

Mamy dziś schyłek drugiego tysiąclecia po narodzeniu Chrystusa, dobiega końca 65. milion lat ery kenozoicznej. Około 200 tysięcy lat temu pojawił się nasz gatunek, Homo sapiens, od około 40 tysięcy lat przejawiający wyraźną aktywność cywilizacyjną i tworzący kulturę.

POCZĄTKI ŻYCIA

January Weiner

Życie na Ziemi miało swój początek. Wiadomo na pewno, że kiedyś życia na Ziemi nie było, bo przed około 4,5 miliardami lat nasza planeta była rozżarzoną kulą. Wiemy też, że już od niespełna czterech miliardów lat życie na Ziemi istnieje. A więc kiedyś musiało się pojawić. Kiedy? Jak to się stało? Czy życie powstało tu, na Ziemi, jako wyjątkowy przypadek w skali kosmicznej, czy powstaje wszędzie, gdzie tylko zapanują odpowiednie warunki? Ile było początków? Czy rzeczywiście tylko jeden? Może kosmiczne katastrofy we wczesnej historii Ziemi raz po raz sterylizowały planetę i życie zaczynało się od nowa? A może równolegle istniały różne formy życia i jedna z nich wygrała w drodze doboru naturalnego? Nie można tego całkiem wykluczyć, ale jeżeli nawet tak było, to gra trwała krótko i żadnych śladów po niej nie ma. My – wszystkie organizmy na naszej planecie, od wirusów po człowieka – mamy jednakowy schemat budowy i funkcjonowania, pochodzimy z jednego pnia; jesteśmy „monofiletyczni” – jak mówią biolodzy, wszyscy ze wszystkimi spokrewnieni. Nie ma na Ziemi przedstawicieli innych „żyć”; tam, gdzie już jest życie, nowe nie może powstać, bo każdy jego związek padnie ofiarą sprawnych, lepiej dostosowanych, zawsze głodnych i agresywnych organizmów, które już tu są. Być może jakąś inną formę życia, niezależną od tego, które już istnieje, uda się powołać uczonym w laboratoriach. Niektórzy twierdzą buńczucznie, że już tego dokonali, ale zdecydowana większość biologów nie traktuje tych oświadczeń poważnie. Jak dotąd za godne tego miana nie uznajemy niczego, oprócz tego jedynego, naturalnego życia, które nas otacza.

Ale co to w ogóle jest „życie”? Znając tylko jedno takie zjawisko, biolodzy mają kłopot z definicją. Najczęściej ograniczają się do wymieniania atrybutów tego, co uważają za przejawy życia. Jedni podkreślają wspólne cechy pojedynczych organizmów, takie jak metabolizm czy zdolność do reagowania, inni zwracają raczej uwagę na to, że pojęcie życia można odnieść jedynie do zbioru elementów zdolnych do ewoluowania poprzez dobór naturalny, to znaczy powielających się, dziedziczących cechy, obdarzonych zmiennością. Rozstrzygnięcie fundamentalnych sporów o istotę i pochodzenie życia bardziej zależy od przyjętej definicji niż od wyników eksperymentów. Czy to, co kiedyś stworzymy w laboratorium albo znajdziemy na jednym z księżyców Jowisza, będzie życiem czy może zjawiskiem abiotycznym – takim, jak zużywające energie i reagujące na bodźce roboty albo też rozmnażające się i ewoluujące wirusy komputerowe? Arbitralnie przyjmujemy, że żywe układy to te, które przejawiają wszystkie wymienione cechy, a więc te, które od czterech miliardów lat są na Ziemi i podlegają ewolucji w drodze doboru naturalnego, przetwarzają materię i energię, te, do których sami się zaliczamy.

