

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. H. Niewodniczańskiego
Kraków

Jan Lasa

GEOFIZJOLOGIA

30 LAT HIPOTEZY GAI



Kraków, 2003

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków, Poland

www.ifj.edu.pl/pop/reports/2003.htm

Kraków, maj 2003

Raport Nr 1/POP

GEOFIZJOLOGIA
30 LAT HIPOTEZY GAI

Jan Lasa

Streszczenie

Hipoteza Gai, postawiona przez J. E. Lovelocka w 70-tych latach ubiegłego wieku, jest ściśle związana z wysłaniem na Marsa pojazdów typu Viking, celem stwierdzenia obecności życia na tej planecie. Opracowanie metody detekcji życia na innej planecie, które może przyjąć formy różne od znanych na Ziemi, zainicjowało szereg pytań, z których najważniejsze to: definicja zjawiska jakim jest życie, jakie warunki muszą być spełnione, aby życie mogło egzystować, oraz czy życie wpływa na warunki fizyczne i chemiczne środowiska, w którym egzystuje.

Hipoteza Gai odpowiada na te pytania. Lovelock przyjmuje, że Ziemia jest „organizmem” zawierającym wszystkie formy życia występujące we wszystkich możliwych środowiskach, tak wzajemnie powiązanych systemem sprzężeń zwrotnych, aby zapewnić optymalne warunki jego rozwoju.

W pracy przedstawiono sylwetkę Autora hipotezy Gai i drogę jaka doprowadziła go do jej opracowania. Idea Ziemi żywej nie jest pomysłem tylko Lovelocka, dlatego przedstawiono obecność tej idei w historii rozwoju nauk przyrodniczych. Jeżeli Ziemia jest „żywa” to powinna charakteryzować się swoją fizjologią. Obserwowane i stwierdzone w ostatnim półwieczu zagrożenia, jakie wzrost populacji ludności i rozwój przemysłu spowodowało w środowisku, traktowane są przez Lovelocka, jako objawy choroby organizmu, jakim jest Gaja.

Hipoteza Gai przez wiele środowisk naukowych została przyjęta sceptycznie i została skrytykowana. Argumenty krytyków i zwolenników hipotezy Gai zostały przedstawione w ostatnim rozdziale opracowania.

*Pragnę serdecznie podziękować
Profesorowi dr hab. Bohdanowi Dziunikowskiemu
i Profesorowi dr hab. Andrzejowi Zuberowi za cenne
uwagi podczas redagowania niniejszego opracowania.*

Spis treści

1. Wprowadzenie	5
2. Uwagi o J. E. Lovelocku	6
3. Hipoteza Gai według Lovelocka (7 i 9)	7
3.1. Poszukiwanie definicji życia	7
3.2. Podstawy hipotezy Gai	8
4. Idea Ziemi żywej w naukach przyrodniczych	11
5. <i>Daisyworld</i>	20
6. Opis rozwoju życia na Ziemi z punktu widzenia hipotezy Gai	27
6.1. Zarys rozwoju życia na Ziemi w erze archaicznej	27
6.2. Opis rozwoju życia w erze proterozoicznej	32
6.3. Era kenozoiczna	40
7. Fizjologia Ziemi	44
7.1. Gorączka dwutlenku węgla	45
7.2. Przypadek kwasowej niestrawności	47
7.3. Dermatologiczny dylemat: <i>ozonemia</i>	48
7.4. Promieniowanie jonizujące	49
7.5. Prawdziwa dolegliwość	51
8. Krytyka hipotezy Gai	54
9. Charakterystyka hipotezy Gai	59
10. Literatura	60

1. Wprowadzenie

James E. Lovelock, przed publikacją hipotezy Gai zapytał swojego sąsiada Williama Goldinga, (autora *Władcy much*), jak można w skrócie określić cybernetyczny system z wbudowaną tendencją do homeostazy, przejawiający się w anomaliach ziemskiej atmosfery. Golding zasugerował nazwę Gaja [1]. Myślę, że to określenie systemu cybernetycznego regulującego temperaturę i warunki klimatyczne na Ziemi interpretowane jest w sferze teologicznej, niezgodnie z intencjami Lovelocka. Z tego powodu hipoteza ta napotkała na sprzeciw świata naukowego, zwłaszcza biologów i klimatologów, ponieważ kojarzyła się z mitologią, w której Gaja reprezentuje boginię Matkę-Ziemię.

Po okresie ignorowania hipotezy Gai przez biologów nadszedł okres jej krytykowania. Głównym zarzutem stawianym hipotezie Gai był brak dowodu, aby tak duży system jak Ziemia mógł samodzielnie regulować temperaturę i to w sposób sprzyjający życiu. Lovelock odpowiedział na tę krytykę matematycznym modelem biologicznej regulacji temperatury Ziemi. Stopniowo świat naukowy zaakceptował hipotezę Gai, która stała się już teorią dającą się weryfikować. Dowodem poważnego traktowania tej teorii jest powołanie w *Royal Society* w Londynie w 1998 roku organizacji pod nazwą Gaja, Towarzystwo do Badania i Upowszechniania Nauki o Systemie Ziemskim (*Gaia, The Society for Research and Education in Earth System Science*) [1].

Niestety, wraz z naukowym podejściem do zagadnień, które teoria Gai stawia przed ludzkością, pojawiły się pseudonaukowe towarzystwa, które szermując nazwą „Gaia”, propagują jej mistyczny obraz. Przykładem tego jest stowarzyszenie *HolCy (Holistic Civilization)* lub *Tuberofile*. To ostatnie stowarzyszenie walczy o ocalenie prątka gruzlicy, jako że i on jest składnikiem Gai (*Wiedza i Życie*, nr 4, 2001).

W niniejszym opracowaniu przedstawiono przyczyny, które doprowadziły Lovelocka do sformułowania hipotezy Gai, kontrowersje jakie ona wywołała oraz odpowiedź Lovelocka na zarzuty w postaci modelu planetarnej stabilizacji temperatury (*Daisyworld*). Przedstawiono również w zarysie poglądy wybitnych naukowców dotyczące Ziemi jako żywego organizmu na przestrzeni dziejów. W końcu przedstawiono inspirujące pytania, jakie hipoteza Gai stawia przed naukowcami zajmującymi się historią Ziemi i jej przyszłymi losami.

2. Uwagi o J. E. Lovelocku

Dr James E. Lovelock urodzony w 1919 r. ukończył studia medyczne na Uniwersytecie Londyńskim. Tam też uzyskał stopień doktora medycyny. Jest on jednym z nielicznych współczesnych naukowców o sławie międzynarodowej pracujących samotnie. Jego dziełem było opracowanie w 1960 r. detektora wychwyty elektronów (*Electron Capture Detector – ECD*). Detektor ten umożliwia analizę związków chlorowcowych metodą chromatografii gazowej na poziomie 10^{-15} g bezpośrednio w próbkach powietrza [2]. Rychło okazało się, że całe otoczenie człowieka skażone jest środkiem owadobójczym DDT, stosowanym powszechnie w rolnictwie po drugiej wojnie światowej. Związek ten znaleziono w wodzie pitnej, żywności, w mleku matek karmiących, tkance tłuszczowej człowieka i lodach Arktyki. Po raz pierwszy w latach 60-tych ubiegłego wieku pojawił się problem skażenia pestycydami środowiska w skali globu. Detektor wychwyty elektronów i chromatografia gazowa stały się podstawowymi narzędziami w tych badaniach.

Dalsze prace Lovelocka zmierzające do udoskonalenia detektora ECD, a zwłaszcza jego wyprawa statkiem *Shackleton* wzdłuż południka ziemskiego, zaowocowały pomiarem stężenia freonów w atmosferze obu półkul Ziemi [3, 4, 5]. Wyniki tych pomiarów umożliwiły postawienie przez F.S. Molinę i M.J. Rowlanda hipotezy o możliwości zniszczenia ziemskiej warstwy ozonowej przez związki chlorowcowe [6].

Prace J.E. Lovelocka ugruntowały jego pozycję jako pioniera metod detekcji stosowanych w chromatografii gazowej. Stał się on wkrótce konsultantem wielu firm produkujących aparaturę analityczną. W takim charakterze został zaproszony do udziału w pracach Kalifornijskiego Instytutu Technologicznego. Instytut ten, w ramach projektu związanego z wysłaniem pojazdu Viking na Marsa, realizowanego przez NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), opracowywał metodę umożliwiającą wykrycie życia na Marsie.

Zespół, z którym współpracował Lovelock, planował wysłanie na Marsa mikrolaboratorium biologicznego, które w pobranej próbce gruntu mogłoby określić obecność bakterii, grzybów lub innych mikroorganizmów. Ponadto planowano wykrycie metodami analizy chemicznej protein, aminokwasów lub związków organicznych.

Do projektowanych prac Lovelock odnosił się sceptycznie. Życie na Marsie nie musi występować w tej samej formie jak na Ziemi i dlatego metody jego detekcji, skuteczne na Ziemi, nie muszą być przydatne na Marsie. Wątpliwości te wywołały podstawowe pytanie, co

to jest życie i jak można je rozpoznać. Jako przeciwnik detekcji życia na innych planetach metodami ziemskimi, Lovelock zaproponował poszukiwanie śladów życia poprzez wykrywanie miejsc o zmniejszonej entropii, ponieważ tylko ten efekt musi towarzyszyć wszystkim formom życia. Idea wykrywania zmian entropii jako objawów życia, stała się podstawą wysunięcia hipotezy Gai [7].

3. Hipoteza Gai według Lovelocka [7 i 9]

3.1. Poszukiwanie definicji życia

Koncepcja Gai związana jest nierozłącznie z koncepcją życia. Aby zrozumieć czym jest Gaja musimy najpierw wyjaśnić czym jest życie. Odpowiedź na to pytanie była zawsze bardzo trudna. Życie, jako przedmiot naukowej wiedzy, wymaga precyzyjnej definicji. Słowniki biologiczne unikają tego pytania. Słownik Webstera definiuje życie jako:

„Własności roślin i zwierząt (kończące się śmiercią i tym wyróżniające je od nieorganicznej materii), które powodują możliwość pobierania przez nie pożywienia, uzyskiwania z niego energii, wzrostu itd. ...”

Słownik Oxfordzki podaje w zasadzie to samo:

„Własności, które odróżniają żywe zwierzęta, rośliny lub składniki tkanek organicznych od tkanek martwych lub od materii nieożywionej, organizacja aktywności funkcjonalnej, dzięki której własności te się manifestują”.

Ważnym krokiem do zrozumienia i rozpoznania życia jest znaczenie kolektywnego występowania żyjących istnień. Każdy z nas składa się ze zbioru organów i tkanek (serca, wątroby, nerek itp), które mogą egzystować niezależnie, jeżeli utrzymywane są we właściwej temperaturze i są zasilane pożywieniem. Każdy z tych organów składa się z bilionów komórek, z których każda może żyć niezależnie.

Życie jest społeczne, istnieje w zbiorowiskach i kolektywach. Zbiorowiska żywych istnień mają właściwości, których nie można przewidzieć na podstawie znajomości właściwości pojedynczych elementów. Ludzie i zwierzęta utrzymują stałą swoją temperaturę niezależnie od temperatury otoczenia, a tego faktu nie da się wydedukować z właściwości pojedynczej komórki.

Erwin Schrödinger w książce *What is Life* [8] pisze:

„Najważniejszym i dyskusyjnym pytaniem jest: jak można wytłumaczyć prawami fizyki i chemii przypadek powstawania w przestrzeni i czasie przestrzennie ograniczonych żywych organizmów”. Oraz dalej: *„Obecna oczywista niezdolność fizyki i chemii do wyjaśnienia takiego zjawiska nie powinna budzić wątpliwości, że w przyszłości będzie to możliwe”*.

Najbardziej charakterystyczną i zagadkową cechą życia jest jego zdolność poruszania się w przeciwnym kierunku do upływu czasu. Życie jest przeciwieństwem drugiego prawa termodynamiki, stwierdzającego, że wszystko, teraz, dawniej i w przyszłości musi biec w kierunku dezintegracji równowagi i śmierci. Mimo to życie tworzy złożone układy. Ta sprzeczna z prawami fizyki cecha życia trwa prawie tak długo jak Ziemia istnieje i razem z nią ewoluuje tworząc jeden wspólny system dogodny do jego egzystencji. Jeżeli drugie prawo termodynamiki mówi, że entropia w przyrodzie rośnie, w jaki sposób życie unika tej uniwersalnej tendencji do rozpadu. Problem ten próbował wyjaśnić Angielski fizyk J.D. Bernal w 1951 roku pisząc: *„życie jest tą klasą licznych zjawisk, które są otwartym lub ciągłym reakcyjnym systemem zdolnym do zmniejszenia swej wewnętrznej entropii kosztem wolnej energii pobieranej z otoczenia i oddawania do niego w zdegradowanej formie”*.

Żywe systemy są otwarte w tym sensie, że z otoczenia pobierają surowce o wyższej wartości energetycznej, niż w wydzielanych odpadach. Systemy są ograniczone w hierarchicznych wewnętrznych granicach. Poruszając się z kosmosu w kierunku Ziemi wpierw napotkamy atmosferę, która ogranicza Gaję. Następnie napotkamy granice ekosystemów, takie jak lasy, oceany. Dalej napotkamy skórę lub korę żywych organizmów i roślin. Idąc dalej napotkamy membrany komórek, a dalej znajdują się nukleotydy komórek i DNA.

Powyższe rozważania zmierzające do zdefiniowania zjawiska życia, mimo korzystania z tak naukowych terminów jak entropia, lub wprowadzona przez Schrödingera [8] „ujemna entropia”, nie wnoszą nic istotnego i nie wyjaśniają niczego. Elementarną właściwością organizmów żywych jest możliwość pobierania z otoczenia pożywienia i wydalania odchodów. Takie żywe organizmy, jak ludzie, charakteryzują się świadomością, inteligencją, poczuciem piękna, etyką, moralnością itp. Te właściwości ludzkie wymagają również energii, lecz z punktu widzenia organizmu – pseudomaszyny, nie są istotne ani potrzebne.

3.2. Podstawy hipotezy Gai

Jak można rozróżnić planetę, na której występuje życie od takiej, na której brak objawów życia? Atmosfera na planetach bez życia musi podlegać tylko prawom chemicznym i fizycznym oraz musi znajdować się w stanie równowagi chemicznej. Natomiast atmosfera planety zawierającej życie musi zawierać surowce niezbędne do jego istnienia i odpady. Atmosfera ta musi różnić się od atmosfery planet nie zawierających życia (tabela 1). Rozumowanie to potwierdza skład atmosfery Marsa i Wenus, znajdujących się w stanie równowagi chemicznej, i atmosfery Ziemi, w stanie nierównowagi chemicznej. Atmosfera Ziemi jest zdominowana przez tlen i azot, oraz zawiera takie gazy jak metan i dwutlenek węgla. Tlen i metan silnie z sobą reagują tworząc w końcu wodę i CO. Gdyby do atmosfery w sposób ciągły te gazy nie były dostarczane, atmosfera już dawno osiągnęłaby stan równowagi chemicznej. Aby utrzymać stężenie metanu na poziomie 1,8 ppm, do atmosfery musi być doprowadzone miliard ton metanu rocznie i 200 milionów ton tlenu rocznie.

Tabela 1. Skład atmosfery na różnych planetach [7].

Gaz	Planeta			
	Wenus	Mars	Ziemia bez życia	Ziemia obecnie
Dwutlenek węgla	98%	95%	98%	0,03%
Azot	1,9%	2,7%	1,9%	78%
Tlen	Ślady	0,13%	Ślady	21%
Argon	0,1%	2 %	0,1%	1%
Temperatura Powierzchni, °C	477	- 53	210 ± 50	13
Ciśnienie, hPa	90 000	6	60 000	1000

Życie na Ziemi pojawiło się około $3,9 \cdot 10^9$ lat temu. W tym czasie średnia temperatura Ziemi niewiele się zmieniła, mimo że zmieniał się skład jej atmosfery i ilość energii emitowanej przez Słońce (o 30%).

Nazwanie żywej planety Gają nie jest synonimem biosfery. Biosfera jest zdefiniowana jako ta część Ziemi, w której występują żywe organizmy. Również suma wszystkich żywych

organizmów (biota), mieści się pod pojęciem Gai. Biosfera i biota, razem biorąc, są częścią Gai. Gaja jest ciągłością od początków życia, aż do końca jego występowania. Gaja jest planetarnym istnieniem, mającym właściwości nie wynikające z właściwości indywidualnych żywych organizmów, ani ich zbiorowisk.

Hipoteza Gai, w wersji przedstawionej w pracy [7], zakładała, że skład atmosfery, oceanów, klimat, ukształtowanie i skład skorupy Ziemi, są regulowane przez takie zachowanie się żywych organizmów zapewniając komfortowe warunki dla życia. Temperatura, stopień utlenienia, kwasowość, specjalne własności skał i wody, w każdym czasie pozostają stałe, dzięki aktywnym sprzężeniom zwrotnym działające automatycznie i nieświadomie przez biota. Energia słoneczna stwarza komfortowe warunki dla życia. Warunki te pozostają stałe w krótkim przedziale czasu natomiast ewoluują synchronicznie wraz ze zmiennymi potrzebami biota.

Aby życie egzystowało w komfortowych warunkach, regulacyjny system cybernetyczny musi zapewniać:

- właściwy skład atmosfery,
- właściwe parametry klimatu,
- dostępność surowców,
- usuwanie odpadów.
- system musi dysponować mechanizmami zdolnymi do zmiany stężeń składników w skali globu.

Jeżeli realny świat, który zamieszkujemy, jest układem samoregulującym się w taki sposób, że nasz klimat i środowisko, jest konsekwencją automatycznie optymalizującego się systemu, to Gaja jest największą manifestacją życia [9]. Gaja zawiera:

1. żywe organizmy, które rosnąc żywiłowo eksploatują każde dogodne środowisko, które się pojawia,
2. organizmy podlegają darwinowskiej naturalnej selekcji, a znajdując się w dogodnym środowisku rozmnażają się,
3. organizmy wpływają na fizyczne i chemiczne własności środowiska. Są to niektóre zwierzęta zmieniające atmosferę przez oddychanie, pochłaniające tlen, a wydalające dwutlenek węgla. Wszystkie formy życia w różny sposób nieustannie modyfikują fizycznie i chemicznie środowisko.
4. występowanie warunków przeciwstawnych lub warunków ściśle ograniczających życie.

Może być zbyt ciepło lub zbyt zimno. Między tymi granicami występują warunki

komfortowe, czyli stan preferowany. Środowisko może być zbyt kwaśne lub zbyt alkaliczne, neutralne będzie preferowane. Wszystkie składniki chemiczne mają określone dopuszczalne stężenia, tolerowane lub niezbędne do życia. Niektóre pierwiastki, na przykład: jod, selen, żelazo, w wysokich stężeniach są truciznami, ale ich brak uniemożliwia istnienie organizmów.

Z punktu widzenia Gai, życie jest zjawiskiem w skali planety. Gaja jako największa manifestacja życia, wykazuje cechy różniące ją od organizmów żywych wchodzących w jej skład. W przeszłych okresach historii Ziemi, przed pojawieniem się życia, powierzchnia Ziemi, atmosfera i oceany ewoluowały zgodnie z prawami fizyki i chemii, w kierunku ustalonych warunków chemicznych. Po pewnym czasie formujące się komórki zaczęły się rozmnażać na taką skalę, że ich obecność zaczęła wpływać na ziemskie środowisko zatrzymując ustalanie się chemicznego stanu równowagi. W wyniku obecności żywych organizmów, litosfera, atmosfera i hydrosfera zjednoczyły się w formowaniu samoregulującego się systemu, Gai. W tabeli 2 przedstawiono rolę składników atmosfery w regulacyjnym systemie Gai.

Tabela 2. Rola składników atmosfery z punktu widzenia Gai [7]

Gaz	Stężenie %	Produkcja $\times 10^6$ t/rok	Znaczenie
Azot	78	300	Wytwarza ciśnienie, utrudnia pożary, jest źródłem związków azotowych.
Tlen	21	10^5	Źródło energii
CO ₂	0,03	$1,4 \times 10^5$	Fotosynteza, regulator klimatu
CH ₄	$1,8 \times 10^{-4}$	10^3	Regulator klimatu, wentylacja strefy aneroicznej
Tlenek azotu	10^{-5}	100	Regulator tlenu i ozonu
Amoniak	10^{-6}	300	Regulator pH
Związki siarkowe	10^{-8}	100	Transport gazów w cyklu siarkowym
Chlorek metylu	10^{-7}	10	Regulator ozonu
Jodek metylu	10^{-10}	1	Transport jodu

4. Idea Ziemi żywej w naukach przyrodniczych

Lovelock zdawał sobie sprawę, że hipoteza Gai zawiera w sobie odwieczne poglądy ludzkości na Ziemię jako żywy organizm [10]. Nie zdawał sobie jednak sprawy, że niewiele

lat wcześniej, rosyjski geochemik Władimir Wiernadski (1863 – 1945) zajmował się podobnymi zagadnieniami. Wszystkie cechy Ziemi występujące pod postacią Gai w hipotezie Lovelocka występowały u niego w postaci biosfery [11]. Okres zimnej wojny i izolacja środowisk naukowych spowodowały, że Lovelock nie zapoznał się z pracami Wernadskiego, mimo że jego *Biosfera* była opublikowana w Paryżu w 1929 roku.

