

JANUARY WEINER

## ISTOTA I POCZĄDZENIE ŻYCIA – SPOJRZENIE EKOLOGA

## I. WSTĘP

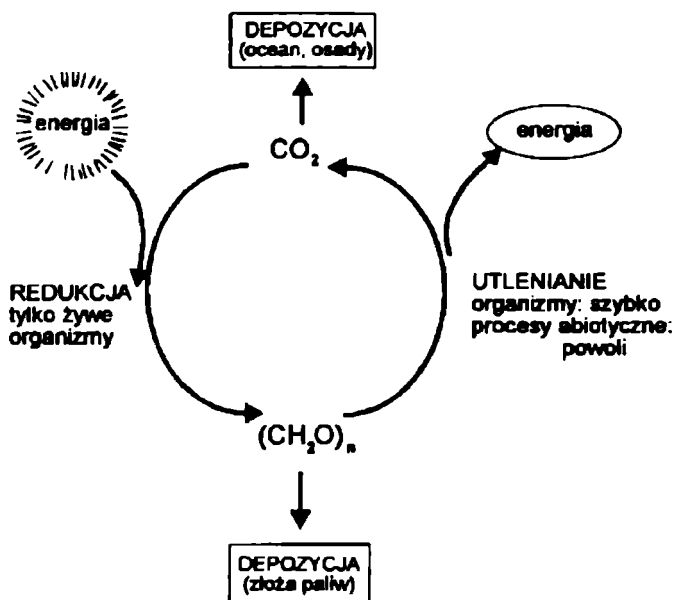
Nie jest łatwo streścić współczesne poglądy na powstanie i wczesny rozwój życia na Ziemi. Mamy tu do czynienia z grupą hipotez o bardzo wątych, jak dotąd, podstawach empirycznych. Trudno nawet zdefiniować przedmiot tych rozważań: co to w ogóle jest życie? Wielu przyrodników świadomie uchyła się od próby sformułowania takiej definicji. „Nie da się określić, co to jest życie”, powiadają, „można się tylko starać odróżnić 'żywe' od 'nieżywego’”- wówczas definicja życia sprowadza się do podania listy atrybutów żywego organizmu. Najczęściej wymienia się: zdolność do replikacji (rozmnażanie), zdolność do przetwarzania materii i energii (metabolizm), podkreśla się jedność strukturalną żywych organizmów, które zawsze zbudowane są z tych samych kilku pierwiastków, nieodmiennie w ich skład wchodzą kwasy nukleinowe i białka. Do stałych atrybutów żywych organizmów należą też dziedziczenie cech i ewolucja: produkowanie licznych potomków, z których tylko część daje początek następnym generacjom. Drobne różnice pomiędzy osobnikami, powstające przypadkowo, ale przekazywane potomstwu, umożliwiają selekcję (dobór naturalny), a co za tym idzie – ewolucję biologiczną.

Podejście „organizmo-centriczne” prowadzi jednak do niekonsekwencji: o ile zdolność do replikacji, metabolizm i określony skład chemiczny to rzeczywiście atrybuty każdego pojedynczego organizmu, o tyle podleganie doborowi naturalnemu i ewolucji może być już tylko właściwością licznych organizmów. Po wtóre, aby jakikolwiek pojedynczy organizm mógł przejawiać wymienione atrybuty, nie może być pojedynczym organizmem, odizolowanym od innych i od nieożywionego otoczenia. Skłania to do traktowania życia jako właściwości całej biosfery. Do tego samego wniosku prowadzi namysł nad domniemanym scenariuszem powstania i rozwoju życia na Ziemi. Jest to podejście ekologiczne, które nie jest alternatywą, lecz uzupełnieniem punktu widzenia biologa molekularnego.

