turėti nepaprastą poveikį ne tik organinės anglies laidojimui ir deguonies

augimui atmosferoje, bet ir paviršiaus erozijai, nuotėkiai, CO₂ kiekio ir hidrologiniams pokyčiams. [27]

2.5 Jūrų produktyvumo įtaka biomasės augimui ir organinės medžiagos kaupimuisi

Daugelis tyrinėtojų svarbiausią reikšmę organinės anglies laidojimui skiria iš sausumos kilusiems ištekliams, tačiau L. S. Stanley pabrėžia, jog daug organinės medžiagos susidarė ir iš jūros fitoplanktono. Vandenynuose buvo anoksinės sąlygos, vandens sluoksnių maišymasis praktiškai nevyko. Čia tikriausiai buvo keletas bakterijų, kurios vykdė skaidymą, todėl žuvęs fitoplanktonas galėjo netrukdomai nusėsti į dugną kaip organinė medžiaga. Šis laidojimas taip pat turėjo teigiamos reikšmės deguonies kaupimuisi atmosferoje, nors vandenynai niekada nebuvo greito organinės anglies laidojimo vieta. Didesnis organikos laidojimas vyko žemynų pakraščiuose, kur fitoplanktono produktyvumas yra didžiausias. Lagūnose ir deltose kaupėsi iš sausumos atgabentos augalų liekanos. [31]

T. M. Lenton teigia, jog devone, augalų sukeltas, padidėjęs išplovimas pirmiausiai buvo susijęs su padidėjusiu maistinių medžiagų tiekimu į vandenyną, aukštu jūros produktyvumu, padidėjusia vandenynų deguonies stoka ir dideliu nuosėdinės organinės anglies kiekio pokyčiu. [20]

Organinės medžiagos (susidariusi fotosintezės metu jūroje) laidojimo pokytis pirmiausiai sąlygojamas sedimentacijos greičio (organinės anglies kiekio pokytis, kuris pereina į nuosėdas), kuri lemia pirminė produkcija vandenyno paviršiuje. Nusėdusi pirminė produkcija vėliau sąlygojo produkciją ribojančių maistinių medžiagų tiekimą į vandenyno paviršių. Ilgą laiką tarpą fosforo (kaip fosfatų) išteklių pokyčiai vandenyne sąlygojo jūros pirminės produkcijos produktyvumą. [22]

Spėjama, jog deguonies kiekį atmosferoje reguliavo tam tikri mechanizmai, kurie susiję su organinės anglies laidojimo pokyčiu. Mažėjantis deguonies kiekis atmosferoje turėjo padidinti anoksinės sąlygas vandenyne. Tokiu būdu organinės medžiagos laidojimas jūros nuosėdose turėjo tapti veiksmingesnis, t. y. palaidojama daugiau organinės medžiagos. Nors pripažįstama, jog jis neturėjo didelės reikšmės deguonies kiekio padidėjimui. Svarbesnis yra fosforo kiekio padidėjimas vandenyno paviršiuje. Esant anoksinėms sąlygoms vandenyno dugne vyksta greitesnė fosforo recirkuliacija iš nuosėdose esančios organinės medžiagos, o taip pat geležies mineralai atskiria mažiau fosforo sorbcijos metu. Dėl šių priežasčių padidėja fosforo (fosfatų)

kiekis vandenyne, o tuo pačiu išauga jūros produktyvumas ir organinės anglies laidojimas. Augant deguonies kiekiui vandenyne, šie procesai vyksta priešinga linkme ir anglies laidojimo greitis sumažėja. [22]

Anglies izotopų santykio pokyčiai jūros karbonatuose suteikia informaciją apie anglies laidojimo tempus. Fotosintezės metu naudojamas ^{12}C (sudaro didžiąją dalį CO_2) įeina į organinės medžiagos sudėtį. Kai vyksta spartus organinės anglies laidojimas, šios izotopiškai lengvos nuosėdos yra palaidojamos ir esant deguonies trūkumui jos išvengia suskaidymo. Izotopiškai lengva anglis negražinama į aplinką. Tokiu būdu atmosferoje ir vandenyje kaupiasi anglies izotopas ^{13}C , kuris yra sunkesnis ir sudaro labai mažą CO_2 dalį. Fitoplanktonas, kuris taip pat fotosintezės metu naudoja CO_2 , asimiliuoja šį izotopiškai sunkesnę ^{13}C . Esant deguonies trūkumui, žuvęs fitoplanktonas kaupiasi vandenyno dugne, sudarydamas izotopiškai sunkias organines nuosėdas. Toks staigus anglies izotopų $^{12}\text{C} / ^{13}\text{C}$ santykio kitimas stratigrafiniuose jūros sluoksniuose reiškia padidėjusį organinės anglies laidojimą. Tai leidžia sudaryti bendrą vaizdą apie deguonies kiekio didėjimą ir mažėjimą atmosferoje geologiniame laike. [31]

Anglies izotopų buvimas fosilijose bei jų pasiskirstymas nuosėdinėse uolienose parodo akivaizdų CO_2 ir O_2 koncentracijų pokytį atmosferoje per ilgą laiko tarpą. Aišku, jog negalima tiksliai pavaizduoti deguonies koncentracijų kitimą Žemės istorijoje, nes šį pokytį dar lėmė daugelis papildomų veiksnių. Tačiau yra nuomonių, jog deguonies kiekis karbono periodu pasiekė didžiausią koncentraciją. Keletas apytikrių apskaičiavimų iškelia prielaidą, jog tuo metu deguonies koncentracija atmosferoje buvo dvigubai didesnė nei dabartinėje atmosferoje. [31]

3. Organinės medžiagos kiekio ryšys su atmosferos dujų kiekio pokyčiais

Spėjama, jog esant dideliame deguonies kiekiui atmosferoje, veikia tam tikros atsakomosios reakcijos, kurios neigiamai veikia procesus, atsakingus už deguonies koncentracijų padidėjimą atmosferoje. [22]

J. M. Robinson savo veikale pateikia keletą veiksnių, kurie gali neutralizuoti O₂ kaupimąsi atmosferoje: 1) pirminės produkcijos mažėjimas dėl šalčio ir CO₂ „bado“; 2) organizmų, kurie gali suskaidyti sunkiai skaidomą biomasę evoliucija; 3) grįžimas atgal prie lengviau skaidomų biomasės formų; 4) klimatiniai epizodai nepalankūs organinės anglies laidojimui; Galiausiai mikroorganizmų sąjungos įgauna gebėjimą geresniam augalų biomasės skaidymui, mažėjantis lignino kiekis šioje biomasėje, paleoklimatiniai bei paleogeografiniai veiksniai prisidėjo prie efektyvesnio lignino skaidymo. Tokios sąlygos lėmė lėtesnį organinės anglies laidojimą, o tuo pačiu ir mažesnį deguonies kiekio pagaminimą. Deguonies paviršiaus oksidacijai buvo suvartojama daugiau nei jo pagaminama fotosintezės metu, todėl deguonies koncentracija atmosferoje gali mažėti. [27]

T. M. Lenton teigia, jog dėl augančio deguonies kiekio nukenčia augalai, ypač lėtai regeneruojantys miškai. Didėjantis atmosferos deguonies lygis slopina fotosintetinę anglies fiksaciją ir lėtina augalų vegetaciją. Šie veiksniai stabilizavo deguonies kiekį atmosferoje, nes sumažėjo fosforo išplovimo ir organinės anglies laidojimo greitis. Fosforo išplovimo nuslopinimas sumažina šio elemento tiekimą į sausumą ir vandenyną. Po to seka jūros ir sausumos produktyvumo mažėjimas ir lėtesnis organinės anglies laidojimas. Tai atsakomoji reakcija, kuri neleidžia didėti deguonies koncentracijoms atmosferoje. Mažėjantis deguonies kiekis neutralizuojamas padidėjusiu augalų augimu, pagreitėjusiu uolienų išplovimu ir fosforo tiekimu į sausumą bei vandenyną, kas turi įtakos didesniai organinės medžiagos laidojimo greičiui. Manoma, jog šie deguonies reguliacijos mechanizmai, kurie palaiko pastovų deguonies kiekį atmosferoje, yra patys efektyviausi iš pasiūlytų mechanizmų šiuo metu. [22]

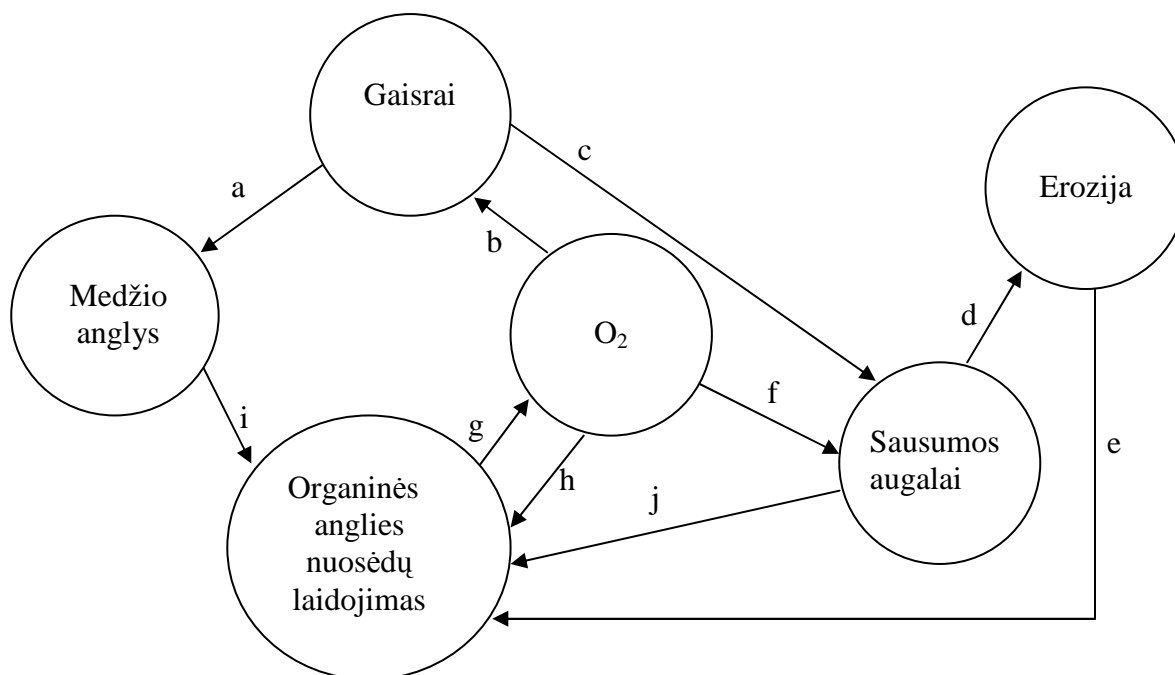
T. M. Lenton iškelia prielaidą, kad augalai atlieka deguonies reguliacijos vaidmenį. Manoma, jog dėl gaisrų sukeltų ekosistemos sudėties pasikeitimų silpninama lignino gamyba. Tokiu būdu mažėja šios medžiagos kiekis palaidotoje organinėje anglyje. Augantis deguonies kiekis taip pat sustiprina lignino suskaidymą jį skaidančių organizmų. Žalingas deguonies kiekio didėjimas

neigiamai veikia augalų augimą. Dėl lėtesnio augalų augimo palaidojama mažiau organinės medžiagos. [22]

J. A. Raven sutinka su T. M. Lenton hipoteze, kad augalai atlieka deguonies reguliacijos vaidmenį. Jis teigia, jog aukšta O₂ koncentracija atmosferoje galėjo sumažinti fotosintezės bendrąjį neto dėl padidėjusio fotokvėpavimo, kurio metu sunaudojamas O₂, o CO₂ atpalaiduojamas. Dėl padidėjusio fotokvėpavimo tempo, sumažėja didelio CO₂ kiekio sunaudojimas fotosintezės metu. Tokiu būdu atmosferoje O₂ kiekis mažėja. Šis O₂ ciklas įrodo, jog fotosintezė kontroliuoja šių dujų kiekį atmosferoje. Į O₂ ciklą įeinantis organinės anglies laidojimas bei tektoninio aktyvumo metu į žemės paviršių iškeltos senos organinės medžiagos oksidacija taip pat įtakojama fotosintezės greičio. [24]