W krajach zachodnich [12], pod pojęciem biosfery rozumie się sumę wszystkich żywych organizmów. Życie jest traktowane jako czynnik obcy, przystosowany do warunków jakie istniały na Ziemi. Według Wiernadskiego, biosfera jest warstwą geologiczną, sięgającą w głąb Ziemi i wysoko nad jej powierzchnię. W jej skład wchodzi wszystkie gazy, skały i inne ciała fizyczne, których powstanie wiązało się z istnieniem życia. Biosfera Wiernadskiego została przez życie stworzona. Życie to żywa materia, a nie poszczególne osobniki lub gatunki. Życie od samego początku musiało istnieć jako zjawisko globalne. Nie mogło ono występować w postaci oaz. Biosfera zawdzięcza życiu swoje powstanie, ponieważ przez żywą materię przebiega ciągły obieg materii. Wiernadski pisze:

.... zauważyłem niezwykłą cechę budowy naszej planety, polegającą na tym że wszystkie gazy, tworzące się w biosferze, są ściśle związane z życiem,..... są one zawsze biogeniczne i zmieniają się głównie na drodze biogenicznej.

Według Wiernadskiego „monolit życia” jest twórcą swego fizycznego (abiotycznego) środowiska. Gazy, wody i skały, są jego, przynajmniej pośrednim, wytworem. Zostały bowiem utworzone z odpadów procesów życiowych, a więc nie muszą być dla życia niezbędne. W obrębie „monolitu życia” zachodzi przepływ materii.

Gaja jest inna. Jest ona systemem cybernetycznym, który nie tylko „stwarza”, ale także kontroluje i reguluje biosferę. W obrębie Gai następuje przepływ materii i informacji. Według hipotezy Gai, cechą wyróżniającą atmosferę jest jej niestabilny chemicznie charakter, wskazujący na występowanie procesów życiowych w skali globu.

Poglądy Wiernadskiego uwzględniały prace poprzedników, z których jednym, zajmującym się przyrodą Ziemi, był filozof i biochemik Lawrence Henderson (1878 – 1942). Pisze on: *Cały proces ewolucyjny, zarówno kosmiczny, jak i organiczny, jest jednością, i badacz przyrody może teraz zasadnie uważać cały Wszechświat za biocentryczny.*

Henderson był pod wrażeniem wyraźnie teleologicznego (nakierowanego na cel) charakteru wielu procesów fizjologicznych występujących w przyrodzie. Zwrócił on uwagę na precyzyjną regulację kwasowości i zasadowości w ciele zwierzęcym, na zadziwiające dopasowanie (fitness) istniejące między substancjami nieorganicznymi (woda, CO₂), a

wykorzystującymi je procesami fizjologicznymi. W książce „*The Fitness of the Environment*” (1913) pisze: *Darwinowska „fitness” jest określeniem wzajemnego stosunku między organizmem, a środowiskiem. „Fitness” środowiska jest składnikiem nie mniej ważnym niż „fitness” powstająca w procesie ewolucji organicznej.* Materia nieożywiona musiała najwyraźniej wykazywać pewne cechy, bez których przebieg procesów życiowych byłby niemożliwy. Cechy te od początku sprzyjały powstaniu i rozwijaniu się życia. Życie tworzy się wszędzie tam, gdzie warunki sprzyjają przypadkowo takiemu procesowi (samoródtwo). Tak więc ogólne astronomiczne i fizyczne cechy Ziemi są z pewnością dopasowane do wymagań życia. O ile warunki astronomiczne nie są wyjątkowe, to warunki chemiczne występujące na Ziemi, są niepowtarzalne i wyjątkowe. Najbardziej dopasowana do życia jest woda. Jej nietypowe cechy to ciepło właściwe, ciepło utajone, przewodnictwo cieplne, napięcie powierzchniowe, rozszerzanie się w pobliżu punktu zamarzania. Woda wyrównuje temperaturę globu, umożliwia regulację temperatury wewnątrz organizmu. *Woda, z samej swej natury, jako automatyczny produkt ewolucji kosmicznej, jest dostosowana ...dla potrzeb życia. To jej dostosowanie jest niemniej cudowne i złożone jak przystosowanie organizmów do środowiska podczas adaptacji i trwania ewolucji.*

Dwutlenek węgla, podobnie jak woda, spełnia podwójną rolę. Jest on czynnikiem niezbędnym dla życia wielu organizmów i decyduje o parametrach termicznych środowiska. Organizmy żywe wiążą większość gazowego CO₂ i w efekcie końcowym deponują węgiel w geologicznych osadach wapiennych. Proces ten jest między innymi źródłem gazowego tlenu w atmosferze. „Dopasowanie” CO₂ dla celów życiowych to jego rozpuszczalność w wodzie i formowanie kwasów. Rozpuszczony CO₂ daje odczyn kwaśny (kwas węglowy), a zawierająca go woda staje się rozpuszczalnikiem wielu związków i minerałów. Kwas węglowy rozpuszczony ze swoimi solami czyni roztwór neutralnym. Gdy silny kwas zostaje dodany do roztworu, dwutlenek węgla uchodzi do atmosfery, a jony wodoru łączą się z tlenem tworząc wodę. W ten sposób całe środowisko utrzymywane jest w stanie neutralnym.

Węgiel wykazuje cechy, które z perspektywy procesów życiowych nabierają specjalnego znaczenia. Tworzy on wiązania węglowo-węglowe o nieskończonej liczbie kombinacji i złożoności, stabilne w normalnej temperaturze. Inne pierwiastki jak tlen, azot wodór tworzą łatwo związki z węglem.

Oceany wykazują cechy „dopasowania” dla życia przez swą stabilność, mimo zmiennych wpływów zewnętrznych, stałą temperaturę w głębinach, stałe zasolenie, stałą

alkaliczność i stałe stężenie jonów wapniowych. Cechy te utrzymywane są w długim przedziale czasu, tak jakby były regulowane.

Jak zrozumieć przyczyny adaptacji środowiska dla potrzeb życia. Co jest przyczyną zbieżności cech środowiska i potrzeb życia. Czy niektóre przystosowania (dopasowanie powietrza, oceanów, wody) są wynikiem regulacji – geofizjologii. Choć Henderson nie użył słowa „geofizjologia”, to jego poglądy oparte na ówczesnym stanie wiedzy niewiele odbiegały od założeń hipotezy Gai.

Poprzednik Hendersona, współpracownik Darwina, Alfred Russel Wallace (1823 – 1913), w książce *Wiek cudów*, podsumowującej osiągnięcia XIX wieku, pisze: *kiedy pokazuję, że są ważne powody, aby sądzić, że człowiek jest wyjątkowym i najwyższym tworem tego wielkiego Wszechświata, niektórzy nie wahają się, by zrobić krok dalej i mniemać, że cały Wszechświat powstał w istocie w tym właśnie celu.* W wymienionej książce przedstawia on problemy: środków komunikacji, środków oszczędzających pracę, fotografii, analizy spektralnej, odkryć fizyki, chemii, astronomii. Jeden rozdział poświęca roli kurzu, jako czynnika niezbędnego do istnienia życia na Ziemi. W oparciu o doświadczenie Johna Tyndalla z 1868 roku, dotyczącego rozpraszania światła na drobinach kurzu, dowodzi, że bez kurzu w atmosferze na Ziemi byłoby ciemno, nie byłoby deszczy. W książce „*Man's Place*” dowodzi, że warunki panujące na Ziemi (i tylko te warunki) mają podstawowe znaczenie dla życia organicznego, i że właściwie wszystkie cechy i parametry tych warunków sprawiają wrażenie, jakby były specjalnie dobrane dla potrzeb życia. Warunkami tymi są: regularna dostawa energii w postaci promieniowania słonecznego, (obecność światła i ciepła), obfitość wody, występowanie atmosfery o odpowiedniej gęstości zawierającej tlen, dwutlenek węgla, parę wodną, azot, amoniak, alternacja dnia i nocy. Również takie cechy środowiska jak rozmiary Ziemi, ukształtowanie lądów decydujące o kierunkach prądów morskich, położenie Ziemi w stosunku do Słońca decydują o możliwości życia na Ziemi.

Nie tylko uczeni końca XIX wieku wypowiadali poglądy o Ziemi żywej. Od czasów archaicznych ludzie przypisywali pierwiastek ożywiony i duchowy wszelkim obiektom naturalnym, które miały być przez te siły kierowane i ożywiane. Przedmiotem kultu były kamienie, drzewa, zwierzęta, góry, ponieważ one miały mieć dusze. Ten pierwotny i archaiczny system religijny nazywany jest *animizmem*. Świat tych wierzeń dążył do harmonijnego życia w przyjaznym świecie.

Świat składał się z przestrzeni, czasu i życia. Przestrzeń i czas dzieliły się na dwie strefy: *sacrum* – sferę uporządkowaną, niezmienną, harmoniczną, czyli kosmiczną. Sfera ta

sięgała do początku stworzenia lub wyłonienia się Ziemi z nicości. Drugą sferą jest *profanum* – sfera chaosu i nieporządku.

Tęsknota za *sacrum* kazała czcić góry, budować wysokie świątynie i łączyć się z kosmosem, miejscem narodzin Ziemi. Drzewo życia czczone w wielu rejonach Ziemi, łączyło korzeniami Ziemię z niebem. Zmienność sezonowa drzewa symbolizowała cykl narodzin i śmierci. Sakralność życiodajnych sił przyrody, cykliczność narodzin i śmierci wyzwolił kult Matki Ziemi.

O traktowaniu Ziemi jako żywej istoty świadczy modlitwa do bóstwa Ziemi Indian Zuni z Nowego Meksyku: *Niech twórca deszczu zrosi Matkę-Ziemię, by mogła pięknie wyglądać. Niech twórca deszczu zrosi Matkę-Ziemię, by mogła wydać owoce i ofiarować je swym dzieciom i całemu światu.....*

Pojęcia cykliczności życia, solidarności wszystkich żywych istot, konieczność życia w zgodzie z sakralną Naturą występują w filozofii hinduskiej i chińskiej. Pojęcia te odradzają się współcześnie i mają wpływ na poglądy wielu „ojców” nowożytnego przyrodoznawstwa i nauk o Ziemi.

W Grecji Gaja była czczona raczej jako Matka-Ziemia, bogini życia i śmierci. Homer (IX-VII w. p.n.e.) traktował Ziemię jako życiodajną matkę, powołującą wszystko do życia i do śmierci.

Ajschylos (525 – 456 p.n.e.) – Ziemia rodzi wszelkie istoty, żywi je, potem w siebie przyjmuje jako zadatek nowego życia.

Jońscy filozofowie przyrody zajmowali się początkami kosmosu i materii: Tales (VII-VI w. p.n.e.) – twierdził, że woda przechodząc przez niekończące się cykle zamarzania i parowania dowodzi zmienności świata. Anaksymenes (610 – 550 p.n.e.) – twierdził, że powietrze jest „początkiem wszystkiego co istnieje”. Heraklitowi (VI/V w. p.n.e.), przypisuje się twierdzenie, że nie można dwa razy wejść do tej samej rzeki. Świat jest pełen chaosu, zamętu i jest nieokreślony, twierdzi Anaksymander (610 – 540 p.n.e.). Wszystkie wymienione poglądy niosą to samo przesłanie; materia zawsze istniała. Powietrze, woda, ogień, chaos – symbolizują materię w najmniej zorganizowanej formie. Świat został powołany do życia z bezkształtnej, chaotycznej materii. Wszystkie przyszłe możliwości były w tej chaotycznej materii „rozpuszczone”. Z tego stanu wyłonił się świat z całą swoją złożonością. Czy to znaczy, że w stanie początkowym entropia świata miała największą wartość?

W greckiej filozofii pod pojęciem żywego świata istniało całe spektrum możliwości. Życie było wszechobecne, od kosmosu aż po pojęcie Ziemi jako zwierzęcia (Platon).

Organizmy żywe od martwych różniły się posiadaniem duszy. Stąd „anima mundi”- dusza świata była wszechobecna.

Życie jest zjawiskiem cyklicznym. Narodziny i śmierć, jest takim samym zjawiskiem jak ruch i harmonia. Woda w cyklach parowania i zamarzania oraz powietrze są początkiem wszystkiego teraz i po śmierci. Przez transformacje, śmierć i narodziny, wszystko na świecie jest ze wszystkim związane.

W koncepcji Heraklita pojawia się LOGOS, przenikający cały Kosmos i nadający mu sens i ład. Człowiek jest istotą złożoną z tych samych elementów i podlega tym samym zjawiskom co cały Wszechświat. Mikro- i makro-świat są ze sobą wzajemnie powiązane.

Eleaci (V w. p.n.e.) twierdzili, że w realnym świecie wszystko co żyje na Ziemi od Ziemi pochodzi i do Ziemi wraca w nieskończonym kołowym zdarzeń. Empedokles (490 – 430 p.n.e.) twierdził, że nic co śmiertelne nie zostało stworzone, a śmierć niczego nie kończy. Platon (427 – 347 p.n.e.) postuluje świat materialny wieczny, cykliczny, a przede wszystkim żywy, a może i czujący biologiczny organizm. Ponieważ świat obejmuje wszystko, więc nie potrzebuje pożywienia ani nie wydziela odpadów. Jest on idealną żywą istotą.

Według Arystotelesa (384 – 322 p.n.e.) świat jest wieczny, cykliczny z nieustającym obiegiem materii. Świat, w którym jednostkowa śmierć nie oznacza kresu wszystkiego: *Spośród bytów indywidualnych jedne rodzą się, inne osiągają pełny rozwój, jeszcze inne umierają. Narodziny zastępują umieranie, jedne byty zastępują inne.* Świat Arystotelesa jest hierarchiczny.

Stoicy (około 300 p.n.e.) – świat jest wieczny, cykliczny, harmonijny i żywy. Jest on teleologiczny i antropiczny. Wszystko na Ziemi jest celowe. Dowodzą tego morza, powietrze, rośliny, zwierzęta i centralne położenie Ziemi. Według stoików, każdy nowy cykl jest dokładnie odtworzeniem poprzedniego. Ta stoicka wizja świata objawiła się w pojęciach etycznych dotyczących społeczeństwa i państwa. Tak narodziła się zasada Hipokratesa: „przede wszystkim nie szkodzić” .

Nauka stoików została zaakceptowana przez rzymian. Marek Aureliusz (121 – 180 n.e.) głosił: *żyj i działaj zgodnie z Naturą, gdyż jesteś jej częścią, i twoje zachowanie nie pozostaje bez wpływu na jej globalną całość.*

Atomiści do wiecznego i cyklicznego świata wprowadzili pojęcie atomów, które w ciągłym ruchu i w zderzeniach są odpowiedzialne za jego zmienność. Wprowadzili oni pojęcie wielu światów. W jednym z nich my żyjemy. Światy żyją i umierają. Jedne mają

Ziemię i księżyc. Są też zupełnie inne. Są światy poza percepcją, będące wytworem umysłu ludzkiego.

Greckie pojęcie świata cyklicznego i wiecznie żywego wstępuje w pismach Owidiusza (43-18 p.n.e.) „*Metamorfozy*” nawiązujących do *arystotelowskiego* „*O powstaniu i ginięciu świata*”, w pismach Seneki (5 p.n.e. – 65 n.e.) „*Zjawiska natury*”. W pracach tych opisano funkcje wód i złóż podziemnych oraz nawiązano do pojęcia Matki-Ziemi.

W starożytnej Aleksandrii, pełnej wschodnich wpływów i wierzeń, rozwijał się kult Matki-Ziemi lub Wielkiej Matki. Filon (20 p.n.e. – 50 n.e.) pod wpływem judaizmu i platonizmu głosił, że Kosmos jest produktem aktywnego Logosu, boskiej emanacji w świecie. Jest on harmonijny i racjonalny, cały przesiąknięty pierwiastkami życia. Plotyn (204 – 269) głosił poglądy Platona, zawarte w „*Eneadach*”, w nieco nowej wersji. Poglądy te zwane są neoplatonizmem. Nowością neoplatonizmu jest stwierdzenie, że Świat nie jest święty; jest to świat zła i występku. Jest to kres poglądów hellenistycznych, a jeszcze nie pojawił się świat chrześcijański.

Upadek Cesarstwa Rzymskiego i pojawienie się chrześcijaństwa spowodowało zastąpienie naturalistycznego spojrzenia na świat spojrzeniem spirytualistycznym, zastąpienie bezosobowej duszy świata Bogiem osobowym istniejącym poza obszarem naturalnego świata. Nastąpił odwrót od Natury, od oddawania czci drzewom, gór, bożkom. Dawne hellenistyczne idee trwały jednak na obrzeżach świata, zwłaszcza w kręgach arabskich. Arabowie podbijając Europę przynieśli do niej grecką filozofię. Pełne otwarcie na filozofię grecką nastąpiło w okresie Oświecenia.

Giordano Bruno (1548 – 1600) znowu widzi Naturę jako wieczną, racjonalną i żywą istotę, rodzącą z siebie wciąż nowe formy życia. Raz jest to maszyna, raz zwierzę.

Odkrycie Ameryki wyzwoliło ekspansję, chęć podbojów. Ziemia stawała się towarem, zasobem do wykorzystania. Walka z Naturą i jej eksploatacja zostały usankcjonowane

Francis Bacon (1561 – 1626), ojciec racjonalności w nauce znany jest jako pogromca natury. Propagował uczynienie z natury „niewolnicy”. Powiedzenie „człowiek człowiekowi wilkiem” święciło tryumfy.

W XVII wieku pojawiła się w Anglii szkoła neoplatoników. Henry More (1614 – 1687) i Ralph Cudworth (1617 – 1688) propagują Ziemię żywą, a William Hobbs dowodzi po raz pierwszy, że skały osadowe są pochodzenia biologicznego.

John Ray (1627 – 1705, przyrodnik), napisał książkę: „*The Wisdom of God, Manifested in the Works of the Creation*”. Nie istniała jeszcze wówczas geologia jako nauka.

Dyskutowanym problemem była denudacja – wietrzenie i erozja. Procesy te prowadzące do niszczenia trudno było wpisać w celowo urządzony świat. Wietrzenie i zmywanie gór było trudne do wyjaśnienia. Chociaż proces ten trwał bardzo długo, Ziemia nie była płaska. Mimo, że w starożytności proces ten tłumaczono wulkanizmem i działaniami sejsmicznymi, to chrześcijańska Europa, przyjmując określony czas stworzenia Ziemi, nie mogła sobie z denudacjami poradzić. Ray przyjął, że proces denudacji jest twórczy, ponieważ w jego wyniku powstaje urodzajna gleba. Ray rozważa celowość w przyrodzie, która powstała nie przypadkowo. Opisuje wpływ Księżyca na rozjaśnienie ciemnych nocy oraz przydatność powietrza, wody i minerałów dla życia. Dlaczego jest tyle wody na Ziemi?. Rozważa klimat Ziemi przy różnym położeniu jej osi. Jego maksyma głosi: natura nie obfituje ani w rzeczy zbędne, ani nie brakuje jej tego co konieczne.

James Hutton (1726 – 1797, lekarz i chemik), w swoim dziele: „*Teoria Ziemi*”, pisze: *Bez świecącej w środku gwiazdy, i bez okrążającej jej planety, nie byłoby żywych istot na powierzchni Ziemi....*Hutton zajmuje się człowiekiem i jego powiązaniem ze środowiskiem. Istnieje więź między organizmem ludzkim, a światem mineralnym (skład krwi). Wietrzenie twardych skał dostarcza roślinom niezbędnego pożywienia. Denudacja musi być kompensowana czynnikiem renowacyjnym. Pisze on dalej: *Badając ziemski system..... stwierdzamy, że jest on przystosowany do spełniania określonych funkcji. Forma i budowa masy globu jest w równej mierze obliczona na potrzeby tej Ziemi jako zamieszkałego świata..... tworzy odpowiednie środowisko przystosowane do życia roślin i zwierząt.....*Na Ziemię trzeba patrzeć jako na celowy mechanizm, którego niezmiennie i podlegające prawom Natury czynniki fizyczne nadają abiotycznemu środowisku Ziemi właściwe i korzystne dla życia cechy. Te niezmiennie czynniki sprawiają, że Ziemia jest i zawsze była odpowiednia dla życia. Ziemia jest nakierowana na cel maszyną, która wymaga kontroli i korygowania odstępstw od właściwego działania. *Czy może jest ona raczej ciałem ożywionym, takim, w którym nieublagane niszczenie maszynierii jest w sposób naturalny odwracane, przy użyciu tych samych mocy, które doprowadziły do jej utworzenia. Celem Ziemi jest podtrzymywanie życia roślin i zwierząt, a nie jego niszczenie.*

Jean B. Lamarck (1744 – 1829, botanik), pisze: *Żywe istoty w swych działaniach organicznych bez przerwy wytwarzają związki, które w inny sposób nigdy by nie powstały na Ziemi.... Działanie to, naturalny rezultat ich istnienia, i szczątki pozostawione przez niezliczone ich pokolenia, bez przerwy przekształcają skorupę Ziemi.* Lamarck w *Hydrogeologii* (wydanej w 1802 roku) przedstawia koncepcje wzajemnego oddziaływania

życia i nieożywionego środowiska, o biogenicznym pochodzeniu całej skorupy ziemskiej. Denudacja prowadząca do transportu zwietrzelin do mórz jest rekompensowana działaniem oceanów pod wpływem księżyca, prowadzącym do rozmywania brzegów. Skały i minerały dzieli on na utwory pochodzenia roślinnego (iły) i zwierzęcego (wapienie). Lamarck twierdzi, że życie podlegające różnym wpływom fizykochemicznym samo bardzo aktywnie modyfikuje swoje środowisko. Pojęcie „środowisko abiotyczne” (bez życia) traci sens, ponieważ jest ono niemal w całości kontrolowane i tworzone przez żywe organizmy.