## II. ISTOTA ŻYCIA: METABOLIZM BIOSFERY

Wszystkie żywe organizmy zbudowane są z zaledwie sześciu pierwiastków: C, H, O, N, P, S (stanowią one 95 % masy biosfery). W organizmach żywych pierwiastki te występują w postaci molekuł bogatych w elektrony, czyli w tzw. związkach zredukowanych. Na przykład związek węgla, stanowiący podstawową cegiełkę skrobi i celulozy (oraz innych cukrów):  $(CH_2O)_n$ , jest zredukowany, podczas gdy pospolity związek nieorganiczny, dwutlenek węgla  $CO_2$ , to związek utleniony. Nie wchodząc w szczegóły reakcji redukcji i utleniania, zauważmy tylko, że kiedy nagromadzą się związki zredukowane (bogate w elektrony) w obecności molekuł łakomych na te elektrony (czyli utleniających, takich jak np. gazowy tlen,  $O_2$ ), wówczas spontaniczny kierunek reakcji zmierzać będzie do utlenienia jednych kosztem drugich, czyli przepływu elektronów zgodnie z istniejącym potencjałem, aż do ustalenia się równowagi. Tak zawsze jest we wszystkich nieżywych układach chemicznych. Reakcja w przeciwnym kierunku, to znaczy zwiększająca potencjał utleniająco-redukcyjny, też jest możliwa, ale zazwyczaj nie przebiega spontanicznie, gdyż wymaga dostarczenia energii. Tylko żywe organizmy mają właściwość wykorzystywania energii zewnętrznej dla wykonania pracy potrzebnej do wyprodukowania

związków zredukowanych, z których same są zbudowane. Źródłem energii dla żywych organizmów w chwili obecnej jest promieniowanie słoneczne. Część organizmów potrafi korzystać z tej energii bezpośrednio, inne wykorzystują energię chemiczną zmagazynowaną przez te pierwsze. Tylko małe oazy życia zagubione w głębinach oceanów korzystają z energii wnętrza Ziemi. Są różne odmiany metabolizmu, ale zawsze chodzi o wymianę elektronów w procesach utleniania i redukcji. Te przemiany są możliwe dzięki temu, że organizmy żywe mogą oddzielać substancję utlenioną od zredukowanej i kontrolować przepływ elektronów za pomocą specjalnych urządzeń – błony komórkowej i wbudowanych w nią cząstek białka, enzymów. Proces życia napędzany jest więc przez strumień stale dopływającej energii; póki Słońce świeci, energii nie zabraknie. Potrzebna do życia materia jest natomiast dostępna w ilości bardzo ograniczonej. Organizmy zagospodarowują ją natychmiast jako materiał budulcowy i jako źródło lub ujście strumienia elektronów, którego przepływ wykonuje pracę. Materia krąży więc w zamkniętym cyklu utleniania i redukcji, produkcji i dekompozycji biomasy, w którym najważniejszą rolę odgrywają trzy pierwiastki: węgiel, tlen i wodór (ryc. 1), a z organizmów – rośliny i mikroby.



Ryc. 1. Schemat obiegu węgla w biosferze

W biosferze stale panuje wysoki potencjał utleniająco-redukcyjny: gromadzi się ogromna ilość zredukowanej materii organicznej w postaci ciał żywych organizmów (mikrobów, roślin, zwierząt), a atmosfera obfituje w tlen. Jest to stan daleki od równowagi termodynamicznej i bardzo charakterystyczny. Jeżeli na jakiejś planecie zostanie atmosfera o podobnie wysokim potencjale oksydo-redukcyjnym jak na Ziemi, będzie to dowód istnienia życia. Fakt ciągłego utrzymywania biosfery w takim właśnie stanie przez miliardy lat oraz to, że do zamknięcia cyklu obiegu deficytowych pierwiastków potrzebne jest współdziałanie różnych organizmów, skłoniło niektórych badaczy do wysunięcia hipotezy, że biosfera jest „superorganizmem”, celowo zbudowanym, funkcjonalnym układem. W ostatnich czasach pogląd ten upowszechnił się pod nazwą „Hipotezy Gaji” i stał się podwaliną ideologii ruchu „New Age”. Jest to jednak pogląd

biologicznie błędny (w biosferze nie istnieją mechanizmy homeostazy, takie jak u pojedynczych organizmów), a metodologicznie zbytyczny (prawa fizyki i chemii oraz zasady funkcjonowania żywych organizmów wystarczają do wyjaśnienia zjawisk w biosferze).