Kaip jau minėta, deguonies augimas padidina gaisrų tikimybę. To priežastis biomasės sumažėjimas, o tai lemia mažesnę organinės anglies laidojimą ir tuo pačiu mažesnę deguonies produkciją (b – c – j – g ciklas, 3 pav.). Tai būtų neigiama sąveika tarp augalijos ir deguonies kiekio atmosferoje. Kita neigiama sąveika būtų f – j – h ciklas. Tai deguonies neigiamas grįžtamasis ryšys augalams per fotokvėpavimą. Esant dideliame deguonies kiekiui atmosferoje, fotosintezė sulėtėja, o organinės medžiagos laidojimas vyksta lėčiau nei jos skaidymas, todėl deguonies kiekis atmosferoje mažėja. Tačiau R. A. Berner, remdamasis medžio anglių fosilinėmis sanaujomis, teigia, jog gaisrų dažnumas galėjo teigiamai įtakoti deguonies kiekį atmosferoje. Medžio anglis yra daug atsparesnė biologiniam irimui, nei augalų biomasė. Tokiu būdu suanglėjusi augalų biomasė padidina organinės medžiagos išsaugojimą. Susidarant daugiau medžio anglių gaisrų metu, kurios palaidojamos organinės anglies pavidalu, teigiamai veikia deguonies kiekio augimą atmosferoje (b – a – i – g ciklas, 3 pav.). Teigiamą gaisrų poveikį R. A. Berner aiškina dar ir tuo, jog sunaikinus augaliją gaisro metu, pagreitėja dirvožemio erozija ir medžiagų išplovimas į vandenį. Tai lemia didesnę pirminės produkcijos produktyvumą, o tuo pačiu ir spartesnę organinės anglies laidojimą. Deguonies produkcija didėja (b – c – d – e – g ciklas, 3 pav.). [3]

Augalų, gaisrų ir deguonies atsakomosios reakcijos



4 pav. Diagrama vaizduojanti gaisrų poveikį O₂ ciklui. [3]

J. C. G. Walker savo veikale teigia, jog biomasės augimas įtakoja bedeguonės aplinkos didėjimą ir geresnes organinės medžiagos laidojimo sąlygas. Tokiu būdu O₂ koncentracija atmosferoje auga, kol aplinka iš bedeguonės virsta oksiduota, o organinės medžiagos laidojimo greitis atitinka O₂ kiekio suvartojimą erozijos ir išplovimo procesų metu. Autoriaus teigimu deguonies atsargos ir išteklių yra pusiausvyros būsenoje, t. y. šaltiniai ir deguonies sunaudojimas yra vienodi, o išteklių per laiko tarpą nesikeičia. Kadangi CO₂ prisideda prie atmosferos „šiltnamio efekto“, tai tikėtina, jog padidėjus O₂ koncentracijai atmosferoje, klimatas taptų daug vėsesnis. Šis CO₂ sumažėjimas tęstųsi tol, kol O₂ atsargos įgytų pusiausvyrą būklę. Tačiau O₂ nuolatinio kiekio pokyčio duomenys nėra pakankamai patikimi, kad būtų galima nustatyti ar ši prielaida yra teisinga. Vis dėlto autorius teigia, jog per geologinio laiko tarpus sistema turėjo vystytis įgyjant pastovią būklę. [33]

J. C. G. Walker mano, jog būtų žymiai mažesnis O₂ kiekis atmosferoje, jei nebūtų keitėsis fotosintezės greitis. Greitis per kurį O₂ sunaudojamas uolienų oksidacijai galėtų būti sumažintas, jei bendras O₂ suvartojimas sulėtėtų (uolienos iš redukuotų taptų oksiduotomis), tačiau šis greitis dažniausiai priklauso nuo to, kaip greit erozijos ir antspūdžio metu į Žemės paviršių iškeliamos naujos – redukuotos uolienos. Esant mažesniai O₂ kiekiui, galima tikėtis daug didesnių

bedeguonių plotų vandenyno gilumoje. Dėl šios priežasties yra didesnė galimybė organinei medžiagai būti palaidotai vandenyno dugne, taip išvengiant biologinės oksidacijos. Taigi O₂ sumažėjimas atmosferoje yra gera sąlyga laidojimo greičiui pralenkti išplovimo greičius: bendras deguonies išteklių kiekis viršijo suvartojimo kiekį ir O₂ galėjo kauptis atmosferoje. Per didelis O₂ kiekis atmosferoje turėjo priešingą poveikį. Autorius teigia, kad O₂ kiekis kelių milijonų metų laikotarpyje įgijo vertę, kuri palaiko organinės medžiagos laidojimo greitį pusiausvyroje su Žemės pluta sudarančių redukuotų junginių oksidacijos tempais. Vandenynų cirkuliacijos bei baseino ir dubens formų pasikeitimas galėjo prisidėti prie deguonies neturinčios aplinkos formavimosi vandenynų giliuosiuose sluoksniuose. Kas padidino organinės medžiagos laidojimo greitį, o tai lėmė deguonies kaupimąsi atmosferoje. Biosferos vystymasis šiam procesui (O₂ kaupimasis atmosferoje) taip pat turėjo turėti įtakos. [33]

L. S. Stanley pateikia įdomų teiginį, t. y. augalų atsakomąją reakciją į CO₂ kiekio padidėjimą atmosferoje. Augalai CO₂ naudoja fotosintezės metu kaip „maistą“, taigi šių dujų koncentracijos padidėjimas „patręšia“ augalus. Miškai, aktyvios fotosintezės metu, tuojau pat padidina savo biomasę. Augalų biomasė yra organinės anglies šaltinis ir šio šaltinio dydžio padidėjimas sumažins CO₂ kaupimosi tempą atmosferoje. Šis augalų tręšimas yra neigiamas grįžtamasis ryšys CO₂ kiekio padidėjimui atmosferoje. Be to miškų augimas spartina mineralinių medžiagų išplovimą, o tai dar vienas procesas mažinantis šių dujų kiekį atmosferoje. [31]

Daugelis specialistų pripažįsta, kad gyvybė galėjo būti pagrindiniu veiksniumi, kuris nulėmė klimato pasikeitimus ir „šiltnamio efekto“ dujų koncentracijas. Viena hipotezė aiškina, kad maistingųjų medžiagų išplovimas iš žemynų į vandenyną skatino fitoplanktono augimą. Dėl šių, nuotėkio metu atneštų maistingųjų medžiagų, vandenyne susidarė didelis kiekis biomasės. Daugelio fitoplanktono rūšių didelę masės dalį sudaro kalcio karbonato turinčios kriauklės, todėl padidėjęs fitoplanktono produktyvumas vis didesnę kiekį suvartodavo CO₂. Dėl šios priežasties CO₂ kiekis pirmiausiai sumažėjo vandenyne, o paskui ir atmosferoje. Tuo pačiu metu vyravę borealiniai miškai, kurie fotosintezei suvartodavo 10 – 20% atmosferos CO₂ kiekio, buvo išnaikinti per ledynmetį. Dideli anglies kiekiai papildė dirvožemį, kur vėliau galėjo būti palaidoti kaip organinė medžiaga. Tokiu būdu CO₂ koncentracijos atmosferoje galėjo grįžti prie buvusio ankstesnio lygio. Vandenynų padidėjusio biologinio produktyvumo teigiamų atsakomųjų reakcijų sistema (CO₂ kiekis atmosferoje mažėja) buvo atsvara neigiamų atsakomųjų reakcijų sukeltam miškų išnaikinimui (dirvožemį papildžiusi anglis gražinama į sistemą). Šiuo atveju neigiamos grįžtamasis reakcijos įgauna teigiamą reikšmę. Ledynmečio ir tarpledynmečio metu gyvybės funkcijos veikė priešingai: teigiamų atsakomųjų reakcijų pagreitinimas vyko greičiau nei jų silpninimas, ar neigiamų grįžtamųjų reakcijų veikimas. Schneider teigia, jog tokie pavyzdžiai įrodo klimato bei gyvybės koevoliuciją. [1]

Ne visi specialistai pritaria šiai hipotezei, kad gyvybė nulėmė klimato pasikeitimus ir „šiltnamio efekto“ dujų koncentracijas. J. C. G. Walker, Caldeira ir Arthur teigia, jog CO₂ kiekio pusiausvyra pirmiausiai palaikoma uolienų išplovimo neigiama grįžtamąja reakcija klimatui. Esant didesniam CO₂ kiekiui atmosferoje pakyla globalios vidutinės temperatūros, klimatas šiltėja ir Žemėje pasireiškia „šiltnamio efektas“. Klimatui atšilus kritulių kiekis padidės ir dėl CO₂ sąveikos su vandeniu, susidarę rūgštūs lietūs pagreitins uolienų ardymą ir išplovimą. Tokiu būdu bus suvartotas CO₂ perteklius atmosferoje ir grįžtama prie pusiausvyros tarp atmosferos ir uolienų anglies išteklių.[4]

4. Atmosferos evoliucijos modeliai

Spėjimai apie Žemės atmosferos sudėtį tolimoje praityje tęsėsi ilgą laiką, tačiau net ir dabar nėra aiškūs kai kurie aspektai. Dažniausiai sutariama dėl to, jog iš pradžių atmosfera buvo sudaryta iš labai mažo kiekio deguonies arba tuo metu išvis atmosferoje jo nebūta. Taip pat sutariama dėl to, jog deguonies koncentracijos sparčiai keitėsi prieš 2,0 mlrd. metų. Nesutariama tik dėl tikslaus laiko kada deguonies lygis atmosferoje pradėjo kilti ir sąlygų šiam procesui vykti. [17]

Daugelis biologinio aktyvumo akivaizdžių įrodymų, tai aukštas slėgis dabartinėje atmosferoje (pradinis deguonies slėgio stadijos atsiradimas atmosferoje pasireiškė prieš 1,8 - 2,0 mlrd. metų). Praėjo daug laiko, kol buvo suprasta, jog fotosintezė sukėlė organinės anglies laidojimą. Nors dar nėra aišku organinės anglies laidojimo greitis buvo priežastis ar rezultatas deguonies kiekio augimui atmosferoje. Dėl ozono faktoriaus sutinkama, jog jis lėmė deguonies kiekio augimą. [23]

Klausimą, kada pradėjo kilti atmosferinio deguonies lygis, galime užduoti geologams. Pirmasis į šį klausimą bandė atsakyti P. E. Cloud. Jis pateikė modelį, kurio laikomasi tiriant deguonies lygį atmosferoje. [23]

P. E. Cloud pateikia modelį, kuriame deguonis augo keturiom pakopom: 1) deguonies mažėjimo pakopa; 2) dvi oksidacijos pakopos ir 3) aerobinė pakopa. J. F. Kasting pateikė šį modelį šiek tiek pakoreguotą. Jis teigė, kad viena oksidacijos pakopa galėjo pasišalinti. [23]

J. F. Kasting Trijų – dėžių (Three – box) modelis: pirma pakopa – atmosfera ir visi vandenynai stokojo deguonies, bet galimos išimties, t.y. lokalizuotos deguonies oazės aukšto produktyvumo vandenynų paviršiaus regionuose; antra pakopa – atmosfera ir vandenynų paviršius buvo oksiduoti (gilesniuose vandens sluoksniuose deguonies trūkumas); trečia pakopa – atmosferoje ir vandenyne nusistovi laisvo deguonies kiekis ir jis yra toks, koks egzistuoja šiuo metu. Keletas teorinių deguonies kiekio apskaičiavimų gali būti nebaigti, kadangi antroje pakopoje deguonies lygis negalėjo greitai augti, nes deguonies praradimas buvo didesnis nei jo pagaminimo greitis. Trečioje pakopoje gilių vandenynų dugnas turi labai mažą kiekį deguonies, galima sakyti, jog čia vyrauja bedeguonės sąlygos. To priežastis redukuotų medžiagų paleidimas per hidroterminius plyšius. [23]

I Redukuota aplinka		II Oksiduota aplinka	III Aerobinė aplinka
Atmosfera R		Atmosfera O	Atmosfera O
Vandenyno paviršius R	O	Vandenyno paviršius O	Vandenyno paviršius O
Vandenyno gelmė R		Vandenyno gelmė R	Vandenyno gelmė O
		Laikas →	

5 pav. Trijų – dėžių (Three – box) modelis, rodantis atmosferos deguonies augimo stadijas (O - oksidacinės sąlygos; R - redukcinės sąlygos). I stadijoje, esantis O rodo kai kur paplitusias vietines vandens oazes. [17]

J. C. G. Walker iškelia prielaidą, kad Trijų – dėžių modelyje perėjimas iš redukuotos atmosferos į oksiduotą (iš pirmos pakopos į antrą), galėjo įvykti tik tada, kai bendrasis kiekis fotosintezės metu pagaminamo deguonies kiekis buvo didesnis nei jo suvartojimas oksidacijai uolienu išplovimo metu. Sumažėjęs vulkanų aktyvumas taip pat galėjo pagreitinti perėjimą į oksiduotą atmosferą. Priežastis perėjimo iš antros pakopos į trečią galėjo būti padidėjęs anglies laidojimas, kuris susijęs su padidėjusiu žemynų šelfų plotu. [23]