Jędrzej Śniadecki (1768 – 1838, lekarz, przyrodnik), w pracy: *Teoria jestestw organicznych* (1804), przedstawia rozmyślenia nad chemią, fizjologią, biologią, medycyną, filozofią, antropologią i geologią, a zwłaszcza nad wzajemnymi związkami między Ziemią, a zamieszkującymi ją żywymi organizmami. Z badań nad składem meteorytów wnioskuje on o jednorodnej budowie Ziemi i Kosmosu. Śniadecki zakłada jedność całej materii w przyrodzie i ścisłej współzależności życia i materii nieożywionej. Ale nie są to światy tożsame. Różnią się organizacją. Człowiek jest małą cząstką całości świata organicznego, a ten małą cząstką świata fizycznego. Życie i jego fizyczne środowisko nie są rozdzielone, ale stanowią nierozdzielalną jedność. Całość ma charakter uniwersalny, wieczny i samoregulujący się. Motorem napędzającym mechanizm funkcjonowania Ziemi jest życie, a ono korzysta z zewnętrznego źródła energii jakim jest Słońce.

William Whewell (1794 – 1866, duchowny, przyrodnik), pisze: *Jest coś niezwykłego w traktowaniu całej naszej planety, od bieguna do bieguna i od równika do środka Ziemi, jako sposobu na utrzymanie gatunków, roślin, w najlepszym położeniu dla ich pomysłowości.*

Adaptacja może zachodzić poprzez prawa nieożywionej natury dostosowane do przewidywanych potrzeb żywych istnień, albo przez dostosowanie organizacji życia do wcześniej ustalonych praw natury. O dostosowaniu praw natury do potrzeb życia świadczą właściwości wody. Gdyby woda nie miała dwóch punktów, w których się rozszerza, nie występowała w trzech stanach skupienia, nie miała dużego ciepła utajonego, gdyby zachowywała się „normalnie”, nie mogłoby na Ziemi istnieć życie. Woda przekracza ogólne prawa nieożywionej przyrody, tak jakby miała zapewniać korzystne dla życia efekty. Również skład i ciśnienie powietrza jest dla życia optymalne. Życie może istnieć tylko w ściśle określonych warunkach.

Tak więc poprzednicy Wiernadskiego zajmujący się przyrodoznawstwem, jak i religijne poglądy wspólne dla wielu kultur w dziejach ludzkości, wciąż traktują Ziemię jako

jednorodny ożywiony obiekt, jakby celowo przystosowany dla potrzeb życia. Hipoteza Gai jest więc głęboko zakorzeniona zarówno w poglądach naukowych, jak i mitologicznych.

5. *Daisyworld*

Opracowany przez J.E. Lovelocka matematyczny model regulacji temperatury na hipotetycznej planecie podobnej do Ziemi, miał na celu udowodnić, że taka regulacja jest możliwa w oparciu tylko o fizyczne właściwości organizmów żywych [13]. Właściwości te to wartość albedo i wpływ temperatury na szybkość wzrostu roślin. Pozostałymi fizycznymi czynnikami powodującymi regulację temperatury jest podstawowe prawo fizyczne dotyczące równowagi między ilością energii absorbowanej i wypromieniowanej. Model ten odpiera zarzuty biologów jakoby rośliny we wzajemnym porozumieniu musiały ustalać dogodną dla siebie temperaturę planety. Poniżej podano obliczenia temperatury Ziemi wykonane przez autora i B. Drozdowicza w oparciu o model Daisyworld opublikowany w pracy [13].

Założenia modelu:

1. Planeta o wymiarach takich jak Ziemia krąży wokół gwiazdy takiej jak Słońce i otrzymuje tyle samo energii co Ziemia w postaci promieniowania o takich samych długościach fal.
2. Na planecie nie występują chmury i nie ma efektu cieplarnianego.
3. Emisja promieniowania gwiazdy zwiększa się w czasie, podobnie jak w przypadku Słońca.
4. Planeta jest nawodniona, deszcze padają tylko w nocy.
5. Na planecie występują dwa gatunki elementów żywych (na przykład mogą rosnąć ciemne i jasne rośliny (stokrotki) i może występować nagi grunt. Rośliny i grunt mają różne albedo: np. ciemne: $A_b = 0,2$, jasne: $A_w = 0,8$, grunt szary: $A_g = 0,4$.
6. Wegetacja roślin zależy od temperatury panującej na planecie.
7. W pewnym okresie na planecie wystąpiły warunki umożliwiające wegetację roślin.

Szybkość wzrostu roślin, określona współczynnikiem β , jest funkcją paraboliczną w postaci:

$$\beta = 1 - 0,003265 (22,5 - t)^2 \quad (1)$$

Dla $t = 5^\circ\text{C}$ i $t = 40^\circ\text{C}$, $\beta = 0$, to znaczy, że rośliny mogą wegetować w tym przedziale temperatur. Temperatura wynosząca $22,5^\circ\text{C}$ jest dla nich optymalna, β osiąga wartość maksymalną. Rysunek 1 przedstawia zależność szybkości wzrostu roślin od temperatury.

Średnia temperatura planety ustali się na poziomie wynikającym z porównania promieniowania otrzymanego od Słońca i wyemitowanego przez planetę:

$$\sigma (T_p + 273)^4 = S L (1 - A) \quad (2)$$

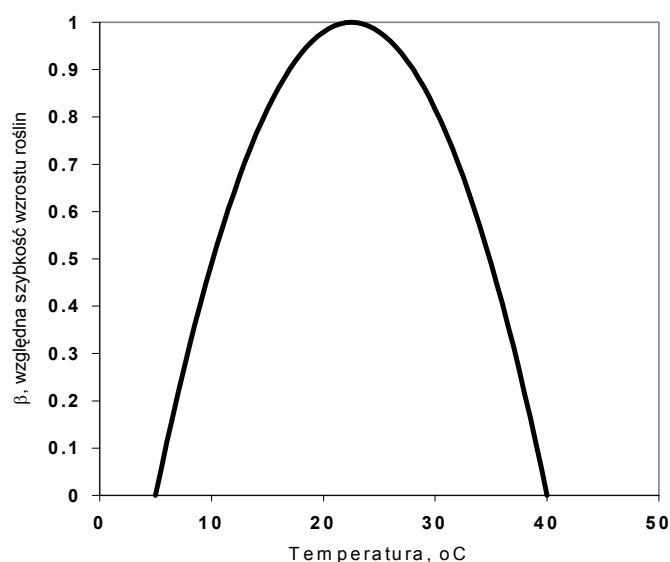
gdzie: σ – stała Stefana-Boltzmana ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K}^4)$),

S – stała słoneczna wynosząca $1375 \text{ W}/\text{m}^2$,

L – bezwymiarowy współczynnik określający krotność zmiany promieniowania Słońca w stosunku do obecnego poziomu,

A – albedo planety,

T_p – temperatura planety, K.



Rys. 1. Zależność szybkości wzrostu roślin (β) od temperatury.

Gdyby na planecie nie występowało życie w jakiegokolwiek postaci, to jej temperatura określona byłaby tylko przez jej albedo i zmieniałaby się w czasie tak jak zmieniałaby się energia dostarczana przez gwiazdę. Zależność temperatury planety o różnym albedo dla zmiennej energii emitowanej przez gwiazdę przedstawiono na rysunku 2.

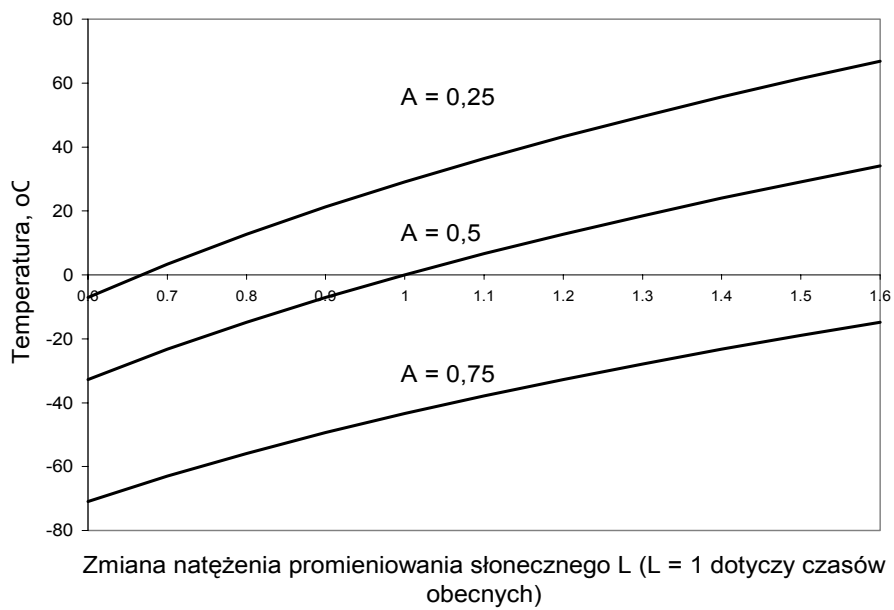
Jeśli temperatura planety po pewnym czasie osiągnie temperaturę 5°C , to rośliny zaczną wegetować. Maksymalną populację osiągną one wtedy, kiedy temperatura planety będzie wynosić $22,5^\circ\text{C}$. W miarę dalszego wzrostu temperatury rośliny na planecie zaczną obumierać, jak przedstawiono na rysunku 3. Taka sytuacja wystąpiłaby wtedy, kiedy rośliny nie oddziaływały na środowisko i nie zmieniały jego temperatury.

Inna sytuacja wystąpi wtedy, kiedy powierzchnia planety pokryta roślinami zmieni albedo planety. Wartość tego albedo będzie zależeć od rodzaju roślin, ich albedo i

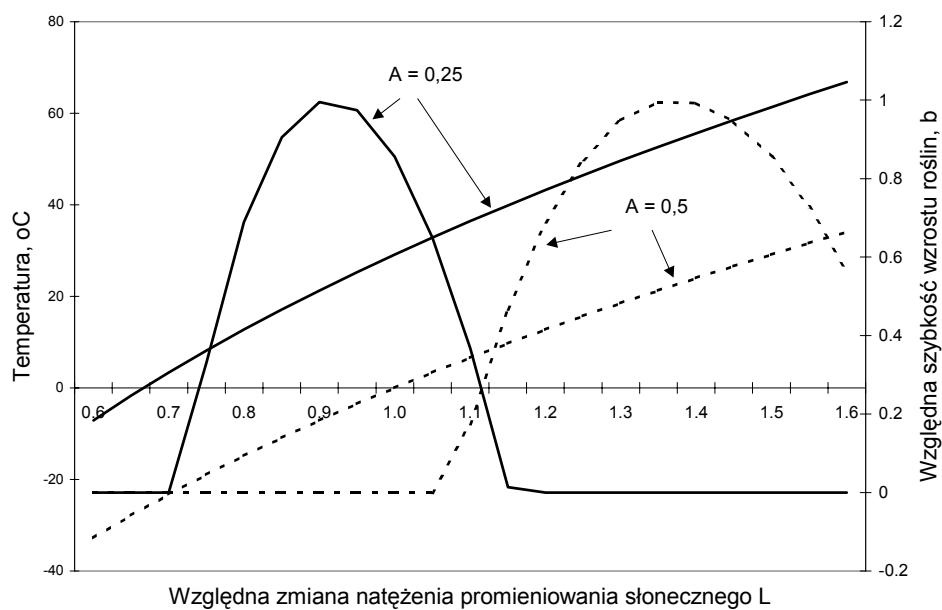
powierzchni jaką pokryją. Zmianę w czasie powierzchni planety pokrytej roślinami białymi i czarnymi opisują równania:

$$\frac{d\alpha_b}{dt} = \alpha_b (x\beta_b - \gamma_b) \quad (3)$$

$$\frac{d\alpha_c}{dt} = \alpha_c (x\beta_c - \gamma_c) \quad (4)$$



Rys. 2. Zależność temperatury planety od natężenia promieniowania słonecznego dla różnych wartości albedo planety.



Rys. 3. Temperatura i szybkość wzrostu roślin na planecie z albedo = 0,25 (linie ciągłe) i 0,5 (linie przerywane) dla albedo 0,25 i 0,5 w przypadku kiedy obecność roślin nie wpływa na temperaturę planety,

gdzie: α_b i α_c - powierzchnie planety pokryte przez rośliny białe i czarne,

x - powierzchnia planety nie pokryta przez rośliny, $x = p - \alpha_b - \alpha_c$,

p – parametr proporcjonalny do powierzchni planety, przyjęto $p = 1$,

β_b i β_c - szybkości wzrostu roślin białych i czarnych na jednostkę powierzchni i czasu,

γ_b i γ_c parametry określające szybkość umierania roślin białych i czarnych na jednostkę czasu.

Zaniedbując kulisty kształt planety, jej wypadkowe albedo wynosi:

$$A = \alpha_b A_b + \alpha_c A_c + \alpha_s A_s \quad (5)$$

gdzie: α_s - powierzchnia nie pokryta przez rośliny,

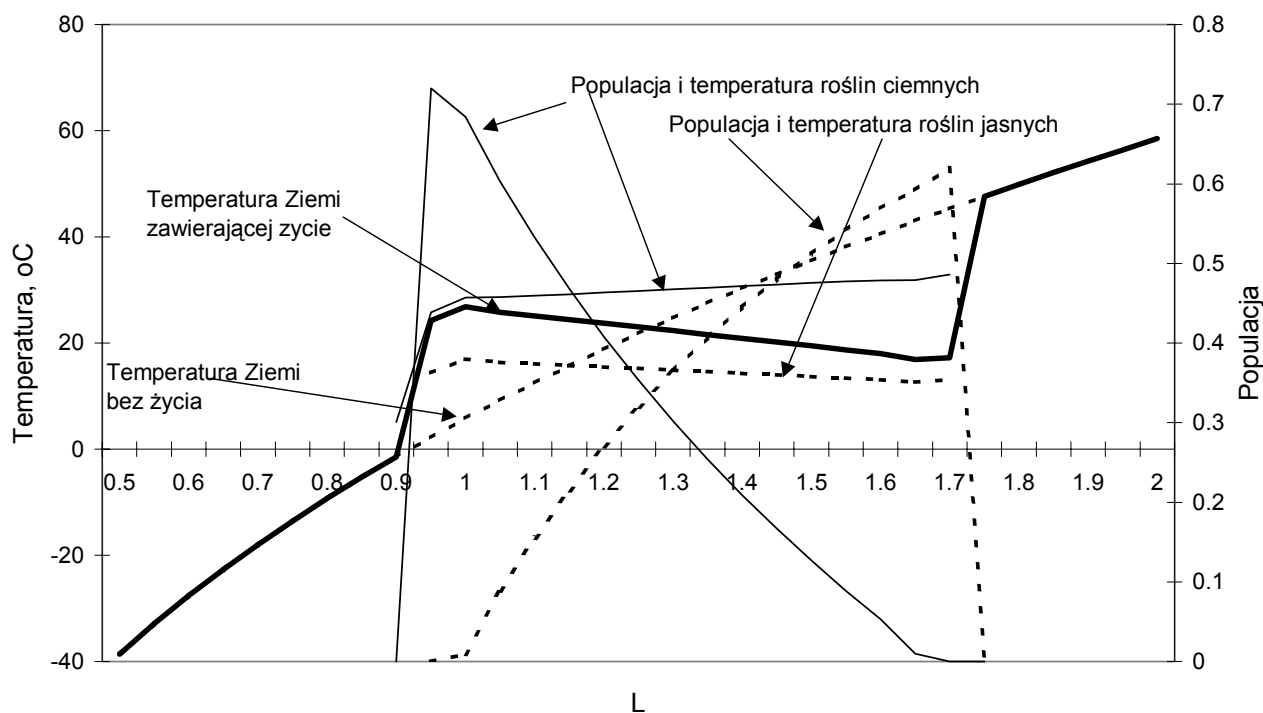
A_b , A_c i A_s - wartości albedo powierzchni pokrytych przez rośliny białe, czarne i powierzchni nie pokrytej (szarej).

Powierzchnia pokryta przez rośliny czarne będzie miała mniejsze albedo, i jej temperatura będzie wyższa od średniej temperatury planety. Rośliny białe będą odbijały więcej promieniowania słonecznego i powierzchnia nimi pokryta będzie miała temperaturę niższą od średniej występującej na planecie. Różnicę między temperaturą planety (T_p), a temperaturą powierzchni pokrytej przez rośliny białe (ΔT_b) i rośliny czarne (ΔT_c) określają zależności:

$$\Delta T_b = [q(A - A_b)]^{1/4} \quad (6)$$

$$\Delta T_c = [q(A - A_c)]^{1/4} \quad (7)$$

gdzie: $q = \frac{S L}{\sigma}$.



Rys. 4. Temperatura planety (ciągła linia pogrubiona) regulowana przez rośliny białe i zmiennym natężeniu promieniowania Słońca. Obliczenia wykonano dla: $S = 685 \text{ W/m}^2$, $k = 0,2$, $t_{\text{opt.}} = 22,5^\circ\text{C}$, albedo roślin białych, czarnych i szarych równych odpowiednio: $A_b = 0,75$, $A_c = 0,25$, $A_s = 0,5$, współczynników umieralności roślin białych i czarnych równych: $\gamma_b = \gamma_c = 0,27$.

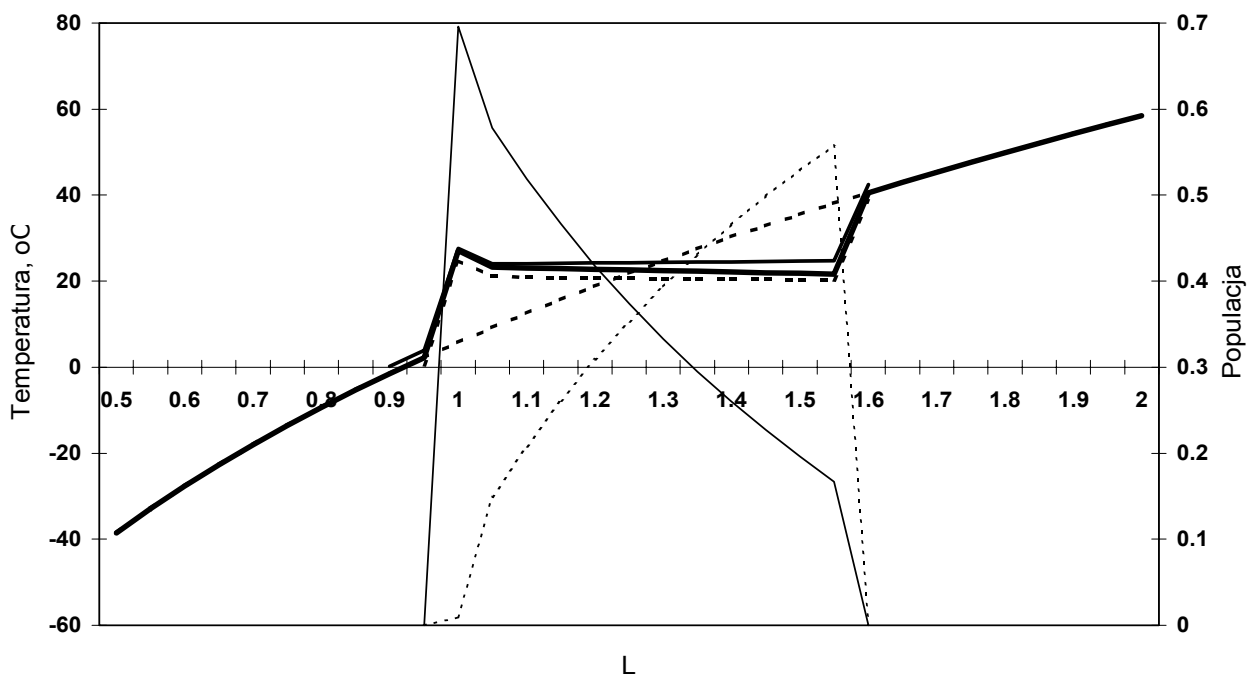
Dla $q = \frac{SL}{\sigma}$, ΔT_b i ΔT_c przyjmują wartości maksymalne, to znaczy między powierzchniami pokrytymi przez rośliny białe i czarne nie występuje wymiana energii. Jeśli $q = \frac{SL}{\sigma} = 0$, to wówczas ΔT_b i $\Delta T_c = 0$, między tymi powierzchniami występuje doskonała wymiana energii. Do obliczeń wprowadzono parametr $q' = k \cdot q$, a wartość parametru k zmieniano od 0,01 do 0,4. Równania 3 i 4 rozwiązywano metoda numeryczną.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki obliczeń temperatury planety, powierzchni pokrytych roślinami białymi i czarnymi oraz temperaturę na tych powierzchniach dla współczynnika $k = 0,2$, to znaczy dla słabej wymiany energii między tymi powierzchniami.