### III. TEORIE BIOGENEZY

Nie wiadomo, czy kiedykolwiek uzyskamy dane doświadczalne w sposób ostateczny rozstrzygające, w jaki sposób doszło do powstania życia na Ziemi. Na razie zadowolili się musimy spekulatywnymi hipotezami. Co jakiś czas powraca pomysł o pozaziemskim pochodzeniu życia. Ostatnio (1986) do tezy tej wrócił znany z ekscentryczności brytyjski astrofizyk Hoyle, który sądzi, że życie mogło powstać w warunkach, jakie panują w przestrzeni kosmicznej, i dopiero stamtąd „zainfekowało” Ziemię. Hoyle nie odwołuje się przy tym do żadnych sił nadnaturalnych, a poparciem dla jego tezy może być niedawne wykrycie jednego z aminokwasów, glicyny, w obłokach materii międzygwiazdowej. Francis Crick (ten sam, który z Watsonem odkrył strukturę DNA) twierdzi natomiast, iż życie na Ziemi nie tylko pochodzi z Kosmosu, ale zostało stamtąd świadomie na naszą planetę zaszczerpię przez Kosmitów. Czytając Cricka, nie sposób zgadnąć, czy kpi, czy pisze serio.

W każdym razie pomysł o pozaziemskim pochodzeniu życia nie ma wielu zwolenników, gdyż jest mało ciekawy i odsuwa tylko problem w czasie i przestrzeni. W latach 30. powstała pierwsza spójna teoria biogenezy autorstwa A. Oparina, której głośnym propagatorem był J. B. S. Haldane. Zakładali oni, że pierwotna atmosfera Ziemi oprócz pary wodnej i dwutlenku węgla zawierała metan ( $\text{CH}_4$ ), amoniak ( $\text{NH}_3$ ), tlenek węgla ( $\text{CO}$ ), cyjanowodor ( $\text{HCN}$ ), a więc miała silne właściwości redukujące. Oparin i Haldane słusznie przypuszczali, iż w mieszaninie o podanym wyżej składzie, przy dopływie różnych form energii, mogłoby z łatwością dojść do syntezy związków organicznych, które są podstawowym budulcem żywych organizmów: aminokwasów, peptydów, cukrów, lipidów i nukleotydów. Potwierdzili to w latach 50. Urey i Miller w kilku eleganckich doświadczeniach.

Wyobrażano sobie, iż u zarania dziejów życia musiało dojść do nagromadzenia znacznych koncentracji mieszaniny związków organicznych i soli mineralnych, zapewne sądzono – w płytkich lagunach, gdzie z jednej strony docierałoby dość energii słonecznej dla podtrzymania syntezy, ale nowo powstałe molekuly mogłyby „uciec” w głąb wody, aby nie ulec zniszczeniu przez te same siły, które przyczyniły się do ich powstania. Haldane wymyślił nazwę dla tej mieszaniny: „zupa pierwotna” – termin, który zrobił zawrotną karierę. W tej zupie miały następować dalsze reakcje, prowadzące do powstania polimerów: peptydów, białek, wreszcie koloidalnych kompleksów lipidowo-białkowych w formie mikroskopijnych pęcherzyków – prekursorów komórek. Inni badacze wytwarzali takie struktury poprzez naprzemienne ogrzewanie w wysokiej temperaturze, suszenie i zwilżanie mieszaniny aminokwasów. Powstają wówczas tzw. „mikrosfery”, z wyglądu i niektórych właściwości przypominające komórkę z podwójną błoną.

Teoria Oparina-Haldane'a nie wytrzymała próby czasu, chociaż nadal aktualny pozostał główny postulat: życie mogło powstać w drodze przemian chemicznych ze związków nieorganicznych. Dziś mamy jednak coraz więcej dowodów na to, iż pierwotna atmosfera Ziemi miała inny skład, niż dawniej przypuszczano. Składała się w przeważającej części z dwutlenku węgla i azotu, gazów prawie nieaktywnych chemicznie. Jeżeli nawet obecna była para wodna i ślady cyjanowodoru, amoniaku czy metanu, spontaniczne powstawanie związków organicznych było znacznie wolniejsze, niż zakładał Oparin.

Substrat wyjściowy – proste związki organiczne – były zapewne rozpuszczone w wodzie, gdyż inaczej wkrótce uległyby rozpadowi, ale ich stężenie było jednak zbyt małe, aby mogła następować spontaniczna synteza większych molekul: białek, lipidów czy kwasów nukleinowych.