Dėl Trijų – dėžių (Three – box) modelio pirmoje stadijoje esančių redukcinių sąlygų P. E. Cloud, J. F. Kasting ir J. C. G. Walker vienodos nuomonės, nors J. F. Kasting nagrinėja galimas aukšto deguonies lygio oazes vandenynų paviršiuje, kurios atsirado fotosintetikų padidėjusio produktyvumo vietose. Tačiau nei P. E. Cloud, nei J. C. G. Walker modelio pirmoje pakopoje nenagrinėja tokių galimų deguonies oazių. Antroje pakopoje P. E. Cloud išskiria dvi oksidacines stadijas, t. y. deguonies sunaudojimas redukuotų Žemės plutos junginių oksidacijai bei deguonies kiekio augimas, sumažėjęs šių redukuotų junginių kiekiui Žemės plutoje. J. F. Kasting ir J. C. G. Walker nurodo, jog oksidacines sąlygas antroje pakopoje lėmė padidėję fotosintezės greičiai, ir sulėtėję uolienu išplovimo tempai. J. C. G. Walker teigia, jog susilpnėjusi vulkanų veikla taip pat turėjo įtakos deguonies kiekio augimui antroje pakopoje. P. E. Cloud ir J. F. Kasting vulkanų veiklos įtakos deguonies kiekiui aplinkoje nenagrinėja. Trečioje pakopoje vyrauja oksidacinės sąlygos, nors J. F. Kasting teigia, jog vandenynų dugne beveik deguonies nėra, nes jis sunaudojamas redukuotų dujų oksidacijai, kurios čia patenka per hidroterminius plyšius. P. E. Cloud ir J. C. G. Walker modelio trečioje pakopoje neišskiria anoksinių sąlygų vandenynų dugnuose ir veiksmių įtakojančių bedeguones aplinkas. J. C. G. Walker trečios pakopos aerobines sąlygas sieja ne tik su padidėjusiu organinės anglies laidojimu, bet ir padidėjusiu žemynų šelfų plotu, kuris įtakojo laidojimo greičius. P. E. Cloud ir J. F. Kasting modelyje nagrinėja tik

organinės anglies laidojimo įtaką aerobinėms sąlygoms trečioje pakopoje, tačiau į žemynų šelfų plotų padidėjimą ir šio veiksnio deguonies koncentracijų įtakojimą aplinkoje neatsižvelgia. Kiekvienas iš specialistų skirtingai aiškina Trijų – dėžių (Three – box) modelio pakopų perėjimą iš redukcinių sąlygų į oksidacines ir priežastis lėmusias šias sąlygas.

R. A. Berner ir D. E. Canfield deguonies kiekį geologiniame laike nustato teoriniais apskaičiavimais. Jie pateikia lygtį deguonies kiekio pokyčio apskaičiavimui per laiką:

$$dO_2/dt = F_{bg} - F_{wg} + 15/8 (F_{bp} - F_{wp})$$

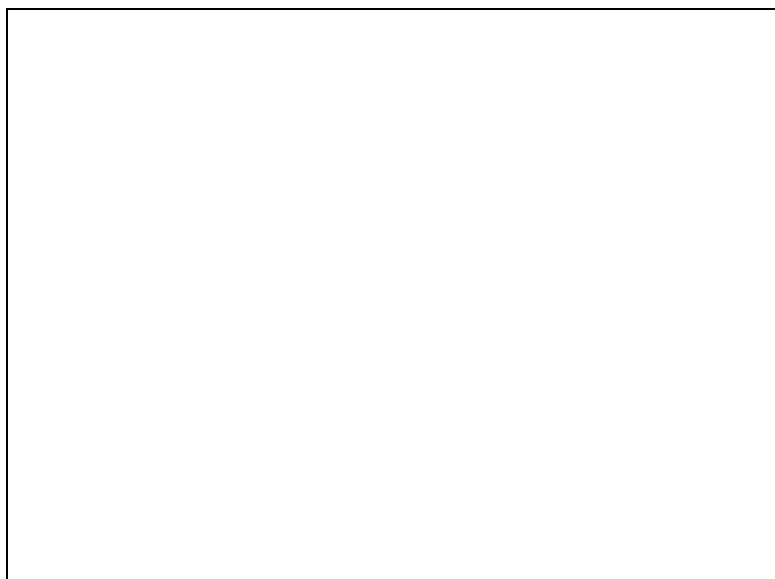
Kur F_{bg} – tai organinės anglies laidojimo greitis; F_{wg} – oksidatyvus organinės anglies išplovimas plius redukuotų, savo sudėtyje anglies turinčių dujų oksidacija diagenozės, metamorfizmo ir vulkanizmo metu; F_{bp} – piritu (FeS_2) laidojimo tempas nuosėdose; F_{wp} – oksidatyvus piritu išplovimas plius redukuotų, savo sudėtyje sieros turinčių dujų oksidacija diagenozės, metamorfizmo ir vulkanizmo metu; $15/8$ – tai stochiometrinė išraiška, kuri remiasi piritu oksidacijos išplovimo metu lygtimi ($2Fe_2O_3 + 8SO_4^{2-} + 16H^+ \leftrightarrow 15O_2 + 4FeS_2 + 8H_2O$). Norint apskaičiuoti deguonies kiekį per tam tikrą laiką, reikia žinoti F_{bg} , F_{wg} , F_{bp} ir F_{wp} pokyčius. Šie pokyčiai apskaičiuojami, remiantis „uolienu gausos“ ir masių balanso metodais. „Uolienu gausos“ metodas apima kiekybinį organinės anglies ir piritu kiekio įvertinimą Fanerozojaus nuosėdinėse uolienose, kas parodo globalius sedimentacijos greičius. R. A. Berner ir Canfield iškelia prielaidą, jog padidėjęs organinės medžiagos ir piritu laidojimas turėjo būti kompensuojamas padidėjusio išplovimo - erozijos tempo ir po to sekančių didesnių globalių sedimentacijos greičių.



6 pav. O_2 koncentracijos apskaičiuotos, remiantis uolienu gausos modeliu. Viršutinė ir apatinė linija rodo galimas paklaidų ribas. [3]

Paveiksle matomą maksimalią O₂ koncentraciją permo – karbono periodais įtakojo padidėjęs organinės medžiagos laidojimo greitis, dėl kurio uolienose randamos, didelį akmens anglies kiekį turinčios nuosėdos. [3]

Masių balanso metodo Fbg, Fwg, Fbp ir Fwp pokyčių apskaičiavimai remiasi anglies (¹³C/¹²C) ir sieros (³⁴S/³²S) izotopų sudėtimi vandenynų kalcio karbonatų (CaCO₃) ir kalcio sulfatų (CaSO₄) nuosėdinėse uolienose. Vandenynų ¹³C/¹²C izotopų santykio pokytis, vaizduoja globalios fotosintezės greičių pokyčius. Padidėjęs organinės medžiagos ir piritito laidojimas pašalina lengvesnius ¹²C ir ³²S izotopus, todėl vandenynuose kaupiasi sunkesni ¹³C ir ³⁴S izotopai.



7 pav. O₂ koncentracijos, apskaičiuotos naudojant izotopų masių balanso modeliavimą. [3]

Paveiksle aukštas O₂ lygis permo – karbono periodais, paaiškinamas aukštomis vandenynų karbonatų ¹³C/¹²C vertėmis, kurias lėmė didelis organinės medžiagos laidojimas šiuo laikotarpiu. [3]

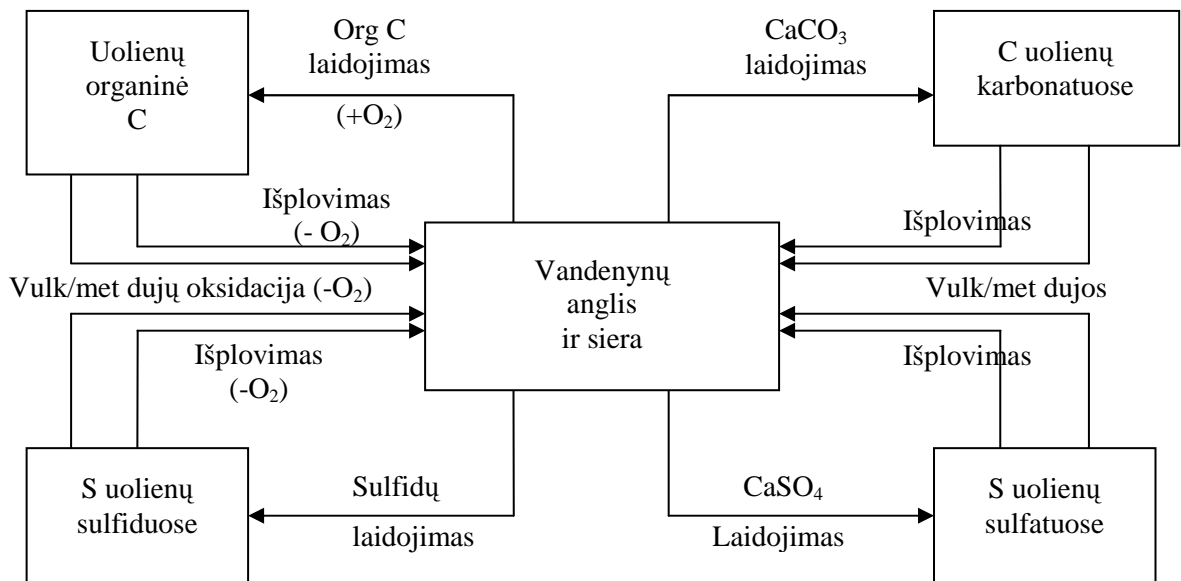
Šie teoriniai „uolienų gausos“ ir masių balanso apskaičiavimai parodo, kad atmosferos deguonis kiekis kito pastebimai Fanerozojaus laikotarpiu: karbono periodu (prieš ~350 mln. metų) deguonies kiekis atmosferoje pasiekė ~ 35% , triase (prieš ~ 200 mln. metų) jis nukrito iki ~ 15% ir augo vėl iki ~ 27% kreidos – ankstyvojo terciaro periodais (prieš ~ 50 mln. metų). R. A. Berner ir Canfield neatmeta galimybės, jog toks aukštas deguonies kiekis atmosferoje galėjo būti priežastis didesnių, netgi katastrofinių gaisrų. Tokio aukšto deguonies kiekio pagrindinė priežastis, kaip jie teigia, tai spartus sausumos sumedėjusių augalų augimas ir jį lydintis padidėjęs globalus organinės medžiagos laidojimas. Jų manymu, aukšta deguonies koncentracija atmosferoje siejama su karbono – permo periode egzistavusiais gigantiškais

vabzdžiais. Vabzdžių kūno dydis galėjo augti tik su aukštesniu atmosferos deguonies lygiu. Be to jie turėjo gerai išsivysčiusią trachėjinę kvėpavimo sistemą ir galėjo skraidyti, kas patvirtina, jog deguonies kiekis tuo metu turėjo būti pakankamai aukštas. [3]

Šiuo metu daugelis specialistų nesutinka su šia deguonies kiekio maksimalia verte, nes ji nesuderinama su vyravusiu miškų gausumu. Augantis deguonies kiekis skatina gaisrų dažnumą ir intensyvumą, o tai reikštų, jog biomasė turėtų mažėti, nes ekosistemos turėjo būti atstatomos. Be to, augantis deguonies kiekis tiesiogiai slopina C_3 – augalų fotosintetinę anglies asimiliaciją. Taigi ne tik biomasės augimas sustabdytas, bet kartu ir fosforo išplovimo intensyvumas, bei organinės anglies laidojimas. Tokiomis sąlygomis deguonies kiekis atmosferoje augti negalėtų. Modelių numatyta maksimali deguonies vertė parodo, jog sudarant modelius, nėra įtraukiami svarbiausi mechanizmai, kurie stabilizuoja atmosferos deguonies išteklius. [22]

Naujesni modeliai numato deguonies svyravimą nuo 15% iki 25% (prieš 350 mln. metų). Su tokiomis deguonies kitimo koncentracijomis sutinka ir Gėjos hipotezės šalininkai. Jie remiasi gaisrų ir tyrimų su jais išvadomis, jog deguonies kiekis nepakito nuo 15% iki 25%. Esant mažesniais deguonies kiekiui nei 15%, nesudega nei miško mediena, nei popierius. Dar vienas įrodymas, jog deguonies 15% ribinė vertė yra minimali - tai gausiai randama medžio anglis Devono fosilinėse iškasenose. Iškasama fosilinė medžio anglis rodo, kad prieš 350 mln. metų O_2 kiekis buvo pakankamas palaikyti natūralius gaisrus. Tačiau plačiai paplitę miškai rodo, jog gaisrai negalėjo dažnai kartotis, nes sutrukdytų jų regeneraciją. [22]

Deguonies kiekio apskaičiavimui geologiniame laike, buvo sukurtas Dėžės (Box – model) modelis.