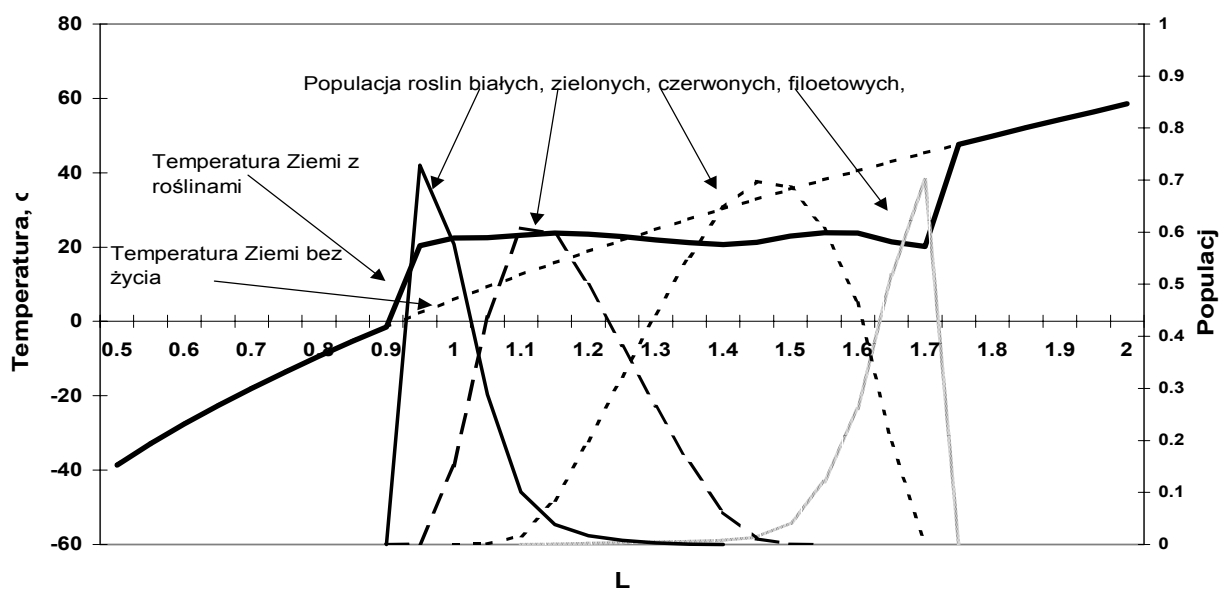
Kiedy temperatura planety osiągnie minimalną temperaturę 5°C , przy której mogą rozpocząć wegetację rośliny, wtedy rośliny czarne będą absorbować więcej promieniowania.

Temperatura będzie wzrastać powodując dalsze przyspieszenie ich wegetacji zgodnie z krzywą przedstawioną na rysunku 1. Rośliny białe będą odbijać więcej promieniowania. W tym rejonie temperatura będzie niższa hamując wegetację roślin. W miarę wzrostu natężenia promieniowania słonecznego, wegetacja roślin czarnych osiągnie wartość maksymalną, pokrywając maksymalną powierzchnię planety, a następnie ich populacja zacznie spadać. Rośliny białe, mimo że przy większym natężeniu promieniowania słonecznego będą go odbijać, będą się rozwijać i pokryją maksymalną powierzchnię planety. Z kolei przy zbyt dużym natężeniu promieniowania słonecznego, jego odbijanie nie zapewni dogodnej temperatury i rośliny białe będą umierać. W ten sposób dwa gatunki roślin pokrywające powierzchnię planety powodują zmianę jej albedo tak, że przy narastającym natężeniu promieniowania słonecznego temperatura jej powierzchni pozostaje stała w zakresie dogodnym dla ich wegetacji.

Na rysunku 5 przedstawiono regulację temperatury planety również przez dwa typy roślin, białych i czarnych, ale przy małej wymianie energii między powierzchniami zajętymi przez te rośliny ($k = 0,05$). Na rysunku 6 przedstawiono stabilizację temperatury planety przez cztery rośliny o albedach podanym w podpisie rysunku. Widać, że w miarę wzrostu liczby organizmów żywych uczestniczących w albedo planety, stabilizacja jej temperatury jest lepsza. W przypadku Ziemi, liczba składników ekosystemu jest tak duża, że wszystkie one razem powodują stabilność temperatury w dużym przedziale zmian promieniowania słonecznego, a więc i czasu, kiedy natężenie promieniowania słonecznego ulegało zmianom.



Rys. 5. Zależności podobne jak na rys. 4, dla $k = 0,05$.



Rys. 6. Stabilizacja temperatury planety przez cztery rośliny o różnych albedach. Albedo roślin białych, zielonych, czerwonych, fioletowych i powierzchni szarej wynoszą odpowiednio 0,7, 0,6, 0,4, i 0,5. pozostałe parametry obliczeń jak rysunek 5.

Rozpatrywany model umożliwia określenie temperatury planety dla roślin, dla których współczynnik β osiąga wartość maksymalną, przy różnych temperaturach. Przedstawiony model umożliwia również badanie wpływu szeregu czynników na temperaturę planety, np. pląg wywołujących nagłą zmianę powierzchni pokrytych przez rośliny, wpływ zmiennego natężenia promieniowania słonecznego wywołanego plamami.

6. Opis rozwoju życia na Ziemi z punktu widzenia hipotezy Gai

6.1. Zarys rozwoju życia na Ziemi w erze archaicznej

Ziemia, za nim powstało na niej życie, była martwa. Jej atmosfera znajdowała się w stanie bliskim równowagi chemicznej. W tym czasie, przed Gają, atmosfera pozostawała w „abiologicznym stanie ustalonym”. To określenie nie oddaje stanu rzeczywistego planety, na której mogły występować huragany i tornada, wulkany i wiry, zakłócające ciszę stanu ustalonego. Wczesna Ziemia musiała mieć powierzchnię o składzie sprzyjającym powstaniu na niej życia. W jej skład, tak zwany „stan organiczny”, musiały wchodzić kwasy aminowe, proteiny, nukleotydy, i inne składniki cząsteczek naszych komórek, zawierających genetyczne informacje, cukry, polisacharydy, i wiele innych podstawowych składników materii organicznej. Ważne jest stwierdzenie, że te składniki organiczne uważane za ważne dla życia, są również produktami stanu abiologicznego. Obecność takich składników na planecie wolnej od tlenu nie stanowi ewidentnego dowodu powstania życia. Stwarza to tylko taką możliwość.

Czynnikiem sprzyjającym powstaniu życia na Ziemi musiały być nie tylko warunki chemiczne, ale również klimat. Pewne stare skały świadczą o tym, że zostały uformowane przez sedimentację cząsteczek. Ich warstwowa struktura sugeruje obecność jezior lub mórz, czyli obecność wód powierzchniowych. Istnienie życia i przed życiowych składników chemicznych wymaga temperatury w granicach od 0 do 50°C. Ziemia nie mogła być zamrożona ani znajdować się w temperaturze wrzenia wody.

W ważnej publikacji z 1979 roku, trzech chemików i klimatologów, T. Owen, R.D. Cess i V. Ramanathan, przedstawia obliczenia średniej temperatury Ziemi przed powstaniem życia. Autorzy ci wzięli pod uwagę astrofizyczne dane świadczące o tym, że gwiazda staje się cieplejsza z wiekiem. Założyli oni, że ilość energii dostarczanej do Ziemi ze Słońca na początku jej formowania była o 25% mniejsza niż obecnie. Przyjęli też, że

dwutlenek węgla był wydzielany z wnętrza Ziemi. Na tej podstawie obliczono, że średnia temperatura powierzchni Ziemi wynosiła 23°C. Była to więc temperatura typowa dla obecnych stref zwrotnikowych. Taka temperatura była możliwa przy obecności od 200 do 1000 razy wyższego stężenia dwutlenku węgla w powietrzu, w porównaniu ze stężeniem obecnym. Duży wpływ mogło mieć również stężenie azotu w powietrzu. Jeżeli wówczas, tak jak obecnie, azot był głównym składnikiem powietrza, to niższe stężenie dwutlenku węgla mogło być wystarczające do ustalenia się takiej temperatury.

Wynikiem tych obliczeń jest stwierdzenie, że przy zimniejszym Słońcu, Ziemia była ogrzewana wskutek efektu cieplarnianego. Gazy zawierające więcej niż dwa atomy w cząsteczce, wykazują interesującą właściwość absorbowania promieniowania podczerwonego emitowanego przez powierzchnię Ziemi. Gazy te, w postaci dwutlenku węgla, pary wodnej, lub amoniaku, są przezroczyste dla promieniowania widzialnego i dla pewnych długości fal z zakresu podczerwieni. Promieniowanie podczerwone stanowi część promieniowania słonecznego niosącego najwięcej energii cieplnej docierającej do powierzchni Ziemi, co powoduje jej ogrzewanie. Wspomniane gazy są nieprzezroczyste dla długofalowego promieniowania podczerwonego emitowanego przez powierzchnię Ziemi i dolną atmosferę. Absorpcja tych fal, które w innym przypadku byłyby emitowane w przestrzeń kosmiczną stanowi, istotę efektu cieplarnianego. Różni się on jednak od efektu jaki uzyskujemy w szklarniach. Pierwszym badaczem, który w dziewiętnastym wieku wykazał, że Ziemia jest ogrzewana w wyniku efektu cieplarnianego był znany szwedzki chemik, fizyk i astrofizyk Svante Arrhenius (1859 – 1927).

H.D. Holland w pracy „The Chemical Evolution of the Atmosphere and the Oceans” daje jasny i czytelny opis prawdopodobnego stanu Ziemi przed obudzeniem się Gai. W streszczeniu brzmi to tak: Traktuje on Ziemię jako planetę z atmosferą bogatą w dwutlenek węgla, z azotem, lecz pozbawioną tlenu, ze śladami takich gazów jak wodór i siarkowodór. Oceany pełne były żelaza i innych pierwiastków i związków, które mogą występować w roztworze bez tlenu. Między nimi mogły występować redukujące pierwiastki, takie jak siarka i azot. Obecność tych substancji w ówczesnym środowisku jest ważna, ponieważ w reakcjach chemicznych redukują one łatwo i usuwają tlen, który nie mógł pojawić się w atmosferze w stanie wolnym.

Innym czynnikiem obecnym przy narodzinach Gai było ciepło wnętrza Ziemi, produkowane wówczas w ilości trzy razy większej niż obecnie. Było to wynikiem większej radioaktywności Ziemi. Innym źródłem energii cieplnej mogły być bardziej

aktywne wulkany, wprowadzające gazy cieplarniane do atmosfery i wywołujące częstszy kontakt skał wulkanicznych z wodą oceaniczną. Jedną reakcją występującą między utlenionym żelazem skał bazaltowych i wodą prowadzi do produkcji wodoru. Ciągła produkcja wodoru mogła mieć dwie konsekwencje. Po pierwsze, utrzymanie wolnej od tlenu atmosfery i powierzchni akumulującej związki chemiczne dogodne dla życia. Po drugie, ucieczkę wodoru do przestrzeni kosmicznej. Ziemskie pole grawitacyjne jest za słabe do utrzymania lekkich pierwiastków, takich jak wodór. Gdyby ucieczka wodoru była kontynuowana, Ziemia mogłaby pozbyć się oceanów i znaleźć się w stanie, jaki występuje na Marsie lub Wenus. Taka ucieczka nie może mieć miejsca obecnie, ponieważ wodór może reagować biochemicznie w oceanach i z nadmiarem tlenu w atmosferze, tworząc wodę. Cząsteczka wody, chociaż zawiera dwa atomy wodoru, jest zbyt ciężka aby bezpośrednio uciec do przestrzeni kosmicznej. Inną przyczyną zapobiegającą ucieczce wody z Ziemi jest jej zamrażanie w zimnych strefach atmosfery i opadanie z powrotem w postaci lodu.

Taka była Ziemia przed pojawieniem się życia. Można zaakceptować pogląd, że życie wystartowało z chemicznych cząsteczek i dynamiki środowiska napędzanego energią słoneczną i ciepłem Ziemi. Pierwsze żywe komórki mogły korzystać z nadmiaru organicznych związków z otoczenia, jak również z ciał martwych poprzednich prostszych osobników. Zaopatrzenie to mogło wkrótce skończyć się i dlatego już w tych czasach organizmy musiały nauczyć się korzystać z energii słonecznej do produkcji swego pożywienia. Uważa się, że pierwsze procesy fotosyntezy oparte były na fotodysocjacji siarkowodoru. Następowo też rozrywanie silnych wiązań tlenu z wodorem i węglem powodowane przez cjanobakterię, nazywaną tak z powodu niebieskozielonego koloru. Spekulacje dotyczące udziału minerałów i kryształów w formowaniu pierwszych złożonych cząsteczek przyszłych bakterii zawarte są w artykule Roberta M. Hazena pt. *Twarde życia początki*, opublikowanym w Świecie Nauki, Nr 6. 2001 roku.

W erze archaicznej powstał już kompletny system naszej planety. Na jej powierzchni, w świetle słonecznym, egzystowała cjanobakteria, wykorzystująca energię słoneczną do produkcji materii organicznej. Bakteria ta rozmnażając się produkowała tlen, który mógł być obecny tylko w miejscu produkcji. Tlen przenoszony poza miejsce produkcji reagował z nieorganiczną materią powodując jej utlenianie. We wczesnym ekosystemie występowała także „metanonizerzy” przerabiający produkty rozpadu cjanobakterii na metan i dwutlenek węgla. W ten sposób zapewniony był powrót do środowiska podstawowych pierwiastków, to

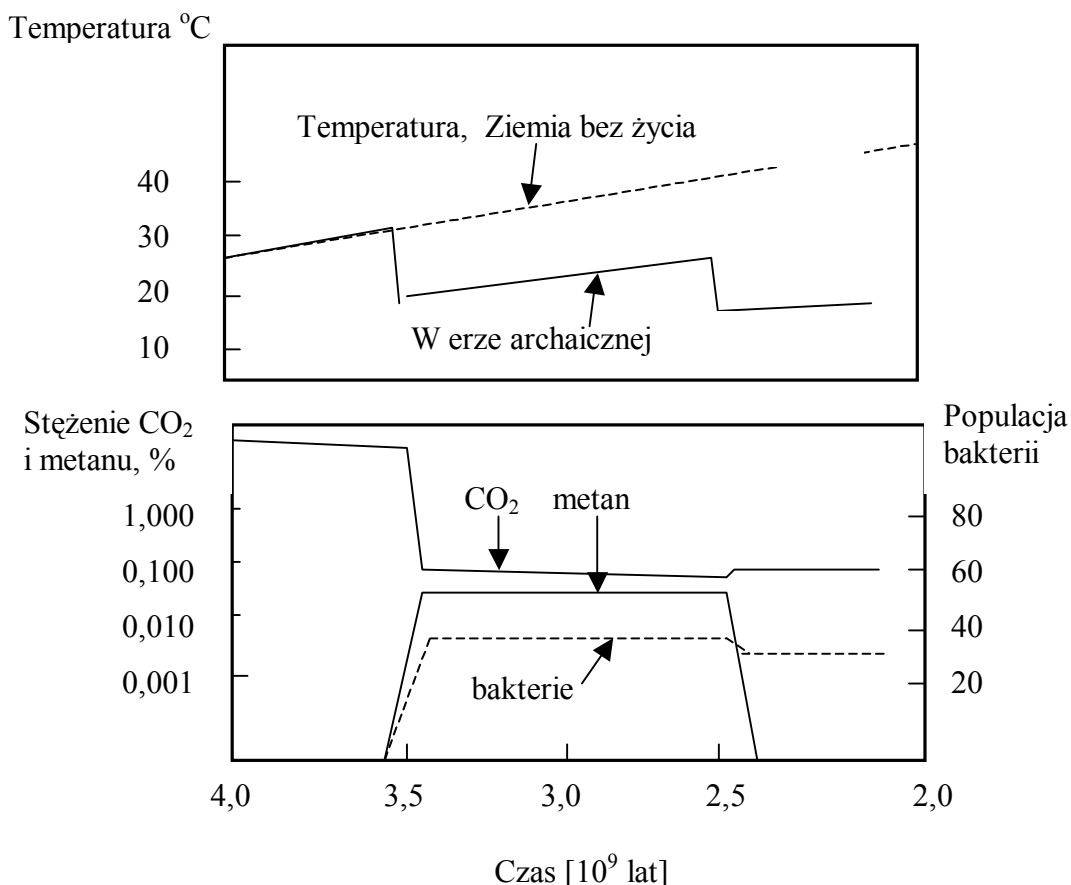
znaczy węgla w postaci metanu i dwutlenku węgla. Związki te nie mogły być „zjedzone” przez cjanobakterie, ponieważ do tego procesu niezbędny jest tlen.

Przyjmuje się, że początek Gai nie pokrywa się z początkiem pojawienia się życia. Gaja mogła się obudzić wtedy, kiedy bakterie pokryły już większą część planety. Raz obudzone planetarne życie zaczęło zmieniać, początkowo w niewielkim stopniu, jej środowisko. Pierwsze formy życia występujące tylko w oazach nie mogły mieć dostatecznej zdolności do regulacji lub przeciwstawiania się niedogodnym zmianom, nieuniknionym na planecie bez życia. Rzadko rozmieszczone życie w oazach może występować na początku lub na końcu egzystencji systemu Gai.

W erze archaicznej organizmy przetwarzały w procesie fotosyntezy, dwutlenek węgla na materię organiczną i tlen. Tlen był usuwany poprzez wszechobecną materię nieorganiczną środowiska w postaci siarki i żelaza w oceanach. Wczesne bakterie, egzystujące w środowisku anerobicznym, przetwarzały organiczną materię w dwutlenek węgla i metan, które wracały do powietrza. Metan ulegał rozpadowi w promieniowaniu ultrafioletowym Słońca tworząc rodniki hydroksylowe (OH), które łącząc się z innymi cząsteczkami mogły tworzyć smog w górnej atmosferze. Smog ten pochłaniając promieniowanie UV mógł odgrywać rolę obecnej warstwy ozonowej i spowodować ochłodzenie powierzchni Ziemi.

Przebieg zmian stężenia dwutlenku węgla, metanu i bakterii, jak również związana z nimi zmiana temperatury Ziemi, mogą być modelowane w oparciu o równania modelu *Daisyworld*. Na rysunku 7 przedstawiono wynik takiego modelowania dla ery archaicznej.

Szybkość deponowania węgla w erze archaicznej nie różniła się znacznie od obecnej. Zawartość węgla zawartego we wczesnych skałach osadowych różni się niewiele od zawartości w skałach księżycowych, które nigdy nie były pod wpływem życia.



Rys. 7. Wynik modelowania ery archaicznej przed i po pojawieniu się życia.

Wydaje się, że koniec ery archaicznej związany z dominacją metanu w atmosferze był nagły. Skokowa zmiana mogła wystąpić wtedy, kiedy pojawiły się organizmy tlenowe na powierzchni Ziemi. Kiedy środowisko możliwe do utlenienia zostało już utlenione, wtedy w atmosferze pojawił się nadmiar tlenu, a bakterie wykorzystały go do efektywniejszej przemiany energetycznej. Jednak beztlenowe bakterie nie zniknęły. Żyją one obecnie w środowisku beztlenowym. Era archaiczna, z punktu widzenia Gai, była okresem, w którym system ziemski pokryty był bakteriami przenoszonymi przez wiatr i prądy oceaniczne.

Istnieją również inne modele opisujące erę archaiczną. Zakłada się w nich różne początkowe stężenie dwutlenku węgla i różne okresy stabilizacji klimatu Ziemi przed pojawieniem się życia. Przedstawiony opis umożliwia modelowanie matematyczne w oparciu o równania biologicznej regulacji temperatury Ziemi, takie jak występują w modelu Daisyworld.

Podobnie jak era archaiczna, również era proterozoiczna była przedziałem czasu, w którym Ziemię pokrywały bakterie (prokaryotes). W niedotlenionych rejonach sedymentów

mogły żyć bakterie archaiczne. Natomiast w nowych, średnio utlenionych oceanach i środowisku powierzchniowym, mógł wystąpić rozwój bardziej skomplikowanych żywych komórek, eukariotów.

Tabela 3. Oszacowanie składu atmosfery ery archaicznej przed i po pojawieniu się życia.

Gaz	Przed życiem	W czasie życia
Dwutlenek węgla	Dominujący	0,3 %
Azot	Nie znany	99,0 %
Tlen	Brak	$10^{-4}\%$
Metan	Brak	$10^{-2}\%$
Wodór	Ślady	$10^{-4}\%$

6.2. Opis rozwoju życia w erze proterozoicznej

Dla geofizjologii, ważną rzeczą jest przejście od ery archaicznej do proterozoicznej. Nie jest ważna data, ale fakt, że takie przejście miało miejsce i że było ono związane ze zmianą stężenia tlenu w atmosferze. Widoczną manifestacją tych zmian jest wyłonienie się nowego typu powierzchni Ziemi, nowej chemii atmosfery i ekosystemu, od kiedy tlen zaczął dominować w atmosferze. Proces ten był długotrwały i występował w różnych miejscach i różnym czasie. Różnica między powietrzem ery archaicznej a proterozoicznej, jest związana nie tylko z obecnością tlenu, ale także z tendencją wzrostu stężenia tego pierwiastka w atmosferze.

Jakie procesy regulacyjne zachodziły w tym okresie?. Na czoło wysuwa się problem wapnia. Wapń jest podstawowym pierwiastkiem wchodzącym w skład kości, ale też komórek. W dużych stężeniach jest on toksyczny. Jednakże w postaci węglanu wapnia jest nieszkodliwy i może być usuwany w dużej ilości zarówno przez bakterie, jak i inne organizmy budujące muszle. Organizmy te transportują wapń z powierzchni Ziemi na dno oceanów. W ten sposób tworzą się osady w postaci stromatolitów.

Regulacja zasolenia jest najbardziej interesującym mechanizmem w działaniu Gai. Występuje tylko kilka organizmów zdolnych tolerować stężenie wagowe soli powyżej 6%. Czy oceany zawsze utrzymywały limit zasolenia?. Większość komórek czuje się dobrze w roztworach, których zasolenie wynosi 0,16 mola (około 1 % wagowo). Wiele komórek

przeżywa zasolenie wody morskiej wynoszące 0,6 mola, ale przy 0,8 mola membrana utrzymująca zawartość komórki staje się przepuszczalna i pęka.

Stężenie soli w obecnych morzach jest niekorzystnie duże dla wszystkich żyjących organizmów. Duże organizmy, takie jak wieloryby, ryby i pewne skorupiaki mają fizjologiczny mechanizm regulujący wewnętrzne zasolenie na poziomie 0,16 mola. Inne budują skorupy i wykorzystują różnice w ciśnieniu osmotycznym między wnętrzem organizmu, a otoczeniem. Inny problem występuje wtedy, kiedy komórka zamarza. Woda w postaci lodu jest wypierana, natomiast wewnątrz komórki zasolenie wzrasta.