Według naszej dotychczasowej wiedzy Ziemia jest jedynym miejscem, gdzie istnieje życie. Od kiedy tu jest – wszystko jedno, czy zainicjowane tu, na Ziemi, czy przeniesione w drodze kosmicznej infekcji – oblicze Ziemi się zmieniło. Życie to zjawisko globalne. Od czterech miliardów lat życie – a z nim powierzchnia naszej planety – ulega zmianom. Jest to po części wynik oddziaływania czynników zewnętrznych, jednak przede wszystkim są to zmiany wynikające z immanentnego dla życia procesu ewolucji biologicznej. Ewolucja jest procesem ciągłym, powodowane przez nią zmiany są stopniowe. Mimo zmian, które kumulowały się przez blisko cztery miliardy lat, główne zasady funkcjonowania życia pozostają zawsze takie same.

Badania historii życia na Ziemi ujawniają, że zmiany ewolucyjne nie przebiegały równomiernie: okresy względnej stabilizacji przedzielają epizody gwałtownych zmian o zasięgu globalnym. Paleontolodzy wyróżniają okresy o podobnych faunach, znajdowanych w warstwach geologicznych. Dźwięczne nazwy tych okresów zwykle pochodzą od miejsc, gdzie te warstwy zidentyfikowano: kambry, ordowik, sylur, dewon, karbon, perm, trias, jura, kreda; tylko najmłodsze nazwano pospolicie: trzeciorzęd i czwartorzęd.

Dziś wiemy, że wiele z owych cezur oddzielających okresy i ery geologiczne to ślady gwałtownych wydarzeń, wielkich wymierań, i późniejszego odradzania się różnorodności.

Najbardziej wyraziste przemiany form życia na Ziemi dzielą perm od triasu i kredę od trzeciorzędu. Cezury te uznano za granice er geologicznych: paleozoiku, mezozoiku i kenozoiku. Wszystkie razem obejmują jednak zaledwie niespełna 600 ostatnich milionów lat, tzw. eon fanerozoiczny, doskonale zbadany przez paleontologów. Poprzednie eony: archaiczny i proterozoiczny, rozciągają się na miliardy lat, o których paleontologia niewiele ma do powiedzenia. Ale na historię życia na Ziemi można popatrzeć nieco inaczej. Na przykład Christian de Duve¹ dostrzega 7 etapów w historii życia: wiek chemii, wiek informacji, wiek prakomórki, wiek pojedynczej komórki, wiek organizmu wielokomórkowego, wiek umysłu i przyszłość: wiek nieznanego. W niedawno wydanej książce John Maynard Smith i Eörs Szathmáry² wyróżniają 8 punktów zwrotnych w historii życia, które miały fundamentalne znaczenie dla przebiegu ewolucji: oddzielenie samoreplikujących się molekuł chemicznych od środowiska w prakomórkach, połączenie niezależnych replikatorów w zespoły (chromosomy), oddzielenie roli przekazywania informacji (DNA) od katalizowania reakcji (białkowe enzymy), powstanie tzw. komórki eukariotycznej, wyposażonej w jądro i organelle (poprzez symbiotyczne sprzężenie komórek prokariotycznych), zastąpienie klonowania rozrodem płciowym, powstanie organizmów wielokomórkowych, powstanie społeczeństw zwierzęcych i wreszcie społeczeństwa ludzkiego (dzięki wynalazkowi mowy). Każde z tych wydarzeń coś zapoczątkowało, było wszakże jednym z ogniw w łańcuchu wydarzeń następujących konsekwentnie po sobie. Wyróżniono je ze względu na znaczenie dla genetycznych mechanizmów ewolucji. Dla niewtajemniczonych ich sens może nie być łatwy do uchwycenia; niektóre z tych przełomów trudno zlokalizować w czasie, nie łączą się bowiem z żadnymi spektakularnymi zmianami w zapisie geologicznym.

¹ Christian de Duve, *Vital Dust. The Origin and Evolution of Life on Earth*, Basic Books, New York 1995.

² John Maynard Smith, Eörs Szathmáry, *Tajemnice przełomów w ewolucji*, tłum. Michał Madaliński, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.