8 pav. Dėžės (Box - model) modelis, apskaičiuojantis kintamųjų pokyčio svyravimus laike, kurie turėjo įtakos deguonies kiekiui atmosferoje. Kiekviena dėžė ir pokytis vaizduoja bendrą anglį ar sierą ir ^{13}C arba ^{34}S izotopus. Degazacijos ir išplovimo pokyčiams pavaizduoti naudojamas vienas terminas “išplovimas”. (+ O_2) ir (- O_2) simbolizuoja deguonies papildymą ar jo sunaudojimą atmosferoje. [3]

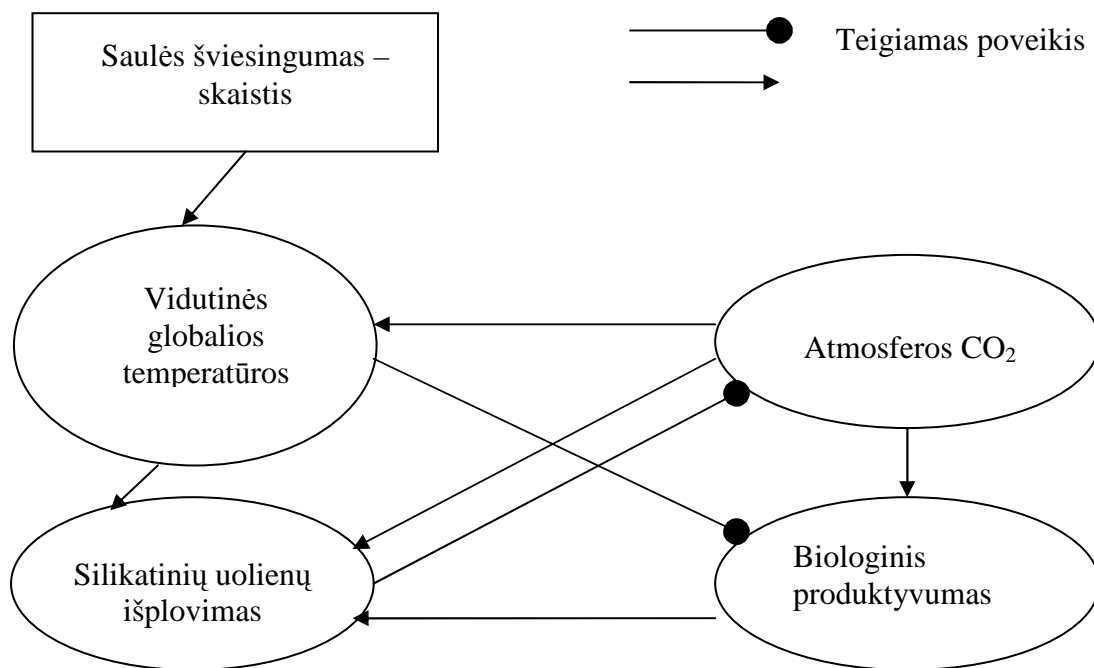
Išplovimo greičiai, terminis uolienu skaidymas bei organinės medžiagos, piritu, kalcio – magnio karbonatų, kalcio sulfatų laidojimas ir jų kiekio pokytis Fanerozojaus eone, gali būti nustatomas masių balanso išraiška bendrai angliui bei sierai ir ^{13}C , ^{34}S izotopams. Bendras izotopų sudėties keitimasis jūros vandenyje per laiko tarpą, vaizduoja pusiausvyrą tarp išplovimo, anglies dioksido tiekimo terminės degazacijos metu bei jo sunaudojimo nuosėdų laidojimui greičių ir izotopų sudėties. Išplovimo tempai, degazacijos ir laidojimo greičiai praeityje gali būti apskaičiuojami, remiantis vandenynų izotopų sudėties pasikeitimais per laiko tarpą. Supaprastinant šį apskaičiavimą, išplovimas ir terminė degazacija yra vaizduojama bendrai kaip išplovimas, o bendra Žemės plutos anglis ir siera laikoma „užkonservuota”, nes mažas anglies kiekis papildantis vandenyną, kuris atsiranda dėl organinės medžiagos laidojimo ir išplovimo greičių nevienodumo, atitinka ekvivalentų kalcio karbonatų formavimąsi ar jų praradimą diagenozės metu. Siera laikoma „užkonservuota” dėl ekvivalentaus piritu bei kalcio sulfatų formavimosi ir jų suskaidymo. Bet koks didelis skirtumas tarp bendro keitimosi oksiduotų ir redukuotų anglies išteklių, privalo netrukus būti panaikinami, arba įgyti pusiausvyrą su priešingais pokyčiais tarp oksiduotų ir redukuotų sieros rezervų. Tokiu būdu išvengiama

didelių atmosferos deguonies kiekio svyravimų, kurie neleistų palaikyti aukštesnes gyvybės formas per geologinį laiką. [3]

S. Franck ir kt. sudarinėdami globalų anglies ciklo modelį, remiasi geodinamine teorija. Jie sujungia dviejų vidinių geodinaminių jėgų funkcijas, t. y. žemynų ploto dydis, kuris nulemia uolienu išplovimo tempą ir žemynų paplitimas, turintis įtakos CO₂ paleidimo (vulkanizmo ir metamorfizmo metu) į atmosferą pokyčiui (daugelyje modelių į šį veiksni neatsižvelgiama). Kaip teigia mokslininkai, šių funkcijų sujungimas teikia papildomas atsakomąsias reakcijas anglies ciklui. [13]

CO₂ kiekio pokytis atmosferoje turėjo įtakos „šiltnamio efektui“ ir globalioms vidutinėms temperatūroms ir atlieka svarbų vaidmenį ilgai trunkančioje Žemės savireguliacijos sistemoje. Todėl labai svarbu išnagrinėti anglies ciklą tarp įvairių išteklių, esančių Žemės paviršiuje ir jos viduje. S. Franck ir kt. tvirtina, jog globalus anglies ciklas yra pagrindinis mechanizmas sumažinęs CO₂ kiekį atmosferoje ir tokiu būdu sušvelninęs padidėjusio Saulės šviesingumo poveikį. Šiame procese karbonatų – silikatų geocheminis ciklas, kuris susideda iš tokių procesų, kaip: žemynų Ca – Mg – silikatų išplovimas, Ca – Mg – karbonatų nusodinimas vandenynuose, karbonatų metamorfizmas ir CO₂ degazacija, sudaro dalį globalaus anglies ciklo. [13]

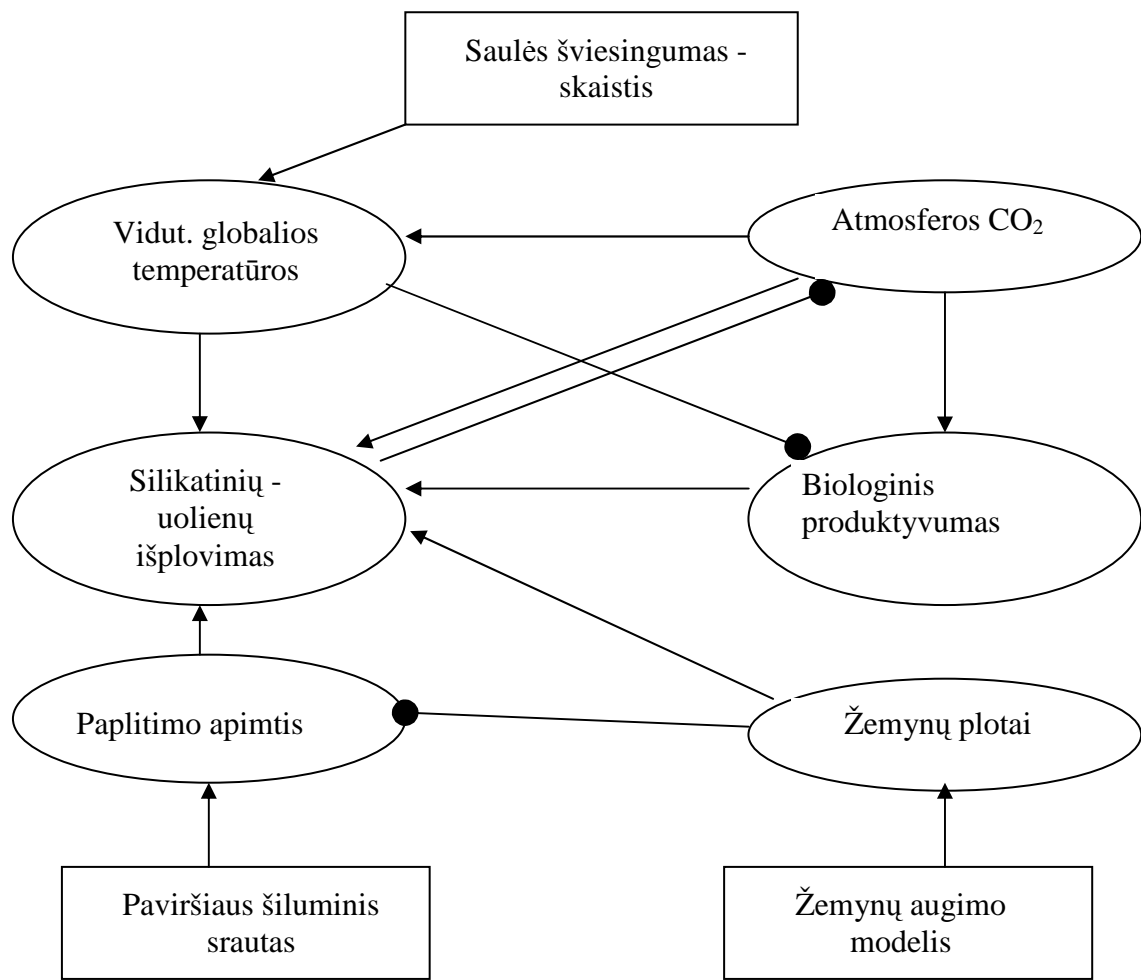
D. C. Caldeira ir J. F. Kasting pasiūlė paprastą Žemės sistemos modelį. Šiame modelyje parodoma kaip Žemės sistema reaguoja į augantį Saulės šviesingumą (skaistį). [13]



9 pav. Teigiamieji ir neigiamieji grįžtamieji ryšiai Žemės sistemos modelyje. [13]

Šį modelį aiškina taip: dėl didesnio Saulės šviesingumo didėja paviršiaus temperatūra, o aukštesnės temperatūros skatina greitesnį silikatinių uolienu išplovimą, tačiau neigiamai veikia biologinį produktyvumą. Kadangi dėl aukštos temperatūros silikatinių uolienu išplovimas padidėja, tai atmosferos CO₂ kiekis atitinkamai mažėja, nes jis sunaudojamas nuosėdų susidarymui. Mažėjant CO₂ kiekiui atmosferoje kartu mažėja ir paviršiaus temperatūra bei išplovimo tempai. Taigi šis modelis rodo koks yra stiprus grįžtamasis ryšys tarp silikatinių uolienu išplovimo ir CO₂ kiekio atmosferoje. [13]

S. Franck ir kt. šį Žemės sistemos modelį papildė, prijungdami žemynų augimą ir paplitimą, kaip pagrindinius geodinaminius procesus, kurie veikia Žemės sistemą. Modelis pabrėžia kontinentų didėjimo ir paplitimo svarbą silikatinių uolienu išplovimui. Skirtingai, nei Caldeira ir J. F. Kasting pasiūlytame modelyje, kur silikatinių uolienu išplovimas yra pastovus per laiko tarpą, S. Franck ir kt. laiko, jog išplovimo pokytis yra pusiausvyroj su vulkanizmo ir metamorfizmo metu paleistu CO₂ pokyčiu. [13]



10 pav. Žemės sistemos modelio teigiamieji (→) ir neigiamieji grįžtamieji ryšiai. [13]

Žemės sistemos modelis, pasiūlytas D. C. Caldeira ir J. F. Kasting bei S. Franck ir kt., svarbiausią reikšmę CO₂ koncentracijų reguliavimui atmosferoje skiria uolienu išplovimo greičiams ir padidėjusiam Saulės skaisčiui. Kuriant modelius, modeliuotojai nenagrinėja biosferos įtakos šių dujų kiekiui atmosferoje. Sudėtingesnis GEOCARB modelis, pasiūlytas R. A. Berner, kaip ir Žemės sistemos modeliai CO₂ lygiui įvertinti nagrinėja padidėjusio Saulės skaisčio (taip pat nagrinėjamas padidėjusio Saulės skaisčio poveikis hidrologinio tinklo reguliacijai) ir uolienu išplovimo greičių įtaką šių dujų koncentracijoms. Taip pat R. A. Berner savo modelyje įtraukia S. Franck pasiūlytą geodinaminę teoriją, t. y. žemynų plotų dydžių pokytį, kuris nulemia uolienu išplovimo tempus ir žemynų išplitimą, nuo kurio priklauso CO₂ paleidimo į atmosferą pokytis diagenzės, metamorfizmo ir vulkanizmo metu. R. A. Berner taip pat nagrinėja žemynų padėties poveikį temperatūroms bei kalnų iškilimą nuo kurių irgi priklauso išplovimo greičiai, o tuo pačiu ir atmosferos CO₂ koncentracijos. Žemės sistemos modelis šių veiksnių poveikio CO₂ lygio pokyčiui nenagrinėja. Priešingai nei Caldeira, J. F. Kasting bei S. Franck ir kt., R. A. Berner GEOCARB modelyje svarbiausią reikšmę išplovimo tempams skiria

biologiniams veiksniams, o taip pat nagrinėja organinės medžiagos kaupimosi įtaką atmosferos CO₂ kiekio reguliavimui.