Większość organizmów toleruje maksymalne stężenie molarne soli o wartości 0,8. Natomiast średnie stężenie molarne soli w oceanach wynosi 0,68 i jest niewiele niższe od dopuszczalnego. W incydentalnych przypadkach organizmy mogą się znaleźć w środowisku o zasoleniu wyższym od dopuszczalnego lub też warunkach powodujących w ich ciałach wymrażanie wody lub jej wysuszenie. Odpowiedzią organizmów na zmiany stężenia soli w ich wnętrzu była synteza związków rozpuszczalnych, nazywanych siarkowymi lub azotowymi betainami (trójmetyloglicyna). Roztwór ten w reakcji z solą czyni ją neutralną. Kiedy taki roztwór znajduje się w płynie komórki, wtedy komórka ta nie zamarza, nie podlega wysuszeniu, ani też nie zwiększa zasolenia do niebezpiecznego poziomu.

Utrzymanie stałego zasolenia oceanów w długim przedziale czasu jest niezmiernie trudne. Bakterie ery archaicznej mogły stosunkowo łatwo modyfikować skład atmosfery, lecz dużo trudniej jest wpływać na skład ogromnych oceanów. Jediną drogą do usuwania wielkich mas soli w oceanach mogła być tylko segregacja wody oceanicznej między laguny, w których następuje odparowanie wody. Pojawiła się więc konieczność budowy wapiennych raf do wylapywania soli w parujących lagunach.

Do oceanów w sposób ciągły wprowadzane są przez rzeki sole powstałe w wyniku wietrzenia skał. W wodach oceanicznych, sól nie jest prostą substancją, taką jak na przykład chlorek sodu. Występuje ona raczej w postaci dodatnich jonów sodu i ujemnych jonów chloru, które zachowują się jako niezależne cząsteczki. Jony sodu i inne dodatnie jony potasu, wapnia lub magnezu, mają względnie krótki czas przebywania w oceanach. Są one usuwane przez procesy biochemiczne i chemiczne oraz przez hydrotermiczne reakcje chemiczne zachodzące na dnach oceanów, w sedymentach, glinie, wapieniu i dolomitach. W tabeli 4 przedstawiono stężenie soli w oceanach.

Przed powstaniem lagun konieczne było zbudowanie barier odgraniczających je od wody morskiej. Czy taka aktywność organizmów żywych mogła być częścią powiązanej

ewolucji życia i skał i czy jest jej wynikiem?. Kluczowym procesem w naturalnym formowaniu się barier jest wytrącanie się węglanu wapnia. Dwutlenek węgla w powietrzu reaguje w sposób ciągły z alkalicznymi skałami na powierzchni lądów tworząc wodorowęglany. Ważną reakcją tego typu jest reakcja występująca między skałami krzemianowymi i dwutlenkiem węgla rozpuszczonym w wodzie. Produktem takiej reakcji jest roztwór kwasu krzemowego i węglan wapniowy, transportowany przez rzeki do oceanów. W nieobecności życia, jony wapnia i jony wodorowęglanowe mogą przebywać razem w średnio kwaśnym oceanie. Ciągłe zasilanie oceanów w te jony mogło prowadzić do spontanicznej krystalizacji węglanu wapnia. Gdyby tak było, to osady powinny być mniej lub bardziej równo rozłożone na dnie oceanów. Pokłady wapienia w rzeczywistym świecie są wynikiem akcji żywych organizmów. Wapń nie odkładał się ani w sposób przypadkowy, ani stosownie do oczekiwań fizycznych i chemicznych. Wytrącanie wapnia przez kolonie mikroorganizmów okazało się bardziej wydajne w płytkich wodach wokół kontynentów, gdzie występował nadmiar zarówno składników pokarmowych, jak i wodorowęglanu. Bez jakiegokolwiek przewidywania i planowania, składniki tych żywych struktur, wapienne stromatolity, mogły tworzyć laguny, z których woda mogła stopniowo parować, powodując wytrącanie się soli. Z biegiem czasu tworząca się rafa mogła naciskać na plastyczną skorupę Ziemi, wciskać ją i w ten sposób powiększać głębokość lagun. Ruch skorupy ziemskiej zależy od ciągłej depozycji węglanu wapnia w morzach i być może jest przyczyną wypiętrzania się gór i ruchu kontynentów.

Powyższe wywody są słabo udokumentowane. Czy to wszystko jest nieplanowanym inżynierskim przedsięwzięciem Gai, począwszy od obniżenia stężenia jonów wapnia w obrębie komórek żywych organizmów aż do ruchu kontynentalnych płyt? Związek między biomineralizacją, stresem solnym i ruchem płyt jest bardzo słaby i można go traktować raczej jako pewną szansę zmiany środowiska, a nie proces geofizjologiczny.

Pytanie dotyczące ery proterozoicznej brzmi: jakie było stężenie tlenu? Czy było ono w zakresie 0,1% do 1%, czy też wzrastało do stężenia obecnego? Wolny tlen pochodzi z dwóch źródeł: ucieczki wodoru do przestrzeni kosmicznej i z deponowania węgla i siarki. Oddzielenie z cząsteczki elementarnego wodoru, węgla czy siarki prowadzi zawsze do uwalniania wolnego tlenu. Kiedy tylko w atmosferze pojawił się wolny tlen, wtedy ucieczka wodoru stała się znikomo mała, ponieważ tylko śladowe ilości wodoru lub związków zawierających wodór, np. metanu, mogły przebywać w atmosferze tlenowej. Obecna szybkość ucieczki wodoru wynosi około 300 000 ton na rok. Jest to ilość równoważna 3

milionom ton wody i uwolnieniu 2,5 miliona ton tlenu. Ten proces mógł usunąć zaledwie 1% wody w całej historii Ziemi.

Tabela 4. Stężenie soli w oceanach [7].

Rodzaj jonu	Stężenie w Molach	Czas przebywania w Milionach lat
Sodu	0,47	56,0
Magnezu	0,05	11,0
Wapnia	0,01	0,9
Potasu	0,01	5,5
Chloru	0,53	350
Siarki	0,03	7,9

Jedynym sposobem wprowadzania znaczących ilości tlenu do atmosfery jest oddzielenie go od związków węgla i siarki, które mogą być deponowane w osadach przed ponowną reakcją z tlenem. Ten proces separacji rozpoczął się wraz z fotosyntezą, która rozkłada dwutlenek węgla na tlen, pozostający w powietrzu, oraz na węgiel, który pozostaje w żywych lub martwych częściach roślin i bakterii. Większość węglowego materiału rekombinuje z tlenem za pośrednictwem organizmów żywych, a około 0,1% jest deponowana na dnie oceanów. Węgiel w sedymentach redukuje siarczany na siarczki, a to również prowadzi do wzrostu stężenia tlenu w powietrzu. Węgiel i siarczki deponowane w sedymentach mieszają się z łupkami i wapniem lub mogą formować paliwa takie jak węgiel i ropa.

Obecnie deponowane jest w sedymentach około 100 milionów ton węgla rocznie. Odpowiada to uwalnianiu 266 milionów ton wolnego tlenu do atmosfery. Nie oznacza to jednak, że stężenie tlenu w atmosferze wzrasta. Tlen jest zużywany do utleniania materiałów uwalnianych przez wulkany, do wietrzenia skał oraz procesów zachodzących na dnach oceanów. Szybkość deponowania węgla jest prawie stała w całej historii Ziemi. Występuje tylko mała różnica między erą archaiczną i stanem obecnym. Obecny duży udział fotosyntezy jest kompensowany szybką cyrkulacją węgla i tlenu pobieranymi przez organizmy żywe. One to metabolizują 97,5% produktów fotosyntezy podczas gdy 2,5% przechodzi do strefy aneroicznej.

Produkcja tlenu jest zdeterminowana ilością deponowanego węgla, a proces ten zależy od ilości produktów fotosyntezy dostarczanych do środowiska aneroicznego. Jeżeli konsumenci zjadają całą dostępną materię organiczną, to nic nie zostanie zdeponowane i nie będzie źródła tlenu. Jeżeli przyjmiemy, że szybkość deponowania węgla jest stała, to ilość

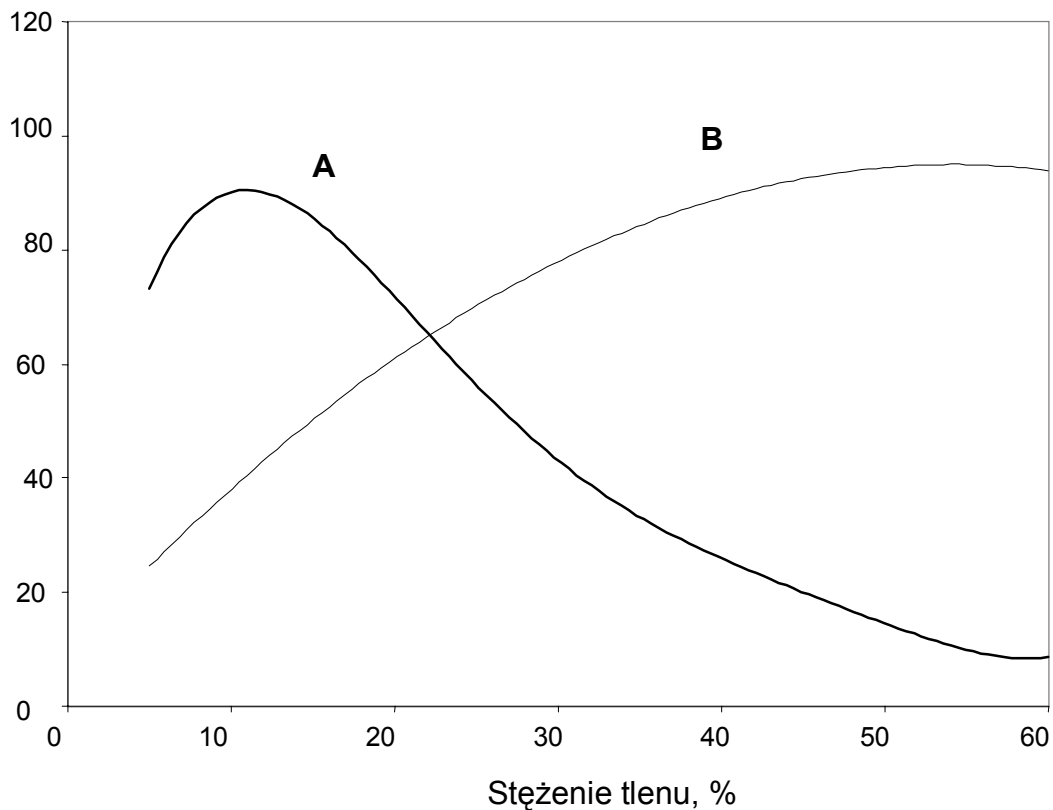
tlenu pochodzącego z tego źródła musi być też stała. W erze archaicznej cały tlen był zużywany na utlenianie środowiska redukcyjnego, a jego nadmiar był wprowadzany do atmosfery. Archaiczny beztlenowy ekosystem produkował organiczny materiał, którego deponowanie zapewniało ciągłą dostawę tlenu do atmosfery. Co determinuje poziom tlenu w atmosferze?. Na podstawie geofizjologii można przypuszczać, że dostarczany do atmosfery tlen był zużywany do utlenienia środowiska nieorganicznego, a także wykorzystywany przez organizmy występujące w środowisku aerobicznym. Ze względu na toksyczny charakter tlenu, organizmy żyjące w środowisku tlenowym wymagają określonego zakresu jego stężeń. Z tego powodu muszą wystąpić geofizjologiczne procesy regulujące jego stężenie w atmosferze.

Na rysunku 8 przedstawiono możliwy sposób regulacji stężenia tlenu w atmosferze. Linia A przedstawia zależność populacji organizmów żyjących w środowisku tlenowym od jego stężenia w atmosferze. Przy zbyt niskim stężeniu tlenu organizmy te nie mogą metabolizować, natomiast przy zbyt wysokim, mogą one ulec zatruciu. Linia B przedstawia zależność między populacją tlenowego ekosystemu, a stężeniem tlenu. Im więcej fotosyntetyzerów, tym więcej tlenu. Te dwie krzywe przecinają się przy stężeniu tlenu optymalnym dla ekosystemu i takie stężenie będzie przez niego utrzymywane.

Na rysunku 9 przedstawiono wyniki komputerowego modelu, w którym fotosyntetyzery, konsumenci tlenu i organizmy przebywające w strefie anerobicznej koegzystują na planecie przed, w czasie i po pojawieniu się tlenu w atmosferze. Przyjęto w tym czasie stałe deponowanie węgla i ubytek redukujących skał i utleniających gazów, dzięki czemu wolny tlen mógł się pojawić w atmosferze. Dlatego stężenie tlenu wzrasta do poziomu równowagi wynikającej z ilości deponowanego węgla i dostępności redukującego materiału.

Na rysunku 9a przedstawiono zmianę temperatury planety w porównaniu z tą, jaką miałyby planeta o tym samym składzie bez życia. Na rysunku 9b przedstawiono zmianę stężenia tlenu, dwutlenku węgla i metanu. Na rysunku 9c przedstawiono zmianę populacji różnych form życia. Przyjęto, że w długim przedziale czasu stała ilość węgla produkowanego w fotosyntezie jest deponowana i że jest ona źródłem stałej ilości tlenu.

Populacja fotosyntetyzerów

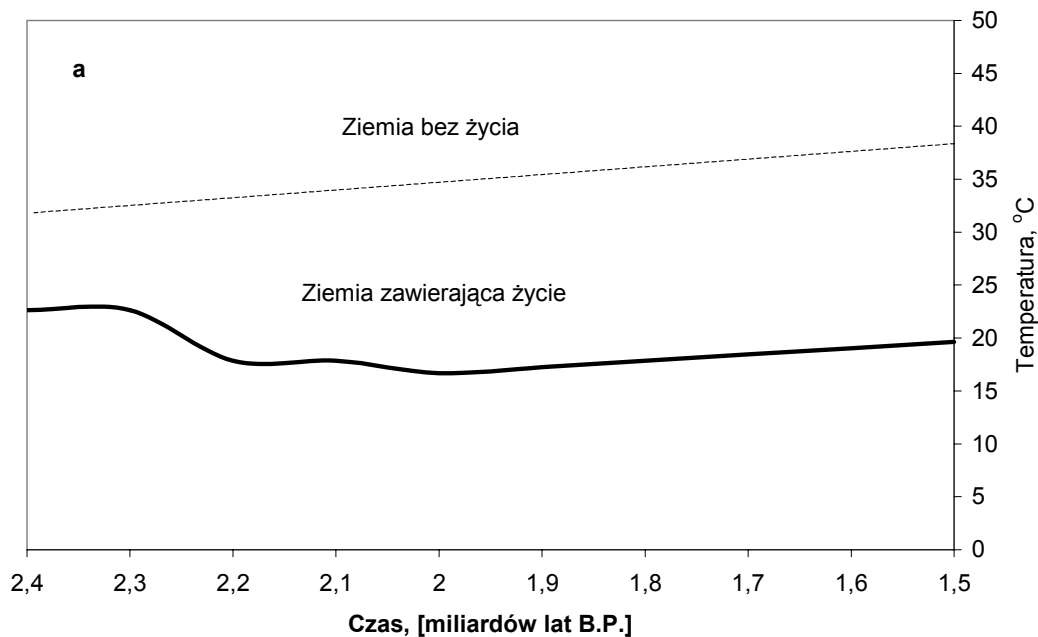


Rys. 8. Wpływ tlenu na wzrost organizmów (linia A) oraz wpływ organizmów na stężenie tlenu (linia B). Miejsce przecięcia się tych krzywych wyznacza stężenie tlenu utrzymywane przez system regulacyjny.

Obecność nadmiaru tlenu w atmosferze powoduje wzrost szybkości wietrzenia skał, co zwiększa dostępność niezbędnych związków dla organizmów żywych powodując rozwój ekosystemu. Im więcej węgla będzie deponowane, tym większy nastąpi wzrost stężenia tlenu, aż do czasu kiedy jego własności toksyczne wyznaczą granice wzrostu. W tym samym czasie strefa anerobiczna, w której występuje deponowanie węgla, skurczy się do tych samych rozmiarów, jaki był w erze archaicznej. Produkcja tlenu stanie się równa jego stratom wskutek utleniania substancji wystawionych na wietrzenie.

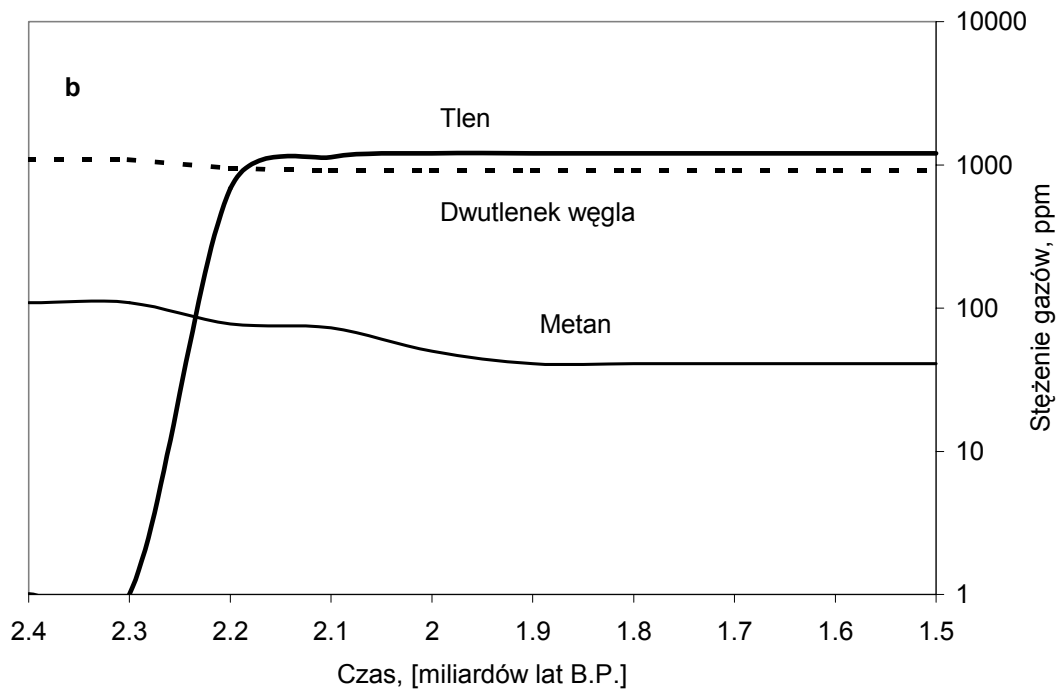
Mogą również wystąpić warunki, w których cykl tlenowy może być odłączony od cyklu dwutlenku węgla. Wzrost stężenia tlenu powinien być poprzedzony zmniejszeniem stężenia dwutlenku węgla. Cykl dwutlenku węgla wiąże się z klimatem i wpływa przeciwnie zarówno na jego producentów jak i na konsumentów. Środowiskowe sprzężenie zwrotne między dwutlenkiem węgla a klimatem dodatkowo stabilizuje system. Odkąd kryzys

wywołany pojawieniem się tlenu w proterozoiku został przewyższony, następne czasy dla Gai stały się komfortowe z wyjątkiem planetoidalnych katastrof.

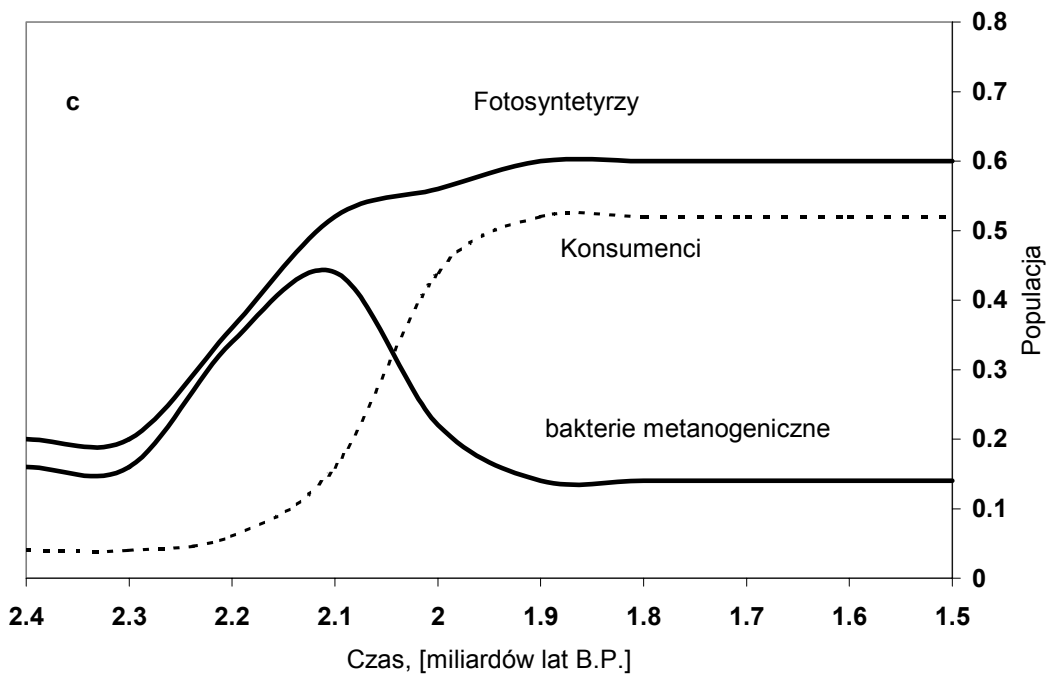


Rys. 9a. Temperatura Ziemi przy przejściu od ery archaicznej do kenozoicznej.