W moim szkicu chcę skupić się na wydarzeniach, które znamionuje rozerwanie ciągłości rozwoju życia: kiedy karty ewolucyjnej gry potasowano i rozdano na nowo. Po kryzysach życie się odradzało i rozwijało dalej, ale podążało już po innej trajektorii. Wydarzenia takie nieraz zbiegały się z którymś z przełomów, wyróżnionych przez geologów, opisywanych przez de Duve'a czy Maynarda Smitha i Szathmáry'ego, ale nie zawsze taka koincydencja zachodziła. Patrząc wstecz na historię życia na Ziemi, można dostrzec kilka takich kryzysów i odrodzeń, nowych początków.

Pierwszy początek: biogeneza

Przyrodnicy zajmujący się empirycznymi badaniami początków życia zwykle przyjmują roboczą hipotezę, że życie powstało na Ziemi w wyniku naturalnych procesów fizykochemicznych, około 4 miliardy lat temu. To jest założenie najbardziej oszczędne, nie wymaga żadnych dodatkowych hipotez. Nie można dzisiaj obserwować procesu biogenezy ani porównywać ze sobą przejawów życia, które powstawało niezależnie w różnym czasie i w odmiennych miejscach. Mamy tylko jeden obiekt badań o bardzo niekompletnie udokumentowanej historii. Dociekania badaczy polegają więc na tworzeniu hipotetycznych scenariuszy i sprawdzaniu, czy nie ma w nich sprzeczności wewnętrznych, czy zgodne są z aktualnym stanem wszystkich nauk przyrodniczych. Nie są to czcze spekulacje, bowiem uczeni testują swoje hipotezy, konfrontując je z danymi obserwacyjnymi i wynikami laboratoryjnych eksperymentów. Niektóre scenariusze okazują się mniej prawdopodobne, inne – bardziej. Dokonuje się swoisty dobór naturalny pomiędzy hipotezami. Żadna z nich nie osiągnęła jeszcze statusu obowiązującej teorii.

Mamy więc garść hipotez, różniących się większą lub mniejszą liczbą szczegółów, prawdopodobnie któraś z nich jest bliska prawdy: tak mogło być. Ale jak było naprawdę, zapewne nigdy się nie dowiemy. Stan dociekań, w wielkim skrócie, można streścić następująco. Aby życie mogło powstać, konieczne było współistnienie związków chemicznych o różnym potencjale energetycznym. Dziś taki potencjał istnieje pomiędzy nagromadzoną materią organiczną a tlenem atmosferycznym; podtrzymuje go ciągła praca ziolo-

nych autotrofów, wykorzystujących energię słoneczną. U zarania życia potencjał taki mógł powstać dzięki energii procesów wulkanicznych, promieniowania słonecznego i wyładowań elektrycznych, które oddziaływały na mineralne substancje obecne na powierzchni Ziemi. Oparin i Haldane pod koniec lat 20. wyobrażali sobie, że to w atmosferze nagromadziły się potrzebne do syntezy makromolekuł organicznych lotne związki: amoniak, metan, wódór, para wodna. Zadziwiająco prosty eksperyment laboratoryjny, polegający na przepuszczaniu iskier elektrycznych przez taką mieszaninę doprowadził do powstania całej gamy związków organicznych, znanych jako podstawowe składniki żywych organizmów, co ugruntowało tę hipotezę na wiele lat. Potem jednak badania paleochemiczne dowiodły, że wczesna atmosfera Ziemi nie mogła mieć składu przewidywanego przez Oparina. Postawiono też pytanie o dalsze losy prostych związków organicznych, które powinny łączyć się w niezbędne dla życia, uporządkowane, ogromne cząsteczki. Kolejne scenariusze biorą więc pod uwagę inne miejsca, gdzie mógł nagromadzić się odpowiedni potencjał energetyczny i potrzebne substraty. Okazuje się, że mogły to być wyloty gorących, wulkanicznych źródeł na dnie oceanów lub w głębi litosfery. Co więcej, w takich miejscach pojawiają się minerały, których struktura krystaliczna ułatwia kondensację małych cząsteczek związków organicznych i ich polimeryzację w charakterystyczne dla żywych układów makromolekuły. Szczególnie interesującym kandydatem do roli kolebki życia wydaje się pospolity minerał, siarczek żelaza, czyli piryt. Te scenariusze również wychodzą obronną ręką z testów laboratoryjnych. Utwierdza nas to w przekonaniu, że powstanie skomplikowanych cząsteczek budujących żywe komórki przed 4 miliardami lat było możliwe na Ziemi, i to na kilka różnych sposobów, ale nie wiemy, jaki był rzeczywisty przebieg wydarzeń.