GEOCARB modelis, yra skirtas ilgalaikio anglies ciklo sudarymui. Modelis vaizduoja Fanerozojaus atmosferos CO₂ koncentracijų kaitą, apskaičiuojant kintančius CO₂ šaltinius ir sunaudojimo tempus. Modelis sudaromas įtraukiant tokius kiekybinius parametrus, kaip: atmosferos CO₂ suvartojimas per silikatinių ir karbonatinių uolienuų išplovimą žemynuose, karbonatų mineralų ir organinės medžiagos nusėdimas jūros nuosėdose, CO₂ paleidimas į atmosferą per organinės anglies išplovimą ir degazaciją (karbonatinių uolienuų ir organinės medžiagos suskaidymas vulkanizmo, diagenozės ir metamorfizmo metu). Priešingai nei prieš tai tai minėtuose modeliuose, GEOCARB modelis atskiria išplovimą nuo degazacijos ir nagrinėja kiekvieno iš jų atskirą poveikį CO₂ lygio pokyčiui. Fanerozojaus atmosferos CO₂ lygis apskaičiuotas pagal GEOCARB modelį, dažniausiai atitinka apytikrius šių dujų įvertinimus, kurie remiasi anglies izotopų sudėtimi nuosėdinėse uolienose ir žiotelių indeksu fosiliniams augalams. Klimato ir CO₂ lygio palyginimas iškelia prielaidą, kad atmosferos šiltnamio efektas buvo pagrindinis veiksnys, kuris reguliavo globalųjį klimatą prieš 600 mln. metų. [4, 38, 39]

GEOCARB modelis įtraukia veiksnius, kurie paveikė išplovimo greitį: sausumos plotų pasikeitimo pokyčiai, kurie vyksta dėl kontinentų judėjimo; jūrų dugno paplitimo laipsnis; temperatūrų kaita, kuri priklauso nuo kontinento dydžio ir jo padėties, vykstant žemynų poslinkiui; kontinentų aukščio pasikeitimas dėl kalnų antsprūdžio ir sumedėjusių sausumos augalų evoliucija. Šiuo metu atliekami eksperimentai su augalais ir uolienuų išplovimu, norint patikrinti augalų vaidmenį ilgalaikiui anglies ciklui, t. y. kaip Fanerozojaus laikotarpiu sumedėjusių sausumos augalų augimas paveikė silikatinių uolienuų išplovimo tempus, organinės medžiagos laidojimą nuosėdose ir kaip tai galėjo paveikti atmosferos CO₂ lygio pasikeitimus, o tuo pačiu ir klimato pasikeitimą. R. A. Berner teigia, jog sumedėjusių sausumos augalų evoliucija, kuri pagreitino išplovimo tempus ir turėjo vieną svarbiausių poveikių CO₂ koncentracijai atmosferoje per praėjusius 550 mln. metų. [4]

R. A. Berner, norėdamas pavaizduoti augalų poveikį išplovimo greičiams, sukūrė augalų – išplovimo parametą, kuris apibūdina keleto praeities ir iki dabar vykstančius išplovimo greičius. Visi kiti veiksniai, kurie veikia išplovimą (topografiniai, atmosferos CO₂ lygis), išskyrus biologinius, laikomi pastoviais – nekintančiais. Padidėjęs augalų augimas skatina spartesnį išplovimo greitį ir CO₂ suvartojimą fotosintezai bei kvėpavimui. CO₂ pašalinimas iš atmosferos (išplovimo pagreitinimas sumedėjusių sausumos augalų) turi būti vienodas su šių dujų aprūpinimu per degazaciją (nėra įrodymų lygiareikšmio degazacijos greičio pokyčio tuo metu). Tai reiškia, kad augalų išplovimo intensyvėjimas turėjo priešintis kitiems veiksniams, kurie silpnina išplovimo greitį. R. A. Berner aiškina, jog suintensyvėjęs išplovimas mažina CO₂ kiekį

atmosferoje, o tuo pačiu silpnina „šiltnamio efektą“, mažina globalias vidutines metines temperatūras. Dėl šių veiksnių silpnėjo upių išplovimas, kuris mažino globalius išplovimo tempus. Mažėjant vidutinėms metinėms temperatūroms, augalų augimas suintensyvėjo, padidindamas uolienu išplovimo tempus. Tokiu būdu palaikoma pusiausvyra tarp atmosferos ir uolienu anglies išteklių. [4]

R. A. Berner teigia, jog egzistuoja neigiamos grįžtamosios reakcijos prieš CO₂ koncentracijų didėjimą atmosferoje: CO₂ tiekiamas į atmosferą karbonatų mineralų metamorfizmo ir mantijos degazacijos metu, o paimamas iš atmosferos per silikatinių uolienu išplovimą ir po to sekantį karbonatų mineralų nusėdimą. Fotosintezės metu CO₂ sunaudojamas organinės anglies gamybai, kuri vėliau oksidacijos metu grąžina CO₂ į atmosferą. Pusiausvyra tarp šių srautų (CO₂ tiekimo ir suvartojimo) sąlygojo CO₂ kiekį atmosferoje per milijonus ir daugiau metų. Atmosferos CO₂ kiekio pastovumas iškelia prielaidą, kad yra stiprus neigiamas grįžtamasis ryšys, kuris stabilizuoja atmosferos CO₂ turinį. Dėl neigiamų grįžtamųjų reakcijų egzistavimo, bet kuris CO₂ šaltinis ar sunaudojimas turi daryti įtaką atmosferos CO₂ kiekiui. Silikatinių uolienu išplovimas ir po to einanti karbonatų mineralų sedimentacija, pašalina iš atmosferos atitinkamą CO₂ kiekį. Šis procesas vyksta greičiau, kai didėja temperatūra, t. y. auga atmosferos CO₂ kiekis. Padidintos CO₂ koncentracijos sukelia „šiltnamio efektą“, kuris lemia atšilimą, ko pasekoje hidrologinis ciklas greitėja, todėl vanduo sparčiau išplauna silikatų mineralus. Abu šie procesai veikia kaip neigiami grįžtamieji ryšiai, stabilizuojantys atmosferos CO₂ koncentracijas per pagreitetą silikatinių uolienu išplovimą. [40]

Kokią reikšmę išplovimui turėjo ankstyvoji flora, kai sumedėjusių augalų sausumoje dar nebuvo, R. A. Berner nenagrinėja. Tuo metu žemės paviršiuje buvo įsikūrę tokie primityvūs augalai kaip kerpės ir dumbliai. Nors jie išskiria chemines medžiagas, kurios greitina uolienu ardymą, tačiau autorius teigia, jog dėl savo mažo dydžio ši flora nebuvo tokia efektyvi uolienu išplovimui, kaip aukštesnieji augalai su gerai išsivysčiusia šaknų sistema. Nėra lengva apskaičiuoti šių augalų – išplovimo parametą. Apskaičiavimai gali būti padaryti, nagrinėjant augalų poveikį išplovimui šiomis dienomis. M. Tester iškelia klausimą ar skirtingi pagrindiniai augalų taksonai (plikasėkliai, gaubtasėkliai) buvo priežastis skirtingų erozijos tempų? Pateikiama prielaida, jog gaubtasėkliai veikia uolienas stipriau nei plikasėkliai, tačiau tikslų, prielaidą įrodančių eksperimentų dar nėra atlikta. [4]

Papildant modelį, pagrindinis dėmesys skiriamas CO₂ vaidmeniui: CO₂ neigiamos atsakomosios reakcijos palankios išplovimo metu CO₂ sunaudojimui, „šiltnamio efekto“ sustiprinimas, augalų produktyvumo padidėjimas, bei kaip šiluma ir padidėjęs produktyvumas įtakojo išplovimą. Taip pat įtraukiama ir didelė reikšmė suteikiama Saulės evoliucijai, kuri turėjo įtakos globalioms vidutinėms temperatūroms ir kritulių kiekiui (kaip krituliai paveikia išplovimo

tempą). Iš esmės, per geologinį laiką padidėjusi Saulės radiacija kompensavo sumažėjusį CO₂, t. y. sumažintas atmosferos „šiltnamio efektas“ buvo kompensuojamas padidėjusio Saulės šviesingumo, kas leido susidaryti gyvybei tinkamam klimatui. Be visų minėtų veiksnių, modeliavimui naudojami ir organinės medžiagos bei karbonatų skaidymo pokyčiai metamorfizmo, vulkanizmo ir diagenozės metu. Karbonatų ir organinės medžiagos laidojimas apskaičiuojamas iš masių – balanso išraiškos ir anglies izotopų sudėties vandenynų fosilijose, klintyse. [4]

R. A. Berner pasiūlytas GEOCARB modelis negali tiksliai pavaizduoti Fanerozojaus CO₂ lygio pokyčio, nes naudojami parametrai modeliavimui yra pastoviai kintantys. Neatsižvelgiama į bet kokią galimą primityvios sausumos mikrofloros išplovimo pagreitėjimą, prieš pasirodant sumedėjusiems augalams, o degazacijos metu termiškai suskaidytų karbonatų kiekio pokyčių apskaičiavimai yra apytikriai. Be to stroncio izotopų sudėtis, parodantis kalnų iškilimo poveikį išplovimo greičiams, paskutiniu metu yra kritikuojami paskutinių tyrinėjimų. [4]

A. J. Boucot ir J. Gray kritikuoja R. A. Berner GEOCARB modelį, nes jis pagrindinį vaidmenį atmosferos reguliavimui suteikia tracheofitams, o prieš tracheofitus buvusiems sausumos augalams ir jų reikšmės Paleozojaus atmosferos sudėčiai į modelį neįtraukia. Be to A. J. Boucot ir J. Gray iškelia prielaidą, jog tuo metu jau būta simbiozinių grybų ir visi tracheofitai buvo obligatyviai susiję su jais. Nors prieš tracheofitus Žemėje būta įvairių kitų organizmų, tačiau R. A. Berner modeliai neatsižvelgia į svarbų jų vaidmenį klimatui, temperatūroms ir atmosferos sudėčiai prieš devono periodą. Jis teigia, jog prieš tracheofitus vyravę augalai neturėjo jokios reikšmės aplinkai, o pasikeitimus daugiausiai lėmė abiotiniai fizikiniai reiškiniai ir cheminės reakcijos. Tuo tarpu A. J. Boucot ir J. Gray svarsto nepakankamai įvertintą galimą prieš tracheofitinių ir heterotrofinių mikroorganizmų poveikį aplinkai. Kaip manoma jie buvo panašūs į tracheofitus ir aktyviai vykdė uolienu, dirvožemio mineralų ardymą bei organinės anglies izoliavimą. GEOCARB modelis taip pat neįvertina jūrų produktyvumo (galėjo būti pakankamai aukštas ankstyvajame Paleozojuje) ir po to susidariusio didelio kiekio organinės medžiagos. Patikrinus ir apžvelgus biologines, geologines prielaidas bei apytikrius apskaičiavimus, kuriais remiasi GEOCARB modelis, A. J. Boucot ir J. Gray teigia, jog jis nesuteikia patikimos informacijos apie atmosferos sudėtį Fanerozojaus, o ypač ankstyvojo Fanerozojaus laiku. [7]

Aptarti Žemės sistemos ir GEOCARB modeliai negali pateikt patikimos konstrukcijos CO₂ kiekiui geologiniame laike apskaičiuoti, nes daugelis jų pabrėžia vieną ar kelis veiksnius įtakojančius atmosferos CO₂ kiekio pokytį, tačiau neatsižvelgia į daugelį kitų, CO₂ kiekį galinčių įtakoti veiksnių. Taip atsitinka nesutariant dėl to, kad yra veiksnys, kokį poveikį turi ir kaip jis yra išmatuojamas.