Na początku ery proterozoicznej Słońce było zimniejsze. Problemem Gai było zabezpieczenie przed utratą cieplarnianego dwutlenku węgla, a tym samym przed zamarznięciem Ziemi. Bez obecnej ochładzającej tendencji działania życia, Ziemia byłaby zbyt ciepła. Można powiedzieć, że życie obecnie utrzymuje Ziemię chłodną przez odpompowanie dwutlenku węgla. W środku proterozoiku, jakieś 1,5 miliarda lat temu, promieniowanie Słońca było w sam raz dogodne dla życia. Nie trzeba było żadnych działań dla jej termostatowania. Stężenie dwutlenku węgla wynosiło około 1% objętościowo i było akceptowane przez ekosystem.



Rys. 9b. Stężenie gazów w atmosferze przy przejściu z ery archaicznej do kenozoicznej.



Rys. 9c. Populacja organizmów żywych przy przejściu z ery archaicznej do kenozoicznej.

6.3. Era kenozoiczna

W uproszczeniu, era kenozoiczna obejmuje okres od około 600 milionów lat wstecz do czasów dzisiejszych. Na początku tego okresu pojawiły się organizmy widoczne gołym okiem i poruszające się w oceanach i na lądzie. Pojawienie się dużych, o miękkim ciele wspólnot komórek zmieniło powierzchnię Ziemi. Pojawiły się rośliny, które mogły wypiętrzać się dzięki konstrukcji korzeni podziemnych. Pojawili się konsumenci, którzy mogli przemieszczać się na lądzie, oceanach i powietrzu. Wszystkie te okazy pozostawiły skamieliny. Jeżeli przyjmiemy, że *Gaja jest żywym organizmem, to era kenozoiczna jest jej ostatnim etapem rozwoju i trwa nadal.*

Geolodzy datują przejście od ery proterozoicznej do kenozoicznej pojawieniem się zwierząt. Z punktu widzenia geofizjologii przejście to jest związane ze zmianą stężenia tlenu, niepodobną do tej jaka miała miejsce między erą archaiczną i proterozoiczną.

Tlen pochodzi z wykorzystania światła słonecznego, przez komórki zielonego chloroplastu, do zamiany dwutlenku węgla na wolny tlen i związki chemiczne niezbędne do ich budowy. Większość tego tlenu zwracana jest w postaci dwutlenku węgla do atmosfery i mórz w wyniku utleniania pożywienia wielu konsumentów roślin i alg. Ponadto, tlen wykorzystywany jest do reakcji ze związkami siarki emitowanymi przez wulkany oraz magmy na dnach oceanów.

Ekosystem składający się z prostych organizmów żywych, eukariotów, występujący we wczesnym proterozoiku nie wymagał dużego stężenia tlenu. Stężenie 0,1% mogło być wystarczające. Większe organizmy, które pojawiły się w erze kenozoicznej, takie jak dinozaury, zbudowane z olbrzymiej ilości komórek, wymagały większej ilości tlenu.

Przy końcu ery archaicznej utlenianie siarki i żelaza do siarczków i dwutlenku żelaza nie mogło wylapać całego strumienia tlenu pochodzącego z deponowania węgla i stężenie tlenu rosło. Tlen osiągnął ustalony poziom we wczesnej erze proterozoicznej, dużo niższy od obecnego. Występowała równowaga między wczesnymi konsumentami i toksycznością tlenu dla wczesnych fotosyntetyzerów. Nie wiadomo dlaczego stężenie tlenu zaczęło się zwiększać w erze kenozoicznej. Możliwe jest, że było to związane z pojawieniem się bakterii redukującej siarczany. Mogło to prowadzić do deponowania większej ilości produktów tego typu fotosyntezy w postaci siarki lub siarczanów. W wyniku tego powstawała większa ilość tlenu w powietrzu. Tlen w powietrzu mógł tworzyć z węglem i siarką kwasy przyspieszające wietrzenie skał. Powodowało to wzrost pożywienia i w konsekwencji wzrost żywych

organizmów. To dodatnie sprzężenie zwrotne mogło trwać dopóty, dopóki niedogodności związane z toksycznością tlenu przeważały korzyści wynikające z jego stężenia w powietrzu.

W pewnej części tego okresu organizmy zaczęły syntetyzować na dużą skalę pewne substancje, których końcowym produktem jest lignina. Jest to polimer zawierający węgiel, o dużej chemicznej stabilności i odporności na biodegradację. Lignina produkowana w dużej ilości mogła zwiększyć deponowanie węgla i przyczynić się do produkcji tlenu. Z punktu widzenia geofizjologii, lignina stała się materiałem konstrukcyjnym tak ważnym dla roślin jak bioceramika dla ludzi lub muszle dla zwierząt. Zarówno wapń jak i lignina umożliwiły konstrukcję wspólnot komórkowych nowego typu.

Tabela 5. Źródła i ubytki tlenu w historii Ziemi

Era	Stężenie %	Produkcja Gt/rok	Ubytki	
			Konsumenci Gt/rok	Skały Gt/rok
Archaiczna	$10^{-5} \div 10^{-3}$	10	1,0	9,0
Proterozoiczna	$1 \div 10$	30	29,8	0,2
Kenozoiczna	21	100	99,9	0,1

Stężenie tlenu na poziomie 21% utrzymywane jest na granicy palności wielu materiałów biologicznych. Przy stężeniu 16% nawet suchy materiał nie chce się palić, przy 25% mokry materiał jest łatwo palny. Być może ogień był regulatorem stężenia tlenu w powietrzu. Jednakże ilość węgla drzewnego w sedymentach jest zbyt mała aby ten proces był wydajny w długim przedziale czasu. Natomiast w krótkim przedziale czasu spalanie biomasy mogło usuwać znaczne ilości tlenu z atmosfery.

Inną metodą usuwania tlenu z atmosfery jest spalanie olejków eterycznych wydzielanych przez drzewa eukaliptusowe oraz łatwo palnych terpentyn zawartych w poszyciu leśnym. Tego typu spalanie pozostawia niewiele węgla, a więc nie wpływa na dodatkową produkcję tlenu.

Stężenie dwutlenku węgla, wynoszące obecnie 260 ppm, jest stężeniem śladowym w porównaniu ze stężeniem na początku ery archaicznej. Trudno wyjaśnić spadek stężenia tego gazu na drodze czysto fizycznej. Natomiast żywe organizmy powodują, że stężenie dwutlenku węgla w glebie jest od 10 do 40 razy większe niż w powietrzu. Rośliny pompują więc dwutlenek węgla z powietrza i przenoszą go głęboko do gruntu, gdzie może reagować ze

skalami krzemianowymi i wapniowymi formując węglan wapniowy i kwas krzemowy. Związki te z kolei przemieszczane są przez wodę gruntową do rzek i oceanów, gdzie stanowią budulec muszli. W ten sposób są one deponowane na dnie oceanów tworząc osady wapniowe i krzemowe.

Ten biologiczny proces regulacji stężenia dwutlenku węgla jest składową systemy regulacji klimatu. Kiedy Słońce stawało się coraz cieplejsze, wtedy proces usuwania dwutlenku węgla mógł być zbyt wolny, aby utrzymać Ziemię w korzystnej temperaturze. Występuje odwrotna zależność między stężeniem dwutlenku węgla, i stopniem wegetacji. Jeżeli uznać za stan korzystny, kiedy występuje obfitość wegetacji, to stan z niskim stężeniem dwutlenku węgla w atmosferze jest dla Gai również korzystny. A taki stan występuje w okresach zlodowaceń, kiedy stężenie dwutlenku węgla wynosi około 180 ppm. W okresach zlodowaceń pojawiły się nowe typy roślin C4 (pewne trawy), zdolne do fotosyntezy w warunkach tak niskiego stężenia dwutlenku węgla. Rośliny typu C3 (drzewa) wymagają wyższych stężeń dwutlenku węgla.

Geofizjologia sugeruje też, że regulacja klimatu związana ze wzrostem energii otrzymywanej ze Słońca jest normą dla okresu lodowcowego, natomiast dla okresów międzylodowcowych jest patologiczna. Małe stężenie dwutlenku węgla dla okresu lodowcowego może być wyjaśnione obecnością dużej ilości organizmów fotosyntetyzujących. W okresie lodowcowym musi występować więcej organizmów pochłaniających z atmosfery dwutlenek węgla. Wydaje się, że w okresie lodowcowym występuje mniejsza powierzchnia dla żywych organizmów. Jednak kiedy tworzyły się lodowce kontynentalne, wtedy poziom oceanów mógł się obniżyć nawet o 100 metrów odsłaniając żyzne powierzchnie szelfów, zwłaszcza w wilgotnych tropikach. Odsłonięte szelfy mogły mieć powierzchnie rzędu powierzchni Afryki i mogły być pokryte tropikalnymi lasami.

Kiedy występuje trend ogrzewający Ziemię, wtedy zmniejsza się powierzchnia lądów, a to z kolei prowadzi do wzrostu stężenia dwutlenku węgla i zmniejszenia się powierzchni pokrytych lodami i odbijającymi promieniowanie słoneczne. Mogły też występować procesy odwrotne, takie jak wzrost stężenia soli w oceanach, kiedy woda zamieniana była w lód. Zwiększone zasolenie mogło wywołać zwiększoną produkcję związków siarki przez algi, a w ślad za tym kwaśne deszcze niszczące lądową roślinność.

Geofizjologia Gai umożliwia wyjaśnienie wzajemnych oddziaływań ekosystemu morskiego z lądowym. W oceanach występuje w dużych ilościach dwusiarczek węgla. Algi

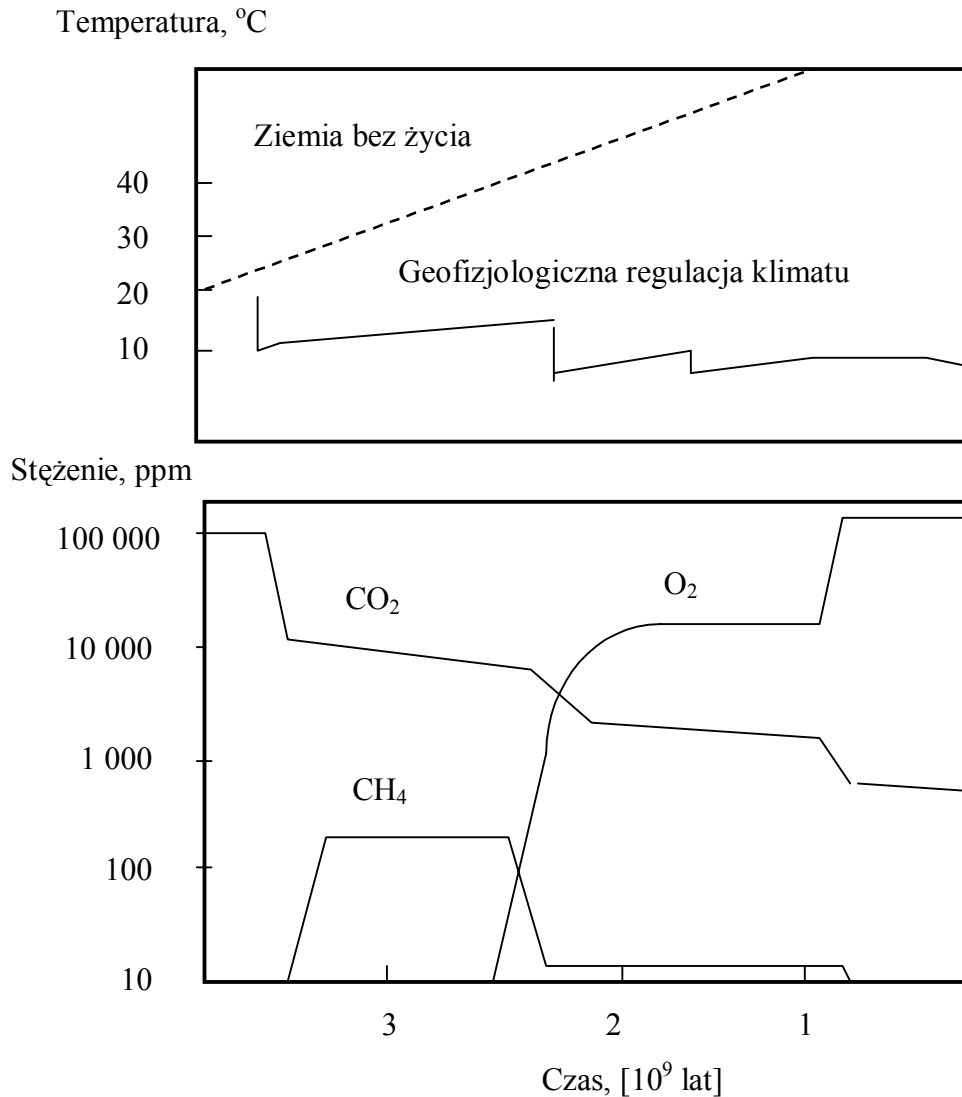
bronią się przed zbyt dużym stężeniem soli w organizmie produkując betainę. Ma ona w swej cząsteczce dodatni ładunek związany z siarką lub azotem i ujemny związany z jonem kwasu propionowego. Kiedy alga umiera, lub zostaje zjedzona, siarkowa betaina ulega rozpadowi na jon kwasu akrylowego i siarczek dimetylu przenoszony nad lądy. Na lądach występuje brak siarki i ten strumień siarczku dimetylu mógł przyspieszyć wzrost szybkości rozwoju roślin i wietrzenia skał. W ten sposób występuje powiązanie lądowego ekosystemu zasilanego w siarkę na bazie morskiego ekosystemu, zależnego od lądowego dopływu środków pokarmowych. Podobnie morski ekosystem zasila ekosystem lądowy w jod, w wyniku produkcji przez algi jodku metylu.

Oprócz dostarczania przez morski ekosystem siarki i jodu nad lądy, pierwiastki te uczestniczą także w wydajnym procesie regulacji klimatu. Gazy siarkowe dostające się do stratosfery ulegają utlenianiu i wraz z obecną tam parą wodną tworzą submikronowe krople kwasu siarkowego. Ponieważ są one bardzo małe, dlatego opadają wolno i mogą przebywać w stratosferze kilka lat. Krople te tworzą białą mgłę odbijającą promieniowanie słoneczne, które mogłoby ogrzewać Ziemię. Morski ekosystem, oprócz emisji siarczku dimetylu, emituje w mniejszej ilości tlenosiarczek węgla, który długo przebywa w troposferze i może się dostać do stratosfery, gdzie zostaje utleniony. Wzrost temperatury Ziemi powoduje wzrost emisji związków siarki, a te uczestniczą w formowaniu w stratosferze siarkowej mgły, odbijającej promieniowanie słoneczne i tym samym obniżającej ilość energii docierającej do Ziemi. To ujemne sprzężenie zwrotne jest więc jednym z geofizjologicznym mechanizmów regulacji klimatu.

Związki siarki emitowane przez ekosystem morski uczestniczą jeszcze w innym mechanizmie związanym z regulacją klimatu. Emitowany siarczek dimetylu zostaje w powietrzu szybko utleniony przez rodniki tlenowo-wodorowe do kwasu siarkowego i kwasu metanosulfonowego. Pary tych kwasów w powietrzu nasyconym parą wodną stają się centrami kondensacji pary wodnej i wydajnymi zalążkami kropel deszczu. Tak więc nad oceanami emisja związków siarki przez algi powoduje powstawanie chmur, a te z kolei są źródłem wiatrów mieszających wodę oraz opadów deszczu. Znajdujące się nad oceanami pyły, unoszone z nad lądów, wraz z kroplami deszczu zasilają w pożywienie odległe od lądów rejony oceanów.

Opisane wyżej mechanizmy regulacji klimatu, chociaż każdy z osobna wydaje się mieć zbyt małą „moc regulacyjną”, to jednak wszystkie razem mogą być bardzo efektywne.

Na rysunku 10 przedstawiono zmianę temperatury i składu atmosfery Ziemi w całej jej historii z punktu widzenia hipotezy Gai.



Rys. 10. Geofizjologiczna ewolucja klimatu i składu atmosfery podczas życia Gai. Na górnym rysunku przedstawiono prawdopodobną temperaturę Ziemi bez życia i stopniową w długich przedziałach czasu, stałość klimatu na Ziemi zawierającej życie. Na dolnym rysunku przedstawiono stopniowy spadek stężenia dwutlenku węgla od 10 lub 30% do jego obecnego stężenia, wczesną dominację metanu i późniejszą tlenu [9].

7. Fizjologia Ziemi

Obecnie każdy człowiek wprowadza do środowiska coś, co je niszczy. Zwykle odpowiedzialny za niszczenie środowiska uznajemy przemysł, a nie siebie. Ale czy jesteśmy

winni?. Wielokrotnie w historii Ziemi nowe istoty zmieniały środowisko w takiej skali jak my czynimy to teraz. Proste bakterie, które pierwsze wykorzystały promieniowanie słoneczne do budowy siebie i produkcji tlenu są, praojcami obecnych drzew. Ale one też dokonały zniszczenia tego systemu, dla którego tlen był zabójczy.

W skali naszego życia, zmiana środowiska wydaje się być nieszkodliwa. Z perspektywy Gai, ewolucja środowiska jest charakteryzowana przez stany ustalone przerywane ostrymi nagłymi zmianami jego parametrów. Środowisko Ziemi nigdy nie było tak niesprzyjające życiu, aby wywołało jego zanik. Czy może się tak stać, że ludzie nieświadomie przyspieszą następną zmianę środowiska powodującą to, że nowe środowisko stanie się niedogodne dla naszych następców?

Nauka dotycząca fizjologii Ziemi dopiero raczkuje. W medycynie wiedza zdobywana była metodą prób i błędów. Odkrycie leczniczych własności chininy, lub uśmierzającego ból opium było wynikiem obserwacji. Odkrycie Paracelsusa, że trucizna w małej dawce jest lekarstwem, było fizjologicznym objawieniem. Odkrycie cyrkulacji krwi było dalszym krokiem dotyczącym fizjologii żywych organizmów.

O ile wiedza dotycząca fizjologii człowieka jest bogata, to wiedza dotycząca fizjologii tak wielkiego organizmu jak Ziemia, jest dopiero w powijakach. Obserwujemy pewne znaki i kliniczne objawy, i na tych podstawach próbujemy stawiać diagnozy. Brak nam skargi pacjenta – Ziemi.

7.1. Gorączka dwutlenku węgla

Dwutlenek węgla jest gazem bezbarwnym, o słabym zapachu i kwaśnym smaku. Do atmosfery dostaje się pochodząc ze źródeł naturalnych. Stanowi on podstawowy pokarm dla roślin i odgrywa ważną rolę w utrzymaniu równowagi termicznej Ziemi. Aktywność ludzka powoduje uwalnianie dwutlenku węgla do atmosfery, w wyniku spalania paliw stałych; drzewa, węgla, olejów, gazu naturalnego i materiałów organicznych. W wyniku tej działalności stężenie tego gazu w atmosferze rośnie. Prowadzi się rozważania kiedy i jak Ziemia na to zareaguje i jaki to będzie miało wpływ na ludzkość.

Od początku pojawienia się życia na Ziemi, dwutlenek węgla spełniał specjalną rolę. Stanowił pożywienie dla fotosyntetyzerów, a w ten sposób dla całego życia. Jest to medium, za pośrednictwem którego, energia promieniowania słonecznego jest transformowana do żywej materii. W tym samym czasie służył jako płaszcz ochronny utrzymując temperaturę

Ziemi, kiedy Słońce było chłodne. Teraz, kiedy Słońce jest gorące, stężenie CO₂ jest mniejsze, ale dalej zapewnia właściwą temperaturę Ziemi i wciąż stanowi pokarm dla roślin. Organizmy żywe (biota), gdziekolwiek się znajdują, pompują dwutlenek węgla z powietrza, bez czego jego stężenie mogłoby wzrosnąć do poziomu doprowadzającego do zniknięcia życia na Ziemi. Życie na Ziemi nie może występować bez dwutlenku węgla, ale zbyt duże jego stężenie mogłoby doprowadzić do jego zniszczenia życia.

Dla ludzkości sto tysięcy lat jest nieodróżnialne od nieskończoności, jednak dla Gai, trwającej 3,6 miliardów lat, to czas bardzo krótki. Tendencją regulacyjną Gai jest utrzymywanie stężenia dwutlenku węgla na niskim poziomie. Wzrost stężenia dwutlenku węgla w atmosferze, związany ze spalaniem paliw jest dla niej tylko małym zakłóceniem występującym w krótkim czasie. Mimo to może wywołać poważne konsekwencje. W ciągu ostatnich stu lat stężenie dwutlenku węgla wzrosło od 180 ppm do 360 ppm. Przy niskim stężeniu CO₂ rozwinęły się rośliny typu C₄, które mogą być wyeliminowane przez rośliny typu C₃, egzystujące przy wyższych stężeniach dwutlenku węgla. Ludzkość wybrała bardzo niedogodny moment dla dodawania dwutlenku węgla do atmosfery. Może się okazać, że regulacyjny system dotyczący stężenia dwutlenku węgla jest na granicy stabilności całego systemu. Być może wzrost stężenia dwutlenku węgla doprowadzi do ocieplenia klimatu Ziemi, jakie miało miejsce 12 000 lat temu. Mimo międzynarodowych akcji, dotyczących ograniczenia emisji dwutlenku węgla wskutek spalania paliw stałych, stężenie atmosferycznego dwutlenku węgla ulegnie podwojeniu między 2050 a 2100 rokiem.