Cząsteczkami, które musiały wtedy powstać, były nośniki informacji dziedzicznej – kwasy nukleinowe. Mamy tu nie lada zagadkę, gdyż dziś związki te powstają jedynie w żywych komórkach, przy udziale katalizujących reakcje enzymów białkowych, zaś białka mogą być zbudowane w komórce tylko dzięki przeniesieniu informacji przez cząsteczki DNA i RNA. Które molekuly pojawiły się wcześniej? Jak doszło do zamknięcia cyklu ich samopowieliania się? Obecnie przeważają poglądy, pośrednio wsparte

badaniami eksperymentalnymi, że pierwsza była cząsteczka RNA, zdolna do samoreplikacji (bez pomocy enzymu), a następnie doszło do sprzężenia z powielającą się cząsteczką białka; dobór naturalny, prowadzący do prebiotycznej ewolucji takich sprzężonych cykli, poprzedzał powstanie pierwszej komórki. Ale dopiero zamknięcie pewnych zbiorów cząsteczek w mikroskopijnych pęcherzykach, utworzonych przez związki tłuszczowe (takie struktury w odpowiednich warunkach mogą dość łatwo powstawać nawet abiotycznie), umożliwiło oddzielenie produktów i substratów reakcji, a zatem większą wydajność i stabilność reakcji, które możemy już nazwać metabolizmem. Tak mogła powstać prakomórka, przodek bakterii. Nadal jednak pozostaje niewyjaśnione, jak powstały cząsteczki RNA, a sam hipotetyczny scenariusz sprzęgania się kolejnych układów w prakomórkę jest zaledwie naszkicowany i tylko w niewielkim stopniu wsparty danymi eksperymentalnymi. W każdym razie nie natrafiono na dowody empiryczne, które wykluczałyby ten scenariusz.

Drugi początek: życie na zielono

Organizmy podobne do dzisiejszych bakterii pojawiły się na Ziemi niespełna 4 miliardy lat temu i przez dwa miliardy lat przejawy życia na Ziemi musiały być dość niepozorne: śluzowaty, bezbarwny (szary? brunatny? siny?) nalot na przybrzeżnych skałach, żółtawy (?), pienisty kożuch na mętnej wodzie płytkich zatoczek, czarny, mulisty osad na dnie oceanu. Niewiele wiemy na ten temat. Możemy się domyślać, że całkowita masa żywych organizmów była niewielka, bowiem ich ilościowy rozwój ograniczony był małym dopływem energii do ówczesnych ekosystemów, a to z kolei hamowało tempo krążenia życiodajnych pierwiastków. Organizmy cudzożywne (heterotrofy) jako substrat do wytwarzania własnych kopii brały inne żyjątka lub ich martwe szczątki; autotrofy same wytwarzały biomasę w drodze chemosyntezy – wykorzystując potencjał energetyczny, jaki istnieje pomiędzy niektórymi związkami chemicznymi azotu, siarki, żelaza, węgla lub wodoru. Podtrzymanie owego potencjału wymagało chemicznej regeneracji substratów, co odbywało się w dość powolnym tempie, dzięki procesom wulkanicznym i oddziaływaniu promieniowania słonecznego na atmosferę. Domyślamy się tego wszystkiego na podsta-

wie bardzo ubogich znalezisk paleontologicznych; więcej mówi geochemia: dane o składzie chemicznym skał i proporcjach izotopów w minerałach, a także molekularna analiza pokrewieństw między obecnie żyjącymi organizmami.