4.1 Duomenų informacijos netikslumai

G. R. Retallack, norėdamas atkurti atmosferos CO₂ pokyčius per praėjusius 300 mln. metų, naudojami žiotelių gausumu fosiliniuose keturių augalų genčių lapuose. Šios gentys panašios ir artimai susiję su dabar augančiais ginkmedžiais. Norėdamas sužinoti kaip keitėsi CO₂ kiekis atmosferoje, jis remiasi žinomu sąryšiu tarp šių dujų koncentracijos ir augalų lapų žiotelių gausos (per paskutinius 200 metų padidėjus CO₂ lygiui atmosferoje, augalai prisitaikė prie šio pokyčio, sumažindami žiotelių tankumą lapuose). G. R. Retallack, kaip paleobarometru, naudojami atvirkštiniu sąryšiu tarp lapų žiotelių gausos ir CO₂ koncentracijos. Šiuo sąryšiu remdamasis jis išanalizavo atmosferos CO₂ pokyčius per praėjusius 300 mln. metų. Rezultatai atitinka kitus CO₂ lygio pokyčio ir paleotemperatūrų duomenis, tačiau iškelia prielaidą, kad CO₂ atkūrimas, kuris remiasi anglies izotopų parodymais, gali būti netikslus dėl praeityje vykusių izotopiškai lengvo metano išsiveržimų. [25]

Apytikriai atmosferos CO₂ apskaičiavimai, kurie remiasi anglies izotopų sudėtimi paleokarbonatuose, rodo, kad ankstyvajame triase (prieš 250 mln. metų), ankstyvojoje juroje (prieš 190 mln. metų) ir ankstyvojoje kreidoje (prieš 117 mln. metų) buvo minimalus CO₂ kiekis atmosferoje. Tuo tarpu žiotelių gausos apskaičiavimai augalų fosilijose šiais laikotarpiais rodo aukštą CO₂ kiekį atmosferoje. Anglies izotopų tyrimas parodo, kad būta katastrofinių izotopiškai lengvo metano paleidimų į atmosferą. Atmosferos papildymas izotopiškai lengvu metanu galbūt gali paaiškinti kodėl izotopų paleobarometras ir anglies izotopų pasiskirstymo tyrinėjimas vandenynų organinėje medžiagoje neleidžia aptikti aukšto CO₂ lygio ir šilto klimato požymių. G. R. Retallack teigia, jei anglies izotopų CO₂ paleobarometras yra kompromituojamas epizodinių metano išsiveržimų, tai mažiausiai paskutinius 300 mln. metų pasilieka nenagrinėtas CO₂, metano ir vandens garų vaidmuo „šiltnamio efektui“. [25]

Kai atmosferoje CO₂ kiekis sumažėjo, fotosintetikams šios dujos tapo ribotu „maisto“ šaltiniu, ypač fitoplanktonui. Kompensuoti šį CO₂ trūkumą, fitoplanktonas evoliucijos metu įgijo fiziologinius mechanizmus, kurie padeda kaupti neorganinę anglį (bet kurioje CO₂ ar HCO₃⁻ formoje) iš nuosėdinės fazės masės. Anglies kaupimo mechanizmas apsaugo ląsteles nuo laisvo CO₂ koncentracijos pokyčio vandenyje ir supainioja anglies izotopų pasiskirstymo paaiškinimą organinėje medžiagoje. Nuo to laiko, skirtingai nei sausumos augalai, jūrų fitoplanktonas nebuvo tiesiogiai ribojamas CO₂ kiekio vandenyje, todėl organinės medžiagos izotopų duomenys negalėjo tiksliai pavaizduoti CO₂ koncentracijų pokytį vandenyje. [12]

Kai fotosintezė tapo ribojama CO₂ kiekio atmosferoje, visi fotosintetinantys organizmai RubisCo pagalba galėjo fotosintezei reikalingą anglį gauti iš neorganinių anglies šaltinių. Toks fotosintezės metu neorganinės anglies išteklių perėjimas į organinius išteklius, turėjo įtakos neorganinės anglies telkinio dydžio pokyčiams ir izotopų pasiskirstymui jame. Todėl izotopų skirtumas tarp organinės ir neorganinės anglies išteklių telkinių, iš principo yra pusiau kiekybinis rodiklis, kuris parodo bendrą neorganinės anglies kiekį vandenyno – atmosferos sistemoje. [12]

4.2 Problemos susijusios su modelių kūrimu

Lyginant Fanerozojaus klimatinius modelius, daugiausiai remiamasi geologiniais duomenimis, t.y. nuosėdų (tokių kaip anglis, moreninis priemolis, boksitai, kalkės ir pan.) rinkimu ir tyrimu, bei nuodugnai ištirtais botaniniais, biogeografiniais ir klimatiniais duomenimis. Tačiau dažniausiai išvados daromos ir priimamos be įrodymų. Nei vienas iš modelių neturi pakankamai biologinių ir geologinių duomenų, kuriais remiantis būtų sudarytas nespekuliatyvus modelis. [7]

Daugelis modelių įgyja neabejotinų tarpusavio ryšių tarp atmosferos CO₂ ir paviršiaus temperatūrų. Taigi požiūris keičiasi į atmosferos CO₂ kaip lemiantį veiksnį klimato ir temperatūrų reguliavime, bet niekas nesutaria dėl CO₂ (atmosferinio) lygio pokyčių geologiniame laike. Svarbesnis paskutinis laiko intervalas, kuriame atmosferos CO₂ tiesiogiai išmatuojamas remiantis biologinių ir geologinių įrodymų įvairove. Tai leidžia tiksliai nustatyti tarpusavio santykį tarp atmosferos CO₂ ir temperatūros, tačiau tokie modeliai netaikytini ankstesniems atmosferos evoliucijos įvertinimams. Pagrindinė problema su kuria susiduria mokslininkai – tai CO₂ lygio nepastovumo įvertinimas. Dėl modeliuose naudojamo CO₂ lygių vienodumo, neįmanoma gauti tikslių išvadų apie Fanerozojaus atmosferos evoliuciją (ypač apie ankstyvojo Fanerozojaus). Tokie konkurenciniai modeliai yra nepilnaverčiai. Jie neatitinka atmosferos CO₂ įvertinimo ir apytikslio apskaičiavimo. Norint tiksliau sudaryti modelius, reikia remtis geologiniais ir klimatiniais įrodymais, o taip pat apytikriais atmosferinio CO₂ lygio pokyčiais bei CO₂ ir O₂ santykio balansu. [7]

Šiuo metu sutariama, kad CO₂ kiekis atmosferoje mažėjo, o tuo tarpu O₂ didėjo, tačiau ginčijamasi kaip ir kokie procesai lėmė šių dujų pokyčius. Šiuo metu mokslininkai sudaro dvi

„stovyklas”. Viena grupė (Lovelock, Gėjos hipotezės kūrėjai ir šalininkai) tvirtina, jog CO₂ ir O₂ kiekiai priklausė nuo biologinių veiksnių, t. y. didžiausią poveikį CO₂ sumažėjimui turėjo fotosintetinantys mikroorganizmai – tokie kaip fitoplanktonas. Gėjos hipotezės šalininkai teigia, kad gyvybė ne tik prisitaikė prie negyvos aplinkos, bet ir keitė ją per visą gyvybės evoliucijos laikotarpį taip, kad ji tapo gyvybei optimali. Be to, kaip jie tvirtina, gyvybė pati geba reguliuoti atmosferos dujų ir vandens cheminę sudėtį bei Žemės paviršiaus temperatūrą, neleisdama šiems rodikliams nukrypti nuo optimumo ir išlaikyti aplinką patogia gyvenantiems organizmams. [1]

Tuo tarpu antroji grupė (J. C. G. Walker, J. F. Kasting ir kt.) teigia, kad CO₂ kiekį ir globalias temperatūras kontroliavo neorganiniai, geologiniai, geocheminiai veiksniai, taip pat daug reikšmės turėjo sumažėjęs Saulės skaistis ir padidėjęs Žemės sukimosi greitis. Jie tvirtina, kad Archėjaus CO₂ kiekis buvo didelis, o tai lėmė šiltą klimatą. Dėl šios priežasties buvo išgarinama daugiau vandens, hidrologinis ciklas išplaudavo uolienas. CO₂ atmosferoje jungdavosi su vandens garais, sudarydamas anglies rūgštį (CO₂ + H₂O → H₂CO₃). Tokie rūgštiniai lietūs tirpdė uolienas ir išplaudavo mineralus nuo Žemės paviršiaus. Silikatų mineralai jungdavosi su atmosferos anglimi sudarydami nuosėdines uolienas. Šios priežastys lėmė CO₂ kiekio mažėjimą. Sumažėjus šių dujų kiekiui atmosferoje, „šiltnamio efektas” silpnėjo, tačiau padidėjusi Saulės energija neleido neorganiniams procesams įgyti neigiamą reikšmę. Kasting ir kiti mokslininkai pritaria nuomonei, jog gyvybė galėjo būti kai kurių CO₂ kiekio sumažinimo veiksnių priežastimi, tačiau klimato stabilizavimo mechanizmams (geologinio laiko mastu) gyvybės poveikis nėra reikšmingas. [1]

Poveikis didėjančio gaisrų dažnumo sausumos ekosistemų struktūrai turėtų patikrinami sudėtingesnių vegetacijos modelių. Kas sąlygojo, kad deguonies koncentracijos atitiko miškų buvimą? Žemesnė deguonies dalinio slėgio riba karbono periodu galėtų būti paaiškinama remiantis apytikriais metabolinio O₂ poreikio gigantiškiems laumžirgiams, kurie tuo metu buvo paplitę, apskaičiavimais. Tiesioginis O₂/ CO₂ poveikis augalų produktyvumui reikalauja tolimesnių eksperimentinių kiekybinių nustatymų, ypač jei atlikti tyrimai prieštarauja vienas kitam. Augalijos atsakas į gaisrus ir O₂ kiekį atmosferoje, suteikia pradinį ryšį su svarbiausių atsakomųjų reakcijų mechanizmais. Galėtų būti išmatuota kaip skirtingi augalijos tipai padidina fosforo išplovimo laipsnį. [22]

Daugelis paskutinių eksperimentų, apimančių kieto kuro deginimą prie kintančio atmosferos deguonies kiekio, parodo, kad užsidegimo ir degimo greitis keičiasi atitinkamai nuo medžiagų įvairumo. Norint aiškiau suprasti Fanerozojaus deguonies kitimą, reikia atlikt papildomus, išsamesnius tyrimus su gaisrais, bei nustatyti fosilinių augalų funkcines savybes (t. y. ląstelių

sienelių morfologiją), kurios leido apsaugot augalams nuo gaisrų, esant aukštam deguonies kiekiui atmosferoje. [22]

Šiuo metu produktyvumo poveikis išplovimo tempams buvo nustatytas naudojant FACE (oras praturtinamas CO₂) eksperimentus. Smulkesnio nagrinėjimo reikalauja svarbus fosforo išplovimas iš uolienuų, kuris nulemia augalų organinės medžiagos laidojimo pokyčius. [21]

Atmosferos CO₂ ir globalūs temperatūros pokyčiai turi būti vaizduojami kartu su flora ir fauna, bei su atmosferos O₂, kadangi CO₂ ir temperatūra veikia išplovimo greičius, CO₂/ O₂ ir temperatūra C3 augalų produktyvumą, o temperatūra įtakoja O₂ tirpumą. Modeliavime taip pat turėtų būti įtrauktos tektoninės jėgos. [22]

Deguonies koncentracijų kitimą (per laiką kai pasirodė gyvybė, t.y. prieš 3, 5 mlrd. ir daugiau metų) galime nustatyti remiantis geologiniais – fosiliniais įrodymais. Fotocheminiai atmosferos modeliai gali padėti apskaičiuoti atmosferinio O₃ lygio kaitą per visą geologinį laiką. Tai svarbus faktorius, kuris sietinas su evoliucine raida ir gyvybės formų pasirodymu sausumoje. [35]

5. Dabartinė atmosferos sudėtis

Neogene padėtis stabilizuojasi. Tolesnis biosferos biomasės augimas ir jį paprastai lydintis deguonies kiekio didėjimas nėra įmanomas, nes tai sukeltų nepalaužiamus savaiminius gaisrus. Čia esama galingo neigiamo grįžtamojo ryšio. Kitas neigiamas grįžtamasis ryšys susijęs su anglies dioksido poveikiu. Neogene anglies dioksidas virto pirminę produkciją ribojančiu veiksniumi. Eksperimentai rodo, kad dirbtinai padidinus šių dujų koncentraciją aplinkoje, kurioje auga augalai, fotosintezė suintensyvėja. Taigi šių abiejų dujų dabartinės koncentracijos ($O_2 - 21\%$, $CO_2 - 0,03\%$) yra ribinės. [20, 21]