Nie ma eksperta, któryby potrafił przewidzieć przyszły klimat Ziemi. Z geofizjologicznego punktu widzenia, Ziemia stanowi aktywny system starający się utrzymać stabilny homeostat niezależnie od chwilowych perturbacji. Tak by było, gdyby Gaja została pozostawiona sama sobie. Ale tak nie jest. Ludzkość wycina lasy, zwiększa powierzchnię uprawnych pól, rośnie konsumpcja energii, która zwiększa emisję dwutlenku węgla. Jeżeli system znajduje się na granicy możliwości regulacyjnych, to nawet minimalne zakłócenie może go z tego stanu równowagi wyprowadzić powodując nieprzewidywalne oscylacje i chaotyczne zmiany.

Wiemy zbyt mało o wpływie dwutlenku węgla na system klimatyczny, aby móc przewidzieć konsekwencje jego ciągłego wzrostu. Są jednak pewne fakty, z których można wysnuć określone konkluzje. Średnia temperatura Ziemi jest dużo niższa od optymalnej dla wzrostu roślin. Występujące periodyczne oscylacje klimatu, między okresami lodowcowymi i międzylodowcowymi, powodują zmniejszanie stężenia dwutlenku węgla do minimalnego

możliwego poziomu. Obecne wysokie stężenie dwutlenku węgla sygnalizuje upadek systemu, czyli przejście w niedługim czasie do okresu lodowcowego.

Z medycznego punktu widzenia, diagnoza powinna wyprzedzić leczenie. Przeczuwamy, że wprowadzenie do atmosfery dwutlenku węgla może być zgubne. Przewidujemy zmiany, ale nie potrafimy ich określić. Przeczuwamy, że będą one mniej korzystne dla ludzkości niż obecne.

7.2. Przypadek kwasowej niestrawności

Emisja dwutlenku węgla aktywnego w efekcie cieplarnianym, związana ze spalaniem paliw stałych, nie jest jedynym problemem. Spalanie powoduje kwaśne deszcze atakujące ekosystemy. Wszystkiemu winny jest tlen. Gdyby prastare bakterie nie skażyły nim Ziemi, nie byłoby problemu z kwaśnymi deszczami. Tlen jest twórcą kwasowych związków, lekarstwa dającego życie i zabijającego go w końcu. Wszystkie lekkie pierwiastki wchodzące w skład żywej materii; węgiel, azot, fosfor, tworzą z tlenem kwas, oprócz wodoru. W całej historii Ziemi padały na jej powierzchnię kwaśne deszcze. W naturalnym kwaśnym deszczu występuje kwas węglowy, kwas węglanowy, kwas mrówkowy, kwas azotowy i siarkowy, kwas metanosulfonowy i chlorowodorowy. Pochodzą one głównie z utleniania gazów emitowanych przez żywe organizmy, z emisji wulkanicznych oraz procesów związanych z reakcją tlenu i azotu pod wpływem promieniowania słonecznego. Substratami tych kwasów są: metan, tlenek azotu, siarczek dimetylu, chlorometan i inne.

Skutki skażenia kwaśnym deszczem zależą od jego dawki. Jeżeli kwaśny deszcz pada na powierzchnię bogatą w skały alkaliczne, takie jak wapień, to opady takie nie są zbyt szkodliwe. Jeśli jednak deszcz pada na ląd, który jest już kwaśny, to taki opad jest szkodliwy. Wyłapywanie dwutlenku siarki emitowanego przez przemysł tylko częściowo rozwiązuje problem. Zwykle zaniedbuje się naturalny nośnik siarki, jakim jest siarczek dimetylu. Emisja tego gazu przez fitoplankton jest porównywalna z przemysłową emisją siarki. Dlaczego do tej pory nie obserwowano niekorzystnych skutków tej emisji? Zanim Europa została uprzemysłowiona, siarczek dimetylu z mórz był prawdopodobnie niesiony daleko nad ląd i siarka była rozcieńczona nad dużymi obszarami. Przemysł wprowadził do powietrza nie tylko siarkę, ale też tlenki azotu i inne związki chemiczne. Siarczek dimetylu zamiast być wolno utleniany nad dużą powierzchnią, jest szybko przetwarzany nad rejonami w pobliżu morza, gdzie morskie powietrze styka się z zanieczyszczonym.

Ostatnio stwierdzono, na podstawie zdjęć satelitarnych, że ujścia rzek są bogate w rozkwitnięte algi odżywiające się nawozami azotowymi spłukiwanymi do rzek. Może się okazać, że ograniczenia emisji przemysłowej nie rozwiążą kwaśnych deszczy bez racjonalnego nawożenia w głębi lądów.

7.3. Dermatologiczny dylemat: *ozonemia*

Pierwsze pomiary stężenia związków chlorowcowych w powietrzu przeprowadzone na początku lat 70-tych wykazały ich niskie stężenia nie stanowiące zagrożenia. Nie wiedziano, że należą one do grupy tak zwanych gazów cieplarnianych i że mogą oddziaływać z ziemską warstwą ozonową. Dopiero publikacja Moliny i Rowlanda [6] zwróciła uwagę na możliwość niszczenia ozonu przez chlor pojawiający się w stratosferze, w wyniku emisji tych związków. Od tej pory rozpoczęła się tak zwana wojna ozonowa, której celem było zaniechanie produkcji tych związków. Uzasadnienie konieczności ograniczenia ich emisji wiązało się z faktem, że ich stężenie w atmosferze zwielokrotniało się lawinowo. Mając stosunkowo długi czas życia, mogły one w przyszłości stanowić poważne zagrożenie dla ziemskiej warstwy ozonowej. Uważano, że tylko natychmiastowa akcja naukowców i polityków może wywrzeć dostateczny nacisk na przemysł i w konsekwencji ochronić warstwę ozonową, a tym samym ludzkość przed szkodliwym promieniowaniem ultrafioletowym.

Wydaje się, że promieniowanie ultrafioletowe, tak jak inne rakotwórcze substancje, powinno być zredukowane do zera. W rzeczywistości promieniowanie to jest składnikiem naszego naturalnego środowiska i jest w nim obecne tak długo jak życie. Promieniowanie ultrafioletowe, chociaż potencjalnie szkodliwe, jest wykorzystywane przez żywe organizmy do fotosyntezy witaminy D. Przed zbyt dużym natężeniem tego promieniowania organizmy bronią się syntetyzując absorbujący pigment – melaninę.

Wciąż brak wiedzy o wzajemnej zależności między naturalnym ekosystemem, a promieniowaniem ultrafioletowym, na które jest on narażony. Wiemy, że natężenie promieniowania ultrafioletowego różni się siedmiokrotnie nad Arktyką i tropikami, natomiast natężenie światła widzialnego tylko 1,6 razy na tej samej wysokości nad poziomem morza. Pomimo tak znacznego zróżnicowania tego natężenia nigdzie na Ziemi nie występuje ograniczenie roślinności związanej z tym promieniowaniem. Siedmiokrotna różnica w opadach deszczu wywołuje różnicę w pokryciu powierzchni lasami lub pustyniami. Wydaje się, że życie doskonale zaadaptowało się do tak szerokiego zakresu zmian natężenia promieniowania

ultrafioletowego. Zmniejszenie ekspozycji na promieniowanie słoneczne, czyli ograniczenie działania promieniowania ultrafioletowego, wywołuje ograniczoną produkcję witaminy D, a to z kolei prowadzi do rachityzacji i zmiękczenia kości. Wydaje się, że częstość przypadków sklerozy rozsianej (multiple sclerosis) zmienia się z szerokością geograficzną odwrotnie jak częstość raka skóry. Zmiana koloru skóry u ludzi mieszkających na różnych szerokościach geograficznych sugeruje, że z wyjątkiem ludzi migrujących, jesteśmy zaadaptowani do ultrafioletowego promieniowania przez odpowiedni kolor skóry.

Trzy cechy związków chlorowcowych powodują, że są one niebezpieczne. Pierwszą jest ich długi czas przebywania w atmosferze umożliwiający ich akumulację w niezmiennym stanie. Drugą jest zdolność do przenoszenia prawie całego chloru w nich zawartego wprost do stratosfery. Trzecią jest ich zdolność do silnej absorpcji promieniowania podczerwonego. Obecność tych gazów w atmosferze dodaje się do efektu cieplarnianego wywołanego dwutlenkiem węgla. Stanowi to większe niebezpieczeństwo niż obniżanie stężenia ozonu.

Nie ma wątpliwości, że pocienienie warstwy ozonowej nad Antarktydą, tak zwane dziury ozonowe, nie byłoby możliwe bez przemysłowego dostarczania do atmosfery gazów chlorowcowych. Stężenia związków chlorowcowych i bromowych wzrosły około pięciokrotnie od roku 1971, kiedy były po raz pierwszy mierzone. Wówczas były jeszcze nieszkodliwe.

Z punktu widzenia analogii klinicznej można stwierdzić, że obawa o raka skóry jako konsekwencji zmniejszenia stężenia ozonu, doprowadziła do pierwszej globalnej hipochondrii. Hipochondria może być wołaniem o pomoc, ale też może maskować prawdziwą chorobę. Może to dotyczyć stanu globalnego zdrowia. Obawa, że związki chlorowcowe zniszczą ziemską warstwę ozonową doprowadziła do odkrycia dziur ozonowych i efektu cieplarnianego wywołanego przez te gazy. Globalna hipochondria doprowadziła do pojawienia się ruchów ochrony środowiska na skalę globalną, ale też wyzwoliła wiele programów badawczych, które bez zbiorowego zaniepokojenia nie byłyby możliwe do finansowania.

7.4. Promieniowanie jonizujące

Naturalną energią we Wszechświecie jest energia jądrowa. Jeżeli tak, to dlaczego organizowane są marsze protestacyjne przeciw wykorzystaniu jej do produkcji energii elektrycznej. Obawy pochodzą z ignorancji, ponieważ nauka stała się niepojęta dla

nieprofesjonalistów. Kiedy pod koniec XIX wieku zostały odkryte promienie X i zjawiska jądrowe, to wtedy uważane były one za błogosławieństwo w medycynie. Dużo później stwierdzono, że zbyt duża dawka promieniowania X jest zabójcza.

Uważa się, że zmiana w nastawieniu do promieniowania jądrowego związana jest z eksplozjami w Hiroszynie i Nagasaki. Ale też wszystkie kraje były dumne z uruchamianych elektrowni jądrowych. A zatem co było powodem zmiany tego nastawienia? Promieniowanie jądrowe, stężenie pestycydów i związków chlorowcowych czy też ubytek warstwy ozonowej, są łatwo mierzalne i monitorowane. Pojawiły się liczby, których poprzednio nie było. Wartości stężeń poszczególnych składników środowiska nie powinny interesować publiczności, jeżeli nie zna ona wartości dopuszczalnych tych stężeń i ich oddziaływania ze środowiskiem. Społeczne niepokoje wywołane przez media są uspakajane przez sieci monitoringu, producentów aparatury i nakłady na te działania.

Przykładem może być incydent w Czarnobylu. Naukowcy obliczyli otrzymane dawki promieniowania jonizującego dla całej Europy oraz liczbę przewidywanych przypadków zgonów. Dlaczego takich obliczeń nie przeprowadza się dla smogu w Londynie, wypadków na autostradach, zgonów spowodowanych paleniem papierosów lub stosowaniem narkotyków. Dlaczego kawałek rudy uranowej ma być groźniejszy od kawałka węgla?

Rachel Carson swoją książką *Silent Spring* zapoczątkowała Ruch Zielonych. Było to możliwe po wcześniejszym stwierdzeniu rozpowszechnienia się pestycydów w całym środowisku. Pojawiły się liczby określające stężenie pestycydów w mleku krowim, mleku matek, w tkance tłuszczowej czy też pingwinach antarktycznych. Stężenia pestycydów zwiększały się i mogły one stanowić realne zagrożenie w przyszłości. Ludzkość zareagowała wzorowo, ograniczając produkcję tych związków o długim czasie karencji.

Obawy społeczeństw dotyczące energetyki jądrowej można uważać za bezpodstawne i działające jak ujemne sprzężenie zwrotne, gdyż promieniowanie jonizujące jest naturalnym składnikiem naszego środowiska.

Biologiczne skutki ekspozycji na promieniowanie jądrowe przypuszczalnie nie różni się od skutków wywołanych oddychaniem tlenem. Dawno wiadomo, że składniki wnętrza żywej komórki mogą być uszkodzone po przejściu fotonu X lub innych wysokoenergetycznych cząstek. Następuje wtedy zerwanie wiązań chemicznych i tworzone są reaktywne rodniki. Temu działaniu podlegają przeważnie cząsteczki wody, których jest najwięcej w żywej materii. Składniki rozerwanej cząsteczki wody w obecności tlenu mogą tworzyć produkty zawierające wodór, rodniki wodorotlenowe i nadtlenki wodoru.

Wszystkie one mogą niszczyć nieodwracalnie genetyczne polimery zawierające instrukcje dla komórki. Takie same destrukcyjne związki chemiczne są produkowane cały czas w nieobecności promieniowania jonizującego, w wyniku niewydajnego w normalnych procesach utleniania metabolicznego. Z punktu widzenia komórki, uszkodzenia wywołane promieniowaniem i oddychaniem tlenem są nierozróżnialne.

Rozpoczęta batalia przy końcu ery archaicznej przeciwko zanieczyszczeniem tlenem trwa nadal. Żywe systemy wynalazły antyutleniacze, takie jak witamina E usuwająca rodniki wodrowotlenowe, katalizująca nieaktywny nadtlenek wodoru oraz usuwająca wiele innych produktów oddychania. Wydaje się prawdopodobne, że czas życia większości zwierząt określony jest górną granicą ilości tlenu zawartego w komórkach. Tlen zabija tak samo jak promieniowanie, przez niszczenie w obrębie komórki instrukcji dotyczącej reprodukcji lub regeneracji. Dlatego tlen jest mutagenny i rakotwórczy, a oddychanie wyznacza okres naszego życia. Równocześnie tlen otwiera dla życia szerokie możliwości, które były niedostępne dla świata beztlenowego. Podobnie jak tlen, również energia jądrowa daje nam szansę na zaspokojenie naszych potrzeb energetycznych.

7.5. Prawdziwa dolegliwość

Kiedy jesteśmy świadkami dewastacji środowiska, to mówimy, że ludzie są rakiem na planecie, rozmnażając się bez przeszkód i niszcząc wszystko z czym mają kontakt. Czy mogą być rakiem ci, którzy demagogicznie walczą o ochronę środowiska. Ciągłość i moc Gai pochodzi z wzajemnego oddziaływania składników ekosystemu i żywych organizmów. Oddziaływanie to jest wymuszone przez życie rozpowszechnione od pojawienia się prokaryotycznych bakterii. Związki te wciąż jeszcze obficie rozwijają się w prymitywnej części życia. Konsekwencje dla Gai wynikające ze zmian środowiska powodowanych naszą działalnością są niczym w porównaniu z tymi, których każdy z nas doświadcza przez nieskrępowany rozwój chorych komórek. Chociaż Gaja może być odporna na tego typu gatunki jak ludzie, to nie znaczy że jesteśmy gatunkiem chronionym od własnej głupoty.

Wydaje się, że istnieje krytyczny ekosystem, którego zniszczenie lub usunięcie może mieć poważne konsekwencje dla obecnych zbiorowisk organizmów zamieszkujących komfortową dla nich Ziemię. Mokre tropikalne lasy i wodny ekosystem kontynentalnych szelfów wydaje się być zasadniczy i konieczny do utrzymania środowiskowego status quo. Widzimy początki choroby w formie zbyt kwaśnych deszczy, jako konsekwencje rozmnażania się alg w przeżyźnionych wodach europejskich brzegów morskich.

Dolegliwość Gai nie trwa długo w jej skali czasu. Wszystko to co zmienia świat na niekomfortowy dla życia wywołuje ewolucję tych gatunków, które mogą wpłynąć na nowe środowisko i zmienić je na komfortowe. Jeżeli świat staje się niedogodny wskutek ludzkiej działalności, to jego zmiana może powodować, że będzie lepszy dla życia, ale niekoniecznie dla nas. W przeszłości tego typu zmiany, jak skok od zlodowacenia do okresu międzylodowcowego, miały tendencje rewolucyjnych zmian, a nie ewolucyjnego stopniowego rozwoju.

Działalność ludzka na naszej planecie, nie ma charakteru ofensywnego, ani nie powoduje geofizjologicznych zmian dopóty, dopóki robimy to na małą skalę. W czasach kiedy było tylko 500 milionów ludzi na Ziemi, wtedy nie mogliśmy zaszkodzić Gai. Na nieszczęście, populacja wrasta do miliardów ludzi. Wzrasta również liczba krów, owiec i ptactwa. Używamy większość urodzajnej ziemi do upraw ograniczonych gatunków roślin przetwarzanych niewydajnie przez krowy. Co więcej, nasza zdolność do modyfikowania środowiska szybko rośnie przez stosowanie nawozów sztucznych, transportu i mechanicznych urządzeń do wycinania drzew. Wszystko to powoduje, że stwarzamy rzeczywiście niebezpieczne tendencje zmiany Ziemi w kierunku przeciwnym do komfortowego stanu, jaki mamy obecnie. To nie jest problem tylko populacji.

Nie mamy możliwości ograniczenia rozwoju agrokultury. Ale jest różnica między dobrym, a złym gospodarowaniem. Rolnictwo jest prawdopodobnie największym zagrożeniem dla zdrowia Gai. Użytkujemy 75% żyznej ziemi rejonów północnych. Jest to największa nieodwracalna geofizjologiczna zmiana dokonana przez ludzkość. Czy można wykorzystać tę ziemię dla żywienia nas i równocześnie powodować aby spełniała swoją geofizjologiczną i chemiczną rolę? Czy zboża mogą pompować dwutlenek węgla z taką samą wydajnością jak robił to ekosystem, który został przez nie zastąpiony. Wycinanie lasów wywołuje klimatyczny efekt równoważny dodawaniu dwutlenku węgla i innych gazów cieplarnianych do atmosfery. Nawet najbardziej złożony model klimatu nie potrafi przewidzieć konsekwencji tych zmian. Kompletny model wymaga, aby biota wprowadzona do niego występowała aktywnie w określonym zakresie zmian środowiska. Jak dotąd nie ma odpowiedzi na pytanie: jaka proporcja powierzchni rejonu może być zagospodarowana jako pola uprawne lub zalesiona bez znaczącego zakłócenia tak lokalnego, jak i globalnego środowiska.

Geofizjologia uświadamia nam, że cały ekosystem jest wzajemnie połączony. Jak w analogii, zwierzęca wątroba ma zdolność do regulowania wewnętrznego środowiska, ale

komórki wątroby mogą rosnąć w izolacji. Ale ani zwierzę bez wątroby, ani sama wątroba nie mogą żyć niezależnie. Każde z nich zależy od wzajemnych powiązań. Nie wiemy gdzie jest witalny ekosystem na Ziemi, chociaż trudno wyobrazić sobie kontynuację życia bez wszechobecnych starych bakterii żyjących w bagnach i środowisku beztlenowym. Bakterie te od 3,5 miliarda lat zamieniają węgiel w metan. Wodny ekosystem kontynentalnych szelfów transportuje podstawowe pierwiastki, takie jak siarka i jod, z morza do powietrza i przesyła je nad ląd. Lasy mokrych tropików w globalnej skali pompują olbrzymią ilość wody wprost do atmosfery (ewaporacja). Powoduje to kondensację wody w chmurach odbijających promieniowanie słoneczne mogące grzać i wysuszać ten rejon. Odparowanie wody pochłania dużą ilość energii oddawanej następnie w postaci ciepła utajonego w formowanych chmurach i deszczu. Transport składników pożywienia i produktów wietrzenia przez tropikalne rzeki jest składnikiem wzajemnych połączeń. Jeżeli parowanie w rejonach tropikalnych, transport pary wodnej do atmosfery oraz wód rzecznych do oceanów ma istotne znaczenie dla obecnego globalnego homeostatu, to zmiana tych rejonów na rolnicze lub pustynne musi mieć wpływ na resztę systemu.

Na pewno nie jesteśmy rakiem na Ziemi. Mamy jednak obowiązek rozpoznać potrzeby Ziemi. Musimy znaleźć odpowiedź na następujące pytania:

- jak stabilny jest obecny system,
- co może go wytrącić z równowagi,
- czy efekt zakłócenia może być odwrócony,
- czy bez naturalnego ekosystemu w obecnej formie świat może zachować obecny klimat i skład ekosystemów.

Jak żyć z Gają? Gaja eksponuje znaczenie indywidualnego organizmu. Od akcji indywidualnego organizmu, znaczącego w skali lokalnej, rozpoczyna się ewolucja w skali globalnej. Jeżeli środowisko faworyzuje jakiś organizm, to organizm ten faworyzuje również swój rozwój i rozprzestrzenia się gwałtownie. Ewentualnie środowisko i organizmy zmieniają się wspólnie w skali globu. Działanie odwrotne jest również możliwe, wówczas kiedy organizm jest przeciwnikiem środowiska i jest w nim dominujący. Czy to dotyczy ludzkości? Czy naszym przeznaczeniem jest niszczenie środowiska?

Jeżeli świat traktujemy jako żywy organizm, którego jesteśmy częścią, a nie właścicielami, dzierżawcami, lub nawet nie pasażerami, to będziemy mieć dość czasu do przystosowania naszego gatunku w celu przetrwania.

8. Krytyka hipotezy Gai

Przed publikacją hipotezy Gai w postaci książki zatytułowanej: „*Gaia, A new look at life on Earth*” [7], Lovelock opublikował szereg prac dotyczących homeostatu ziemskiego. Prace te to: „*Gaia as seen through the atmosphere*” [10], „*The quest for Gaia*” [14], „*Atmospheric homeostatics by and for the biosphere: the gaia hypotesis*” [15], „*Biological Modulation of the Earth Atmosphere*” [16]. Prace te nie wzbudzały szerszego zainteresowania chociaż w publikacji [17], dotyczącej modelu kontroli stężenia tlenu i dwutlenku węgla w atmosferze, autorzy powołują się na pracę Lovelocka [15].