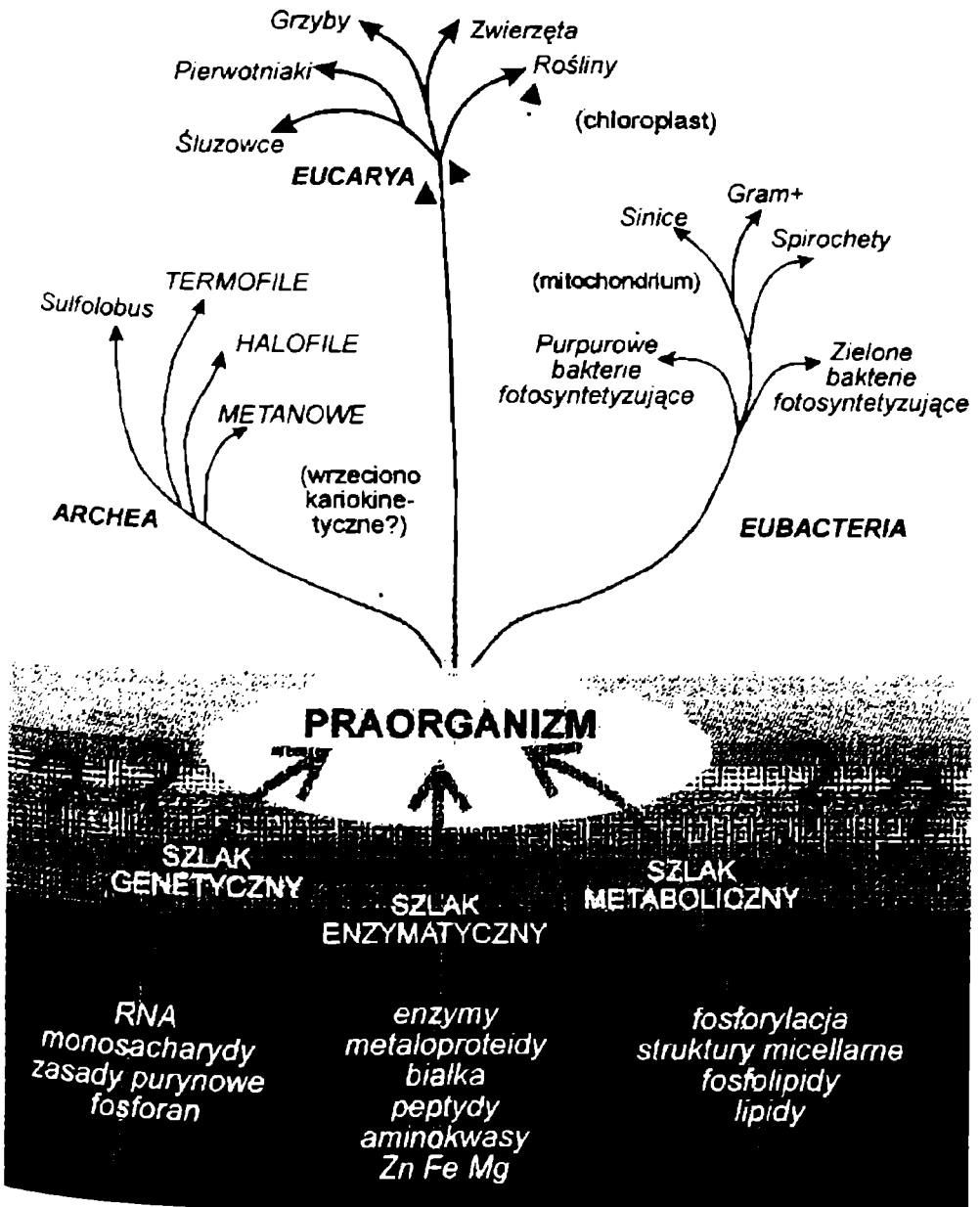
Sytuacja w praocenie, w okresie powstawania życia mogła nie różnić się zasadniczo od tej, jaka jest obecnie. Dzisiaj związki węgla pochodzenia organicznego w słabym stężeniu znajdują się w wodzie morskiej. Związki organiczne adsorbują łatwo na powierzchni cząstek mineralnych i zawiesin organicznych, które stopniowo opadają na dno. W mułach i ilach przydennych znajduje się więc znacznie bardziej skoncentrowana mieszanina związków organicznych. W praocenie zapewne było podobnie, z tym że związki „organiczne” były abiotycznego pochodzenia. Wobec braku organizmów rozkładających tę materię akumulacja mogła być znaczna. Trwające tam procesy fizykochemiczne mogły doprowadzić do utworzenia pra-membran i pra-komórek, mogły też następować reakcje utleniania związków organicznych, a uwalniana przy tym energia mogła zasilać inne syntezy.