Dabartinė atmosfera (dujinė Žemės sfera), kurioje iki 100 km aukščio daugiausia yra azoto ($78,08\%$) ir deguonies ($20,94\%$). Kitos dujos: yra anglies dioksido $0,03\%$, argono $0,93\%$, kriptono, ksenono, neono, helio, metano, vandenilio, ozono ir kt. – $0,002\%$. [36]

Daugelis likusių atmosferoje dujų, įskaitant metaną (CH_4), vandenilį (H_2), azoto oksidą (NO), anglies monoksidą (CO), amoniaką (NH_3), azoto dioksidą (NO_2), sieros dioksidas (SO_2), vandenilio sulfidas (H_2S) yra paleisti į atmosferą organizmų, o taip pat išsiskyrę fotocheminių reakcijų metu. Sieros dujos išmestos vulkanų. Anglies monoksidas ir vandenilis taip pat pagaminamas fotocheminių reakcijų metu. [20, 21]

Šiuo metu kiekvienam CO_2 moliui fiksuotam fotosintezės metu, vienas O_2 molis yra paleidžiamas į atmosferą. Apskaičiuota, kad $99,9\%$ visos fotosintezės metu fiksuotos anglies atitinka, t. y. pusiausvyroje su biomasės oksidacija, dirvožemio organine anglimi ir kita geologiškai jauna organine medžiaga. Dėl šios priežasties atmosferos deguonies koncentracijos nekinta. Likusi anglis (nuo $0,1$ iki $0,2\%$) yra palaidojama nuosėdose, kur sudaro kerogenus, anglį ir naftą kol vėl yra gražinama į atmosferą dujų pavidalu. [27]

Organinės anglies molio prisidėjimas prie atmosferos pusiausvyros gali būti apskaičiuojamas iš jo pasilikimo redukuotoje formoje per laiko trukmę (gyvavimo laikas). Paprastai, fotosintetiškai fiksuotos anglies gyvavimo laikas nuo 1 iki 1000 metų, nors vidutiniškai jis mažesnis negu 100 metų. Biomasė, kuri yra giliai palaidojama žemėje, turi nuosėdinį gyvavimo laiką, t. y. 10^8 metų. Iš 1000 fotosintezės metu fiksuotų anglies molekulių, vienas ar du moliai yra palaidojami nuosėdose. Iš to seka, kad laukiamas deguonies padidėjimas, kai anglies molekulė yra palaidojama nuosėdose yra $2 - 5$ kartus didesnis, nei tada kai ta pati molekulė yra fiksuojama fotosintezės metu. [27]

Deguonies molekulės egzistavimo laikas, t. y. laikas nuo jos sunaudojimo kvėpavimui bei skaidymui iki jos grąžinimo į atmosferą fotosintezės metu, trunka 4500 metų. Ciklas beveik išlaikomas pusiausvyroje. Paviršiaus organinės medžiagos (gyvųjų organizmų), dirvožemio organinės anglies bei ištirpusios organinės anglies hidrosferoje egzistavimo laikas yra tik 50 metų. Vis dėlto mažas pusiausvyros nebuvimas tarp globalių fotosintezės greičių ir globalių kvėpavimo bei skaidymo tempų yra svarbus. Dalis fotosintezės metu pagamintos organinės medžiagos palaidojama išvengiant oksidacijos procesų (kvėpavimo ir skaidymo), prijungiant anglį prie nuosėdinių uolienu. Šis redukuotos organinės anglies laidojimo pokytis atitinka bendrąjį deguonies šaltinio kiekį atmosferoje. Šis deguonies šaltinis grąžinamas redukcinės medžiagos, išplaunamos nuo Žemės paviršiaus, oksidacijai. [33]

Efektyvus O_2 gyvavimo laikas, tiksliau laikas per kurį šių dujų kiekis gali žymiai sumažėti, yra keli milijonai metų. O_2 kiekis galėtų pasikeisti dėl pusiausvyros nebuvimo cikle, kuris sieja atmosferą su dideliais redukuotos Žemės plutos rezervais. Greitas ciklas siejantis atmosferą su mažais paviršiaus organinės medžiagos rezervais, reguliuoja šios medžiagos masę, bet ne deguonies kiekį atmosferoje. Šis ciklas atmosferos O_2 kiekiui didelės įtakos neturi, jis sukuria mažą greičių pusiausvyros neatitikimą tarp fotosintezės bei kvėpavimo ir skaidymo. [33]

Jei šiandien išnyktų visi biosferos vartotojai, daugių daugiausia po kelerių metų, išsekus CO_2 , žūtų ir gamintojai. Biosfera grįžtų prie heterotrofinio gyvenimo būdo. Gyvybė pati geba reguliuoti atmosferos dujų ir vandens cheminę sudėtį bei Žemės paviršiaus temperatūrą, neleisdama šiems rodikliams nukrypti nuo optimumo. [20, 21]

6. DARBO METODIKA

Aptariant galimą organinės medžiagos kaupimosi įtaką atmosferos evoliucijai prisilaikoma tokios darbų eigos. Pirmame etape studijavau literatūros šaltinius, kuriuose aptariama: ankstyvoji Žemės atmosfera; atmosferos ir hidrosferos evoliucija; deguonies ir anglies dioksido ciklai bei modelių sudarymas šių dujų ciklams; biosferos evoliucija ir jos poveikis atmosferos evoliucijai. Ypatingą dėmesį skyriau specialistų nuomonei apie tai, kaip biosferos evoliucija įtakojo atmosferos anglies dioksido ir deguonies kiekio pokyčius geologiniame laike bei kaip kuriami atmosferos evoliucijos modeliai, vaizduojantys šiuos pokyčius.

Antrame etape, remiantis surinktais literatūriniais šaltiniais, aptariau kokį poveikį biosferos evoliucija turėjo atmosferos anglies dioksido ir deguonies kiekio pokyčiams geologiniame laike. Apibendrinau organinės medžiagos, detrito ir naudingųjų iškasenų kaupimosi įtaką atmosferos dujų koncentracijų pokyčiams bei priežastis lėmusias šį kaupimąsi. Taip pat aptariau atmosferos evoliucijos modelius skirtus anglies dioksido ir deguonies kiekio pokyčiams geologiniame laike pavaizduoti bei problemas susijusias su šių modelių kūrimu.

APIBENDRINIMAS

Dabartinė Žemės atmosfera - tai evoliucijos rezultatas, kuris prasidėjo drauge su planetos susidarymu prieš 4, 5 mlrd. metų ir tęsėsi didesnę jos geologinės istorijos dalį. Daugelis specialistų mano, kad ši evoliucija daugiausiai priklausė nuo Žemės biosferos vystymosi, kuri turėjo svarbų poveikį neorganinei aplinkai. Vos atsiradę pirmieji organizmai suskubo augti ir daugintis. Ekosistemos ir visos biosferos biomasės didėjimas buvo viena iš ryškiausių evoliucijos tendencijų. Su biomase turėjo didėti ir detrito bei organinės kilmės naudingųjų iškasenų kaupimasis. Atsiradusi gyvybė pradėjo keisti aplinką, mažindama vienų medžiagų kiekį ir didindama kitų. Vykstanti gyvybės plėtra vandenyne (manoma, jog čia gyvybė išplito pirmiausiai) nulėmė tolesnę atmosferos raidą. Fotosintetikai paėmė iš vandens anglies dioksidą ir asimiliuodavo jį, taip mažindami vandens rūgštingumą. Vandeniui pašarmėjus, bikarbonatai virsdavo netirpiaisi karbonatais, kurie iškrisdavo į nuosėdas (karbonatizacija). Vėliau atsiradę stromatolitai, vandenyje esančius bikarbonatus naudojo kalkiniam skeletui auginti (kalcifikacija). Kaupiantis biomasei vandenyne, iš aplinkos buvo paimamas didelis anglies dioksido kiekis.

Prieš 3, 5 – 3, 0 mlrd. metų Žemėje atsiranda melsvabakterės ir jų funkciniai analogai, kurios vykdė oksigeninę fotosintezę (vienas iš reakcijos produktų – molekulinis deguonis). Melsvabakterių sienelės sudėtį sudarė sunkiai skaidomas junginys celiuliozė, kuri pereidavo į detritą. Kaupiantis biosferos biomasei didėjo ir deguonies kiekis aplinkoje, tuo tarpu anglies dioksido kiekis turėjo mažėti. Aplinka iš redukuotos pamažu virto oksiduota. Deguonies kaupimasis atmosferoje sąlygojo ozono (O₃) susiformavimą, kurio dėka gyvybė galėjo egzistuoti ir sausumoje be to tai buvo vienas iš veiksnių, kuris lėmė deguonies kaupimąsi atmosferoje. Prasidėjusi augalų evoliucija lėmė daug didesnius, pirminės produkcijos pagaminimo greičius, tačiau jie buvo neprisitaikę gyventi naujomis sąlygomis, todėl masiškai žūdavo (kaupėsi detritas). Augalų evoliucija skatino sunkiai skaidomo lignino atsiradimą. Lignino savybės lėmė spartų sumedėjusių augalų paplitimą Žemėje, jų biomasės padidėjimą ir aišku po to sekantį didelį organinės medžiagos laidojimą. Augalų liekanos kaupėsi bedeguoniuose vandenynų dugnuose ir pelkėse kur ilgainiui virsdavo durpėmis, o vėliau akmens anglimi. Kad toks organinės medžiagos kaupimasis vyko, šiuo metu įrodo dideli organinės kilmės naudingųjų iškasenų kiekiai. Deguonies kiekis atmosferoje tuo metu turėjo padidėti mažiausiai kelis kartus. Žemėje plačiai paplitę sumedėję augalai padidino dirvožemio eroziją, mineralų skaidymą ir jų išplovimą į vandenyną, ko pasekoje didėjo pirminė produkcija vandenynuose, o su ja ir organinės

medžiagos kaupimasis vandenynų dugnuose. Augalų sukeltas silikatinių uolienu išplovimas mažino anglies dioksido kiekį atmosferoje ($\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$). Apie sąsają tarp anglies dioksido lygio ir bioįvairovės (genotipo pokytis atsiradęs dėl konkurencijos apribotiems ištekliams) galima spręsti iš prielaidos, kad didėjanti augalų įvairovė skatino spartėjantį uolienu išplovimą, kas padidino anglies perėjimą iš atmosferos į uolienas ir maistingųjų medžiagų išplovimą į vandenynus. Apie prielaidą, kad globali bioįvairovė augo su globalia biomase, galima spręsti iš organinės anglies išteklių dydžio.

J. M. Robinson nagrinėja ir simbiozinių sąveikų įtaką uolienu išplovimui. Autorius spėlioja, jog tokios sąveikos turi turėti nepaprastą poveikį ne tik organinės anglies laidojimui ir deguonies augimui atmosferoje, bet ir paviršiaus erozijai, nuotėkiui, anglies dioksido kiekio ir hidrologiniams pokyčiams. Specialistų nuomone, dėl biosferos įtakos anglies dioksido kiekis nuolat mažėjo, o deguonies didėjo. Per visą laikotarpį, praėjusį nuo gyvybės išėjimo į sausumą iki šių laikų, deguonies kiekis galėjo išaugti dešimt ar daugiau kartų. Šiuo metu dar neatsakytas klausimas ar deguonies kiekis didėjo palaipsniui, ar šis pokytis buvo staigus (Scientific American, 1994).

Lyginant Fanerozojaus klimatinius modelius, daugiausiai remiamasi geologiniais duomenimis, t.y. nuosėdų (tokių kaip anglis, moreninis priemolis, boksitai, kalkės ir pan.) rinkimu ir tyrimu, bei botaniniais, biogeografiniais ir klimatiniiais duomenimis, tačiau išvados dažniausiai daromos ir priimamos be įrodymų. Nei vienas iš modeliuotojų neturi pakankamai biologinių ir geologinių duomenų, kuriais remiantis būtų sudarytas nespekuliatyvus modelis. Daugelis modeliuotojų pabrėžia vieną ar kelis kriterijus, pagal kuriuos apskaičiuoja atmosferos anglies dioksido kiekio pokytį geologiniame laike, tačiau neatsižvelgia į daugelį kitų galimų, anglies dioksido kiekį įtakančių veiksnių. Taip atsitinka nesutariant ar veiksnys tikrai įtakojo anglies dioksido kiekį atmosferoje ir kokį jis poveikį turėjo šių dujų koncentracijoms. Modeliai turi būti nuolat tobulinami, atsižvelgiant į kintamųjų (dujų) pokytį per Žemės istoriją. Sudarinėjant modelius reikia remtis tiksliais paleontologiniais, botaniniais, biogeografiniais, geologiniais ir klimatiniiais duomenimis.