Takie właśnie dane dają wskazówkę, że około 2,5 miliarda lat temu miało miejsce wydarzenie, które dla większości form ówczesnego życia było katastrofą, dla innych, obecnie dominujących w biosferze, był to prawdziwy początek. Wtedy to Słońce zostało wprzęgnięte w kierat, w którym chodzi po dziś dzień, dostarczając ogromnych ilości energii życiu na Ziemi. Pojawiły się wówczas samożywne bakterie, podobne do dzisiejszych sinic, bezpośrednio wykorzystujące światło słoneczne do wytwarzania związków organicznych z dwutlenku węgla i wody. Od tej pory proces ten zasila w energię prawie wszystkie ekosystemy Ziemi i napędza szybki obieg pierwiastków. Dzięki temu możliwe było zwiększenie całkowitej ilości żywej biomasy, przyspieszenie procesów wzrostu, w sumie – zwiększenie tempa ewolucji i różnicowania się organizmów. Ale fotosynteza to nie tylko wytwarzanie materii organicznej z minerałów. Jej ubocznym produktem są ogromne ilości tlenu, gazu zabójczego dla organizmów. Te, które dziś żyją, oddychając zawierającym mnóstwo tlenu powietrzem lub zanurzone w nasyconej tlenem wodzie, mogą funkcjonować dzięki wyspecjalizowanym mechanizmom biochemicznym, chroniącym wrażliwą aparaturę molekularną komórek przed zabójczym działaniem tlenu. Przyczyną wielu chorób i śmierci organizmów (nie wyłączając człowieka) jest właśnie utrata zdolności do obrony przed agresywnym tlenem. Początek fotosyntezy oznaczał koniec niepodzielnego dawniej panowania beztlenowców od tej pory zepchniętych do marginalnych środowisk beztlenowych. Patentowanym wynalazkiem, który umożliwił fotosyntezę, była cząsteczka chlorofilu, zielonego białka. Chlorofil ma do tej pory monopol – nie znalazła się żadna inna cząsteczka, która mogłaby z nim skutecznie konkurować. Od dwóch i pół miliarda lat świat się zazielenił – przedtem nie było tu nic zielonego.

Trzeci początek: eksplozja różnorodności

Świat się wprawdzie zazielenił, ale przez następne niespełna dwa miliardy lat oprócz koloru mętnych zawieszin i śluzu na kamieniach z pozoru nic się nie zmieniło. Jednak ewolucja trwała

nadal – w tym okresie doszło do przełomowych wydarzeń, które z początku nie wpłynęły na stan całej biosfery i nie pozostawiły śladów kopalnych. Wyraźna zmiana nastąpiła dopiero około 600 milionów lat temu, kiedy to Ziemia (a właściwie należałoby powiedzieć: Ocean) zaroila się od niesamowicie różnorodnych form organizmów, różniących się planem budowy, wielkością ciała i sposobem życia. Pojawiły się wszystkie obecnie znane typy budowy zwierząt – od robaków po stawonogi, a nawet bliscy przodkowie kręgowców. Ogromnemu zróżnicowaniu gatunkowemu uległy też niepozorne, mikroskopijne pierwotniaki planktonowe. Wszystko to znalazło się w obfitym materiale kopalnym.

Przyczyny tej nagłej eksplozji nie są jasne i na pewno są złożone. Mogło ją wyzwolić jakieś wydarzenie natury geologicznej (nie wiemy jakie), zapewne istotną rolę odegrał fakt, że właśnie w tym czasie znacznie