Podstawową trudność w rekonstrukcji przebiegu wydarzeń stanowi fakt, iż dzisiaj makromolekuły biologiczne: białka i kwasy nukleinowe, nie mogą się bez siebie obejść: synteza jednych odbywa się tylko i wyłącznie za pomocą drugich. Kwasy nukleinowe stanowią program – „dokumentację techniczną” potrzebną do budowy białek, zaś białkowe enzymy są „narzędziem” niezbędnym do wyprodukowania nici DNA. Stajemy więc wobec klasycznej zagadki o jaju i kurze. Znalezienie odpowiedzi, które z nich było pierwsze, wymaga odejścia od stereotypu, jakim jest szukanie rozwiązania tylko w chemii białek i kwasów nukleinowych.

Cairns-Smith i Degens proponują, aby zwrócić się ku związkom nieorganicznym, kryształom mineralów ilastych, które powstają przy wietrzeniu skał. Polikryształy te mają złożoną, regularną strukturę i mogą stanowić „rusztowania”, na których mogłoby dochodzić do syntezy uporządkowanych polimerów organicznych. Eksperymentalnie dowiedziono, iż w obecności mineralów ilastych takie wielkocząsteczkowe związki, jak węglowodory alifatyczne, mono- i polisacharydy, fosfolipidy, aminokwasy, peptydy, tworzą się z wydajnością tysiące razy większą, niż byłaby możliwa przy takich samych stężeniach substratów, ale bez udziału mineralnej „matrycy” „Zupę” Haldane'a w naszym wyobrażeniu prebiotycznego środowiska zastępuje więc ni mniej, ni więcej tylko glina, „muł ziemi” Pomiedzy powstaniem złożonych polimerów czy nawet fragmentów błon fosfolipidowych a powstaniem żywego organizmu jest jednak przepaść. Brakuje nam nie tylko wiedzy na temat, jak mogło dojść do powstania pierwszej funkcjonującej struktury (prakomórki); nie mamy nawet kompletnego hipotetycznego scenariusza. Biorąc pod uwagę cechy współczesnych żywych organizmów, możemy się tylko domyślać, iż zanim powstał pierwszy funkcjonujący organizm, prebiotyczna ewolucja musiała przebiegać wzdłuż trzech szlaków (ryc. 2): enzymatycznego, metabolicznego i genetycznego.

Szlak genetyczny musiał doprowadzić do powstania kodu genetycznego, który jest uniwersalny dla wszystkich żywych organizmów, musi więc pochodzić z najwcześniejszej fazy ewolucji organicznej. Domyślamy się, że najpierwotniejszym nośnikiem informacji genetycznej był kwas rybonukleinowy (RNA), użycie kwasu dezoksyrybonukleinowego (DNA) było znacznie późniejszym wynalazkiem. Wiemy, że krótkie łańcuchy RNA potrafią się same dość dokładnie replikować bez pomocy białkowego enzymu. W jaki sposób doszło do skojarzenia replikacji nici RNA z syntezą białek – nie wiadomo. Szlak metaboliczny miałby doprowadzić do utworzenia typowej struktury wszystkich komórek: błon lipidowych. Wydaje się prawdopodobne, iż podstawowe reakcje biochemiczne następowały w „pierwotnej glinie” już w fazie prebiotycznej. Potrzebne do tego są nie tylko substraty i dopływ energii, ale również separacja poszczególnych faz. To mogło być zapewnione dzięki fizykochemicznym właściwościom roztworów i koloidów wodnoorganicznych. Wiele różnych związków tworzy w tych warunkach pęcherzykowate struktury, otoczone pojedynczymi lub podwójnymi błoniastymi warstwami molekuł. Tendencję do tworzenia takich struktur mają fosfolipidy (jedne ze związków syntetyzowanych na mineralnej matrycy, a przy tym typowy element strukturalny błon komórkowych współczesnych organizmów).

Szlak enzymatyczny musiał doprowadzić do powstania reakcji katalizowanych przez białka. Można przypuszczać, iż białka początkowo w ogóle nie miały znaczenia strukturalnego.