Dabartinis biosferos biomasės augimas ir jį paprastai lydintis deguonies kiekio didėjimas nėra įmanomas, nes tai sukeltų nepalaujamus savaiminius gaisrus. Anglies dioksido koncentracijos padidėjimas skatina fotosintezės suintensyvėjimą. Taigi šių abiejų dujų dabartinės koncentracijos ($\text{O}_2 - 21\%$, $\text{CO}_2 - 0,03\%$) yra ribinės.

IŠVADOS

1. Daugelis specialistų sutaria, jog atmosferos evoliucija daugiausiai priklausė nuo biosferos vystymosi, o visas arba beveik visas dabartinis deguonis, esantis surištos ir laisvos būsenos, tikriausiai yra biogeninės kilmės. Kas kita anglies dioksidas, kurio lygio pokyčio reguliavimui svarbiausia reikšmė dažniausiai skiriama ne biologiniams, o neorganiniams ir geocheminiams veiksniams.
2. Deguonies kaupimasis atmosferoje sietinas su oksigeninės fotosintezės atsiradimu ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2$), tačiau šis kaupimasis buvo galimas tik tada, kai oksigeninė fotosintezė vyko intensyviau už aerobinį kvėpavimą. Kaupiantis organinei medžiagai, deguonies kiekis aplinkoje didėjo, o tuo tarpu anglies dioksido kiekis mažėjo.
3. Evoliucijos eigoje atranka skatino sunkiai skaidomų junginių, tokių kaip celiuliozė ir ligninas, atsiradimą, kurie didino nesuskaidytos organinės medžiagos kiekį nuosėdose. Tokiu būdu augant biosferos biomasei, didėjo iš ciklo „išėjusios“ organinės anglies kiekiai. Dėl šios priežasties deguonies kiekis atmosferoje nuolat augo, o anglies dioksido atitinkamai mažėjo.
4. Augalų evoliucija sausumoje, padidėjusi bioįvairovė, simbiozinės sąveikos, plataus sumedėjusių augalų paplitimo Žemėje sukeltas padidėjęs uolienu išplovimas, lėmė didesnius globalius biomasės kiekius, spartesnę organinės medžiagos laidojimą ir deguonies kiekio didėjimą bei atitinkamą anglies dioksido koncentracijų mažėjimą atmosferoje.
5. Daugelis modeliutojų, sudarinėdami modelius, pabrėžia vieną ar kelis kriterijus pagal kuriuos apskaičiuoja atmosferos anglies dioksido kiekio pokytį geologiniame laike, tačiau neatsižvelgia į daugelį kitų galimų, anglies dioksido kiekį įtakančių veiksnių. Taip atsitinka nesutariant ar veiksny tikrai įtakojo anglies dioksido kiekį atmosferoje ir kokį jis poveikį turėjo šių dujų koncentracijoms.

SANTRAUKA

Dabartinė Žemės atmosfera – tai evoliucijos rezultatas, kuris prasidėjo drauge su planetos susidarymu prieš 4, 5 mlrd. metų. Daugelis specialistų mano, kad ši evoliucija daugiausiai priklausė nuo Žemės biosferos vystymosi. Vos atsiradę pirmieji organizmai suskubo augti ir daugintis. Ekosistemos ir visos biosferos biomasės didėjimas buvo viena iš ryškiausių evoliucijos tendencijų. Su biomase turėjo didėti ir detrito bei organinės kilmės naudingųjų iškasenų kaupimasis. Kad tokio kaupimosi būta, šiuo metu įrodo dideli, organinės kilmės naudingųjų iškasenų kiekiai. Kaupiantis biosferos biomasei deguonies kiekis aplinkoje didėjo, o tuo tarpu anglies dioksido mažėjo, kaip numato oksigeninės fotosintezės lygtis ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2$). Deguonies kaupimasis atmosferoje sąlygojo ozono (O_3) susiformavimą, kurio dėka gyvybė galėjo egzistuoti ne tik vandenyje, bet ir sausumoje. Augalų evoliucija sausumoje lėmė daug didesnius pirminės produkcijos pagaminimo greičius, bei sunkiai skaidomo junginio - lignino atsiradimą. Lignino atsiradimas, padidėjusi bioįvairovė, simbiozinės sąveikos, plataus sumedėjusių augalų paplitimo Žemėje sukeltas spartesnis uolienu išplovimas, lėmė didesnius globalius biomasės kiekius, spartesnę organinės medžiagos laidojimą ir deguonies kiekio didėjimą bei atitinkamą anglies dioksido koncentracijų mažėjimą atmosferoje.

Šiuo metu daugelis specialistų sutaria, jog visas arba beveik visas dabartinis deguonis, esantis surištos ir laisvos būsenos, tikriausiai yra biogeninės kilmės. Kas kita anglies dioksidas, kurio lygio pokyčio reguliavimui svarbiausia reikšmė dažniausiai skiriama ne biologiniams, o neorganiniams ir geocheminiams veiksniams.

Kuriami modeliai deguonies ir anglies dioksido kiekiui atmosferoje apskaičiuoti, nėra visiškai tikslūs. Daugelis modeliotojų pabrėžia vieną ar kelis kriterijus, pagal kuriuos apskaičiuoja atmosferos anglies dioksido kiekio pokytį per geologinį laiko tarpą, tačiau neatsižvelgia į daugelį kitų, anglies dioksido kiekį įtakančių veiksnių.

SUMMARY

The present atmosphere of the Earth is a result of the evolution that began at the time of the planet's formation 4, 5 milliard years ago. Many experts think that this evolution was mostly dependent on the development of the Earth's biosphere. The first organisms that appeared on the Earth grew up and were reproduced at a fast rate. The increase of the biomass of the ecosystem and the whole biosphere was one of the most distinct trends of the evolution. Accumulation of detritus and mineral resources of organic origin grew up with the increase of the biomass. This kind of accumulation is proved by the current large quantities of mineral resources of organic origin. With the accumulation of the biomass of the biosphere the amount of oxygen in the environment increased whereas the amount of carbon dioxide decreased as specified by the oxygen photosynthesis equation ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2$). Accumulation of oxygen in the atmosphere caused formation of ozone (O_3), thanks to which life could exist both in the water and on the dry land. Evolution of plants on the dry land led to the increase in the production rate of the first products and appearance of lignin, a heavily decomposable compound. Appearance of lignin, an increased biodiversity, a faster rate of rock washout caused by symbiotic interaction, wide spreading of lignified plant on the Earth has resulted in larger global amounts of biomass, a faster burial of organic materials and increased amounts of oxygen, and in the respective reduction of carbon dioxide concentrations in the atmosphere.

Nowadays, many experts agree that the whole or almost the whole of the existent oxygen in the combined and free condition is most likely of biogenic origin. On the contrary, changes in the levels of carbon dioxide are mainly attributed to non – organic and geochemical phenomena as opposed to biological ones.

The created models for calculation of oxygen and carbon dioxide contents in the atmosphere are not absolutely accurate. Many modellers emphasize one or several criteria whereby changes in the contents of atmospheric carbon dioxide are calculated within a geologic time interval; however they fail to take into account many other phenomena that make effect on the amount of carbon dioxide.

LITERATŪRA

1. Allegre C. J., Schneider S. H., 1994. The evolution of the Earth // *Scientific American*, 271 (4): 44 – 51.
2. Berner R. A., 2001. Modeling atmospheric oxygen over Phanerozoic time // *Geochimica et cosmochimica acta*, 65 (5): 685 – 694.
3. Berner R. A. , et al., 2003. Phanerozoic atmospheric oxygen. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 31: 105 – 134.
4. Berner R. A. , 1998: The carbon cycle and CO₂ over Phanerozoic time: the role of land plants. - *The Royal Society*. 75 – 82: - USA.
5. Berner R. A. , 1997. The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO₂ // *Science*, 276 (5312): 544 – 545.
6. Болин Б., 1972. Круговорот углерода. – *Мир*. 91 - 104: - Москва.
7. Boucot A. J., Grey J., 2001. A critique of Phanerozoic climatic models involving changes in the CO₂ content of the atmosphere. – In.: *Abstract. Earth – science reviews*, 56 (2001): 1 – 159. – USA.
8. Catling D. C., et al., 2001. Biogenic methane, hydrogen escape, and the irreversible oxidation of early Earth // *Science*, 293 (5531): 839 – 843.
9. Cloud P. E. , 1976. Beginnings of Biospheric Evolution and their Biogeochemical consequences // *Paleobiology*, 2 (4): 351 – 387.
10. Cloud P. E. , 1968. Atmospheric and hydrospheric Evolution on the Primitive Earth // *Science, New Series*, 160 (3829): 729 – 736.
11. Des Marais D. J., et al., 1992. Carbon isotope evidence for the stepwise oxidation of the Proterozoic environment // *Nature*, 359 (6396): 605 – 609.
12. Falkowski P. G. , Rosenthal Y. , 2001. Biological diversity and resource plunder in the geological record: Casual correlations or causal relationships? // *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 98 (8): 4290 – 4292.
13. Franck S. , Kossacki K. , Bounama C. , 1999. Modelling the global carbon cycle for the past and future evolution of the earth system // *Chemical Geology* 159 (1999): 305 – 31.
14. Kasting J. F., 2001. The rise of atmospheric oxygen // *Science*, 293 (5531): 819 – 820.
15. Kasting J. F., 1993. Earth's early atmosphere // *Science*, 259: 920 – 926
16. Kaufman A. J., Xlao S., 2003. High CO₂ levels in the Proterozoic atmosphere estimated from analyses of individual microfossils // *Nature*, 425: 279 – 282.
17. King J. F., 1993. Earth's early atmosphere // *Science*, 259: 920 – 926.
18. Клауд П. , Джибор А., 1972. Круговорот кислорода. – *Мир*. 523- 533: - Москва.

19. Knoll A. H., 1991. End of the Proterozoic Eon // *Scientific American*, 265 (4): 42 – 49
20. Lekevičius, E., 2000. Gyva tik ekosistema: ne visai tradicinis požiūris į gyvybės evoliuciją. Vilnius, Vilniaus universiteto leidykla: 16 – 60 p.
21. Lekevičius, E., 2002. The origin of ecosystems by means of natural selection. Vilnius, Institute of ecology publishers: 11 – 42 p.
22. Lenton T. M. , 2001: The role of land plants, phosphorus weathering and fire in the rise and regulation of atmospheric oxygen. – Blackwell Science Ltd. 613 – 629: - UK.
23. Owen T., 1984. Life as a planetary phenomenon // *Earth – orient. applic. Space technol*, 4 (1): 31 – 38.
24. Raven J. A. , 1998. Extrapolating feedback processes from the present to the past. -The Royal Society. 19 – 28: - UK.
25. Retallack G. J. , 2001. A 300 – million – year record of atmospheric plant cuticles // *Nature*, 411: 287 – 290.
26. Retallack G. J. , 1997. Early forest soils and their role in devonian global change // *Science*, 276: 583 – 585.
27. Robinson J. M. , 1996. Atmospheric bulk chemistry and evolutionary megasymbiosis // *Chemosphere*, 33 (9): 1641 – 1651.
28. Rothman D. H. , 2001. Global biodiversity and the ancient carbon cycle // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 98 (8): 4305 – 4310.
29. Royer D. L., et al., 2001. Paleobotanical evidence for near present – day levels of atmospheric CO₂ during part of the tertiary // *Science*, 292 (5525): 2310 – 2313.
30. Rye R., Holand H. D., 1998. Paleosols and the evolution of atmospheric oxygen: A critical review // *American journal of science*, 298: 621 – 672.
31. Stanley S. M., 1999. *Earth System History*. – W. H. Freeman and Co. 257 – 283: - New York.
32. Шидловски М., 1980. Атмосфера архея и эволюция кислородного запаса Земли. – Мир. 522 – 535: - Москва.
33. Walker J. C. G., 1984. How life affects the atmosphere // *BioScience*, 34 (8): 486 – 491.
35. Walker J. C. G., 1987. Was the Archaean biosphere upside down? // *Nature*, 329 (6141): 710 – 712
34. Walker J. C. G., 1990. Precambrian evolution of the climate system. – In.: *Abstract. Global and planetary change*, 2 (3 – 4): 261 – 289. – USA.
35. Wayne R. P., 1992. Atmospheric chemistry: the evolution of our atmosphere. In.: *Abstract. Journal of photochemistry and photo biology*, 62 (3): 379 – 396. – UK.
36. <http://www.rimutija.com/Atmosfera.htm>

37. http://lt.wikipedia.org/wiki/Geologin%C4%97_laiko_skal%C4%97
38. <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1692179>
39. http://website.lineone.net/~david_scarboro/S269b13.htm#The%20Geocarb%20Model
40. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2002AGUFMGC61A..02B>