Pierwsza praca dotycząca hipotezy Gai z 1972 roku [10] została zignorowana. Po opublikowaniu tej hipotezy w formie popularyzatorskiej została ona skrytykowana. Dla biologów regulacja atmosfery przez mikrobiologiczne żywe organizmy była absurdem. Dla klimatologów i geochemików jest oczywiste, że ewolucja skał, oceanów, powietrza i klimatu jest wynikiem tylko procesów fizycznych i chemicznych. Twierdzą oni, że z zapisów geologicznych wynika, iż te organizmy które lepiej konkurowały z sobą przystosowały się do zmiennych warunków klimatycznych.

Pierwsza konferencja dotycząca hipotezy Gai odbyła się w dniach 7 - 11 marca 1988 roku w San Diego. Organizatorem konferencji był Chapman Conference American Geophysical Union. Sprawozdanie z tej konferencji zostało opublikowane w Nature [18]. Burzliwa debata dotyczyła nie tylko hipotezy Gai, ale też cech odróżniających hipotezę od teorii. Dyskutowano nie tylko czym Gaja jest, a raczej czym nie jest. Lovelock powoływał się na Huttona, który już w 1785 roku postulował, aby Ziemią zajmowali się fizjologzy, którzy potrafią patrzeć na nią kompleksowo, a nie tylko na jej szczegóły. Dalej wyjaśniał, że problem Ziemi wymaga wielu specjalistów. Jedna osoba opisująca Ziemię narusza granice nauk, w których ta osoba będzie zawsze dyletantem. Hipoteza Gai w pewnych kręgach naukowych została zauważona, ponieważ postuluje ona, że przy spadku aktywności Słońca, odpowiedzią będzie kolektywna produkcja dwutlenku węgla przez żywe organizmy celem utrzymania stabilnej temperatury Ziemi. Jednakże przeciwnicy tej hipotezy, chociaż doceniają udział żywych organizmów w łańcuchu zmian geologicznych, to jednak uważają, że gazy atmosferyczne związane są głównie z geochemią, natomiast organizmy adaptują się tylko do istniejących warunków.

Odpowiedzią na te zarzuty jest rola siarczku dimetylu w regulacji temperatury Ziemi postulowana w hipotezie Gai. Oceaniczny fitoplankton produkuje siarczek dimetylu, który emitowany do atmosfery tworzy tam siarczkowe aerozole powodujące kondensacje chmur. Jeśli pokrycie Ziemi chmurami wzrasta, to rośnie jej albedo i mniej energii dopływa do powierzchni oceanów. Powoduje to spadek populacji fitoplanktonu. W ten sposób powstaje ujemne sprzężenie zwrotne między temperaturą Ziemi, a populacją fitoplanktonu. Przeciwno tej idei stawiano zarzuty, że populacja fitoplanktonu zależy nie tylko od temperatury, ale też jest sezonowa, zależnie od prądów oceanicznych i wielu innych czynników. Emisja siarczku dimetylu nie jest proporcjonalna do stężenia planktonu, ale zmienia się wraz warunkami oceanicznymi i obecnością innych organizmów oceanicznych.

Uczestnicy Konferencji podzielili się na zwolenników hipotezy (Gajan) i jej przeciwników. Zwolennicy odpierają zarzuty dotyczące roli siarczku dimetylu jako niepoważne, ponieważ z dużej liczby zachodzących procesów regulacyjnych nie można wydzielić jednego prostego niezależnego od innych. Przeciwnicy hipotezy Gai twierdzą, że hipoteza ta jest nie sprawdzalna.

Następny problem dyskutowany dotyczył pożarów. Ekolodzy uważają, że w długim przedziale czasu, spalenie lasu przyczynia się do jego ponownego zdrowego wzrostu. Ogień usuwa stare drewno, które może dławić dostęp pożywienia do gleby. Jednak regularne pożary niszczą młode drzewa, stare zostają w gruncie pozbawionym poszycia, które z biegiem czasu zamienia się w bagno. Z punktu widzenia ekologii, bagno jest prawdziwym końcem lasu i tylko zewnętrzne działania mogą zmienić jego stan. Czy wobec tego pożary odmładzają lasy? Gajanie twierdzą, że wiele drzew produkuje palny węglowodór, isopren, w dostatecznej ilości aby wywołać pożary. Drzewa poświęcają więcej niż 5% energii na produkcję isoprenu, zamiast na produkcję liści. Jednak częstotliwość występowania pożarów zależy nie tylko od własności palnych drzew, ale też od zawartości tlenu w atmosferze. Według Gajan ta zależność jest bardzo ważna. Gdyby w atmosferze było 30% tlenu, pożary byłyby zbyt częste i z punktu widzenia ekologicznego destrukcyjne. Zawartość na przykład tylko 12% tlenu powodowałoby rzadkie występowanie pożarów i lasy nie byłyby chronione przed starością. Czy lasy są czynnikiem globalnej stabilności tlenu nie pozwalając na zdławienie życia? Więcej tlenu powoduje więcej pożarów i więcej popiołu, którego większość może być zmyta do oceanów zwiększając w nich zawartość fosforu. Większa ilość fosforu w oceanach zwiększa ilość tlenu strącanego z minerałami na dno. Gajanie twierdza, że odpowiedzią lasów na zwiększoną ilość tlenu w atmosferze jest jego deponowanie w

oceanach. W ten sposób powstaje ujemne sprzężenie zwrotne. Jest to naiwne twierdzenie. Jeżeli drzewo spali się całkowicie, to cały jego węgiel znajdzie się w atmosferze w postaci dwutlenku węgla. Jeżeli na jego miejsce wyrośnie nowe drzewo, to w wyniku fotosyntezy cały ten dwutlenek węgla będzie ponownie uwięziony w materiale drzewa i uwolni tlen zużyty poprzednio w pożarze. W rezultacie w długim przedziale czasu pożary lasów nie wpływają na ilość tlenu i dwutlenku węgla w atmosferze.

Jednakże drzewa nie spalają się w całości. Zakładając, że 10% spalonego drzewa pozostawia swój węgiel jako biologicznie nieaktywny na glebie na czas dłuższy niż wymagany do wzrostu nowego drzewa, to te 10% musi pobrać z innego źródła. W efekcie w wyniku fotosyntezy zostanie uwolnione dodatkowe 10% tlenu więcej niż było zużyte do spalania poprzedniego drzewa. W czasie na tyle długim aby węgiel ze spalonego drzewa pozostał nieaktywny biologicznie, pożary lasów mogą być paradoksalnie, źródłem dodatkowego tlenu w atmosferze. Gajanie twierdzą, że przy małym stężeniu tlenu w atmosferze, pożary lasów są mało efektywne i rzeczywiście mogą wprowadzać tlen do atmosfery. Powstaje wówczas dodatnie sprzężenie zwrotne. Lovelock twierdzi, że dodatnie i ujemne sprzężenia zwrotne są podstawą stabilności złożonych systemów. Być może, że tlen uwalniany przez nowe drzewa po pożarach i usuwany przez oceaniczny fosfor, mogą razem utrzymywać atmosferyczne stężenie tlenu na poziomie 21%.

Wielu uczestników Konferencji było nastawionych sceptycznie odnośnie do tych argumentów. Podstawowy bilans węgla, tlenu i fosforu zawiera wiele źródeł i dziur, które w tym rozumowaniu nie są uwzględniane. Jednakże fundamentalna debata dotyczyła nie tylko szczegółów, czy wydajności poszczególnych sprzężeń zwrotnych, lecz pytanie czy takie mechanizmy są znaczące w hipotezie Gai.

W wyniku dyskusji pojawiło się rozróżnienie „silnej” i „słabej” wersji hipotezy Gai. Wersja silna, według Lovelocka, stwierdza: „Ziemia jest żywa”, lub „Ziemia jest super organizmem”. Wersja słaba łagodzi poprzednie stwierdzenia głosząc, że istnieją mechanizmy, w których biologia Gai może wpływać stabilizująco na klimat i vice versa. W ten sposób słaba wersja hipotezy Gai jest zgodna z tradycyjnym twierdzeniem, że życie przystosowało się do istniejących warunków.

Tlen był produkowany przez rośliny w długim przedziale czasu i przy innych jego stężeniach rośliny te również egzystowały. Z punktu widzenia Gai, życie i klimat dążyły w sposób ciągły w kierunku obecnych stabilnych warunków panujących na Ziemi. Z drugiej strony, życie zmieniało się w trakcie produkcji tlenu. Obecne warunki są stabilne, ponieważ

wszystkie możliwe nisze są wypełnione tlenem. Roślinne życie na Ziemi wytwarza maksymalną możliwą ilość tlenu, a równowaga jest ustalona przez równowagę między produkcją, a usuwaniem tego pierwiastka.

Długoczasowe zmiany warunków życia na Ziemi powodują duże trudności praktyczne i filozoficzne w interpretacji hipotezy Gai. Jeżeli Gaja zakłada stany ustalone, to czy okresy zlodowacenia niszczą je? Czy powodują globalne odmłodzenie, jak pożary lasów? Czy po okresie zlodowacenia Gaja znajduje się w nowym stabilnym stanie?

Silna wersja hipotezy Gai związana jest nieuchronnie z ideą celowej kolektywnej ewolucji. Słaba wersja nie jest niczym innym, jak powszechnie przyjętym stwierdzeniem, że życie na Ziemi przetrwało od czasów dawnych do dziś. Mimo wysiłków, w dyskusji nie stwierdzono, aby hipoteza Gai odpowiedziała na pytania dotyczące życia na Ziemi, oprócz tych, które do tej pory są znane. Watson, współpracownik Lovelocka, twierdzi, że hipoteza Gai mogłaby być testowana, gdyby próbować wprowadzić życie na Marsie. Aby życie mogło wpływać na klimat planety, musiałyby przekroczyć pewną „masę krytyczną”. Gdyby to było możliwe, to Gaja mogłaby kontrolować klimat planety w stabilnych warunkach zewnętrznych. Wiadomo, że Słońce zmieniło swoją aktywność o 30% w czasie istnienia Ziemi. Czy Gaia na Marsie potrafi w takich zmiennych warunkach zewnętrznych utrzymać na nim życie?

Można wyróżnić trzy możliwości występowania życia na danej planecie. Po pierwsze, życie na niej może się nigdy nie pojawić. Tak było prawdopodobnie na Wenus. Po drugie, życie może pojawić się i zniknąć. Tak prawdopodobnie było na Marsie. Po trzecie, może powstać i rozwijać się jak na Ziemi. Wszystkie te trzy możliwości mogą wystąpić w obrębie hipotezy Gai, jak wobec tego może być ta hipoteza testowana? Nawet różne myślowe eksperymenty nie pozwoliły na jej testowanie.

Konferencja w San Diego zakończyła się pretensjami pod adresem hipotezy Gai, że jest nie testowalna i nie wnosi nic nowego do nauki o Ziemi. Zadowoleni Gajanie, pełni romantyzmu, twierdzili że Gaja nie jest teorią, jest metaforą. Jest tym czym chcieli ją widzieć.

Po totalnej krytyce hipotezy Gai przez jej przeciwników, Lovelock stwierdził, że rzeczywiście brak jej poparcia naukowego. Razem z Watsonem opracowali więc model biologicznej regulacji temperatury na planecie podobnej do Ziemi, opublikowany pod nazwą *Daisyworld* [19, 20]. Model ten, przedstawiony w rozdziale 5 niniejszego opracowania, ilustruje możliwości regulacyjne temperatury planety, w szerokim przedziale zmian warunków zewnętrznych, dzięki zmianom albedo powierzchni pokrytych roślinami. Model

ten korzysta tylko z praw fizyki i równowagi w ilości energii absorbowanej i emitowanej przez daną planetę. Jest to odpowiedź na zarzuty stawiane hipotezie Gai na Konferencji w San Diego.

Zarzuty dotyczące testowalności hipotezy zostały odparte w pracy „Hands up for the Gaia hypothesis” [21]. Podano w niej przewidywania hipotezy Gai potwierdzone badaniami naukowymi:

- Brak życia na Marsie przewidywany na podstawie badania składu jego atmosfery został potwierdzony misją Vikingów w 1977 roku i w pracy [22].
- Organizmy produkują substancje, które przenoszą podstawowe pierwiastki z nad oceanów nad lądy. W 1973 odkryto emisję siarczku dimetylu i jodku metylu przez plankton [23].
- Klimat jest regulowany przez dwutlenek węgla, którego emisja związana jest z wpływem czynników biologicznych na wietrzenie skał. Wpływ mikroorganizmów na takie wietrzenie stwierdzono w 1989 roku [24, 25].
- Klimat może być regulowany przez formowanie się chmur, w wyniku emisji związków siarki przez algi w oceanach. Ten proces jest wciąż badany [26].
- Poziom stężenia tlenu w atmosferze w ciągu ostatnich 200 milionów lat utrzymuje się na poziomie 21 ± 5 %. Jest to hipoteza regulacji tlenu przez pożary i cykl fosforu [7, 9].
- Atmosfera ery archaicznej była zdominowana przez metan. Ten problem jest wciąż badany [7, 19].

Wyżej wymienione argumenty dowodzące o testowalności hipotezy Gai zostały mocno skrytykowane przez Kirchnera [27]. Twierdzi on, że nazywanie Gai geofizjologią Ziemi, z góry przesądza nietestowalność hipotezy, ponieważ fizjologię można dowolnie interpretować. Lovelock twierdzi, że algi działają w globalnym termostacie emitując siarczek dimetylu powodujący kondensację chmur. Kirchner twierdzi, że wyniki analizy rdzeni lodowych dowodzą czegoś przeciwnego. Stwierdzono bowiem wyższe stężenie siarczku dimetylu w okresach lodowcowych, co dawało efekt przeciwny. Lovelock odwraca fakty i twierdzi, że okres lodowcowy jest preferowany przez życie. Mimo tych uwag, Kirchner popiera pozytywną rolę hipotezy, ponieważ wyzwala ona pytania dotyczące Ziemi, choć bez tej hipotezy też byłyby stawiane, a odpowiedzi na nie też byłyby poszukiwane.

Oprócz wymienionych prac, odpowiedzią na krytykę hipotezy Gai jest nowa książka pt. *The Ages of Gaia, A Biography of Our Living Earth* [9]. W książce tej niektóre stwierdzenia zawarte w pracy [7] zostały stonowane. W tym opracowaniu autor przedstawił model biologicznej regulacji temperatury Ziemi (*Daisyworld*). W oparciu o ten model przedstawiono też zmiany stężenia tlenu w historii Ziemi, jako wyznacznika skokowych zmian klimatu.

9. Charakterystyka hipotezy Gai.

Współczesne poglądy na hipotezę Gai zostały omówione w ostatnim rozdziale książki pt. „*Symbiotyczna planeta*”, autorstwa pani Lynn Margulis [1]. Omówienie to nie jest bezstronne, ponieważ L. Margulis jest współautorem opracowania tej hipotezy. Niemniej głównym zarzutem stawianym tej hipotezie jest jej mistyczna otoczka, powodująca rezerwę wielu naukowców. Mimo wszystkich uwag krytycznych, hipoteza ta coraz poważniej traktowana jest w świecie naukowym. Dowodem tego była konferencja naukowa w Oksfordzie, która odbyła się w 1996 roku. Głównym tematem tej konferencji było zagadnienie dotyczące Gai, jako samoregulującego się organizmu. Wynikiem konferencji było powołanie Towarzystwa do Badania i Upowszechnienia Nauki o Systemie Ziemi (patrz wprowadzenie).

Lynn Margulis wyjaśnia, że Gaja nie jest żywym organizmem, natomiast w biologicznym sensie, jest ożywionym ciałem podtrzymującym procesy o charakterze fizjologicznym. Lovelock twierdzi, że życie na powierzchni naszej planety znajduje się w stanie homeostazy. Tak jak ludzie i ssaki utrzymują wewnętrzną temperaturę mimo zmian temperatury otoczenia, tak układ planetarny utrzymuje stałą temperaturę i skład atmosfery. Jeżeli model *Daisyworld* umożliwi czysto fizyczne wyjaśnienie stabilności temperatury planety, to złożony system ziemski czyni to również tylko w oparciu o prawa fizyczne. W tej sytuacji układ ten nie zawiera czynnika mistycznego i nie jest żywy w sensie biologicznym. Wzajemne sprzężenia zwrotne działają tak, aby wymagania biologiczne były spełnione. Bez życia na Ziemi, jej warunki fizyczne byłyby przewidywalne. Obecność na niej życia powoduje, że warunki te nie są przewidywalne w oparciu tylko o nauki geologiczne czy geofizyczne. Również nauki biologiczne same nie umożliwiają wyjaśnienia cech ziemskiego środowiska. Tylko wzajemne oddziaływanie życia i środowiska fizycznego stwarza możliwości wyjaśnienia przyjaznego dla życia klimatu w długiej historii Ziemi.

Personifikowanie Gai jako żyjącej bogini, karzącej lub nagradzającej nas za ekologiczne grzechy, jest nieporozumieniem. Na Ziemi miliony gatunków wydziela odpady, które są pożywieniem dla innych organizmów, co w sumie powoduje globalny obieg i *recykling* materii. Wszystkie żyjące organizmy wywierają na siebie wzajemne oddziaływanie. Suma tego planetarnego życia – Gaja – podlega działaniu procesów fizjologicznych, które postrzegane są jako procesy regulacyjne. L. Margulis stwierdza:

że ani ludzie, ani inne gatunki, nie są kluczowymi elementami życia. Ekspansja jednego gatunku zawsze musi kończyć się katastrofą, ponieważ żaden z nich nie może odżywiać się własnymi odpadami. W tym sensie wzrost populacji ludzi napawa niepokojem.

Przedstawiony zarys poglądów na Ziemię (rozdział 4) ewoluował w miarę rozwoju nauki. Koncepcje przyrodników z ostatnich stuleci dotyczą wpływu organizmów żywych na klimat ziemski, i oparte są często na intuicji. Znajdują one często potwierdzenie w badaniach naukowych. W wielu programach badawczych, realizowanych w ostatnim dwudziestoleciu, zwłaszcza dotyczących cyrkulacji węgla, siarki, dwutlenku węgla czy metanu stwierdzono wzajemne powiązanie biota ze światem fizycznym. Realizatorzy tych programów nie zdają sobie sprawy, że w efekcie końcowym, wyniki badań potwierdzają postulaty hipotezy Gai.

Personifikowanie Gai jako Matki – Ziemi i powoływanie towarzystw działających rzekomo w jej obronie nie jest zgodne z jej koncepcją naukową opartą na prawach fizycznych. Również filozofia chrześcijańska nie aprobuje takiego stanowiska.

10. Literatura

1. L. Margulis, *Symbiotyczna planeta*, Wyd. CIS, Warszawa 2000.
2. J.E. Lovelock, S.R. Lipsky, *J. Amer. Chem. Soc.*, **82** (1960) 431.
3. J.E. Lovelock, *Nature (London)*, **189** (1961) 729.
4. J.E. Lovelock, *Nature (London)*, **203** (1971) 379.
5. W.E. Wentworth, E C.M. Chen, J.E. Lovelock, *J. Phys. Chem.*, **70** (1966) 445.
6. M.J. Molina, F.S. Rowland, *Nature*, **249** (1974) 810.
7. J.E. Lovelock, *Gaia, A New Look at Life on Earth*, Oxford Univ. Press, Oxford 1979.
8. E. Schrödinger, *Czym jest życie, oraz: Umysł i materia, szkice autobiograficzne*, Wyd. Prószyński i Ska, Warszawa 1998.
9. J. Lovelock, *The Ages of Gaia, A Biography of Our Living Earth*, A volume of The

Commonwealth Fund Book Program, Ed. Lewis Thomas, Bantam Books, New York, Toronto, London, Sydney, Auckland, April 1990.

10. J.E. Lovelock, Gaia as Seen through the Atmosphere, Letter to the Editors, *Atmospheric Environment*, **6** (1972) 579.
11. M. Ryszkiewicz, *Matka Ziemia w przyjaznym kosmosie*, PWN, Warszawa 1994.
12. E. Suess, *Das Antkitz der Erde*, Wien 1909.
13. A. Watson, J. Lovelock, *Tellus*, **35B** (1983) 284.
14. J.E. Lovelock, S. Epton, *New Scientist* 6 February 1975.
15. J.E. Lovelock, L. Margulis, *Tellus XXVI* (1974) 1.
16. L. Margules, J.E. Lovelock, *Icarus*, **21** (1974) 471.
17. R. M. Garrels, A. Lerman, F. T. Mackenzie, *American Scientist*, **64** (1976)306.
18. D. Lindley, *Nature* **332**, 7 April, (1988) 483.
29. A.J. Watson, J.E. Lovelock, *Tellus* **35B** (1983)284.
20. J.E. Lovelock, *Microbiologia SEM* 4 (1988) 141.
21. J.E. Lovelock, *Nature* **344** (1990) 100.
22. D.R. Hitchcock, J.E. Lovelock, *Icarus*, **7** (1967) 149.
23. J.E. Lovelock, R. Maggs, R.A. Rasmussen, *Nature* **237** (1972) 452.
24. J.E. Lovelock, M. Whitfield, *Nature* **296** (1982) 561.
25. D.W. Schwartzman, T. Volk, *Nature* **340** (1989) 457.
26. R.J. Charison, J.E. Lovelock, M.O. Andreae, S.J. Warren, *Nature* **340** (1987) 655.
27. J.W. Kirchner, *Nature* **345** (1990) 470.