Ryc. 2. Schemat hipotetycznego scenariusza ewolucji prebiotycznej (na ciemnym tle) i dobrze już poznanej ewolucji biologicznej

ralnego, a jedynie funkcjonalne. Jedną z pierwszych zdobyczy mogło być „inkrustowa-  
nie” błon fosfolipidowych cząsteczkami białek, które umożliwiały selektywny, a z cza-  
sem aktywny transport substancji poprzez nieprzepuszczalną błonę.

Początek życia musiał polegać na sprzężeniu abiotycznych reakcji: replikacji RNA,  
tworzenia (zapewne) fosfolipidowych struktur micellarnych czy też koacerwatów.

wreszcie reakcji biochemicznych. Kiedy i jak do tego doszło, nie wiemy. Potrafimy jednak wyobrazić sobie taki praorganizm. Przypominał dzisiejsze prymitywne bakterie. Był heterotrofem, a więc energię dla swoich endoergiczných przemian czerpał ze związków organicznych. Był beztlenowcem, bo tlenu w atmosferze jeszcze nie było. Utleniaenia substratu dokonywał za pomocą związków siarki czy związków organicznych. Dopiero po około 2 miliardach lat takiego życia system metaboliczny polegający na redukowaniu cząsteczki CO<sub>2</sub> przy wykorzystaniu wody i energii świetlnej (fotosynteza) zdobył dominację. Od tej pory atmosfera Ziemi nasyciła się tlenem. Nie wydaje się, by pierwsze organizmy mogły przypominać dzisiejsze wirusy, ograniczone do samego „szlaku genetycznego”, których metabolizm i replikację muszą prowadzić „prawdziwe” organizmy.

#### IV. POWSTANIE WSPÓŁCZESNYCH FORM ŻYCIOWYCH

Hipotetyczna „praistota” dała początek wszystkim współczesnym głównym grupom świata ożywionego. O ich pochodzeniu ze wspólnego pnia świadczy jedność struktury i podstawowych funkcji, a zwłaszcza jednolitość kodu genetycznego. Archaea, zwane też Archaeobacteria – to jednokomórkowe organizmy podobne do bakterii, ale spokrewnione z nimi nie bardziej niż np. ssaki (ryc. 2). Są wśród nich gatunki przystosowane do ekstremalnych środowisk (wysokiego zasolenia, wysokiej temperatury), o osobliwych przystosowaniach metabolicznych. Archaea i Prokaryota różnią się od wszystkich pozostałych budową komórki, która nie zawiera uformowanego jądra. Prokaryota, to bakterie i sinice. Wszystkie pozostałe organizmy żywe charakteryzują się komórkami z typowym jądrem i zaliczane są do Eukaryota. Dzielimy je na 5 królestw: śluzowce, grzyby, pierwotniaki, zwierzęta i rośliny. W dalszej ewolucji wielką rolę odegrała współpraca różnych organizmów. Eukaryota powstały najprawdopodobniej w drodze symbiotycznego połączenia różnych organizmów w jednej komórce. Komórki wszystkich Eukaryota zawierają mitochondria, w których zlokalizowany jest komplet enzymów łańcucha oddechowego. Struktury te do złudzenia przypominają niektóre współczesne bakterie fotosyntetyzujące i jest wysoce prawdopodobne, iż kiedyś przodkowie tych bakterii dokonali inwazji komórek „pra-Eukaryota” i odtąd żyją w symbiozie: komórka „żywiciela” dostarcza substratów, a „komórka” mitochondrium – energii. Chloroplasty roślin zielonych są uderzająco podobne do komórek sinic. Zapewne powstanie roślin zielonych również było wynikiem symbiozy dwóch różnych organizmów.

Ewolucja trwająca przez miliardy lat doprowadziła do powstania niezwykle skomplikowanych form, w tym organizmów gigantycznej wielkości, jak sekwoje, wieloryby i dinozaury, oraz tak malowniczych, jak rajskie ptaki, żyrafy i motyle. Ale kiedy uważnie przyjrzeć się temu, co dziś żyje na Ziemi, okaże się, że pod względem liczby osobników, różnorodności form oraz znaczenia dla podtrzymywania procesów fizykochemicznych, stanowiących o życiu biosfery, nadal dominującą rolę odgrywają mikroorganizmy, niewiele różniące się od tych, które pojawiły się na naszej planecie przed miliardami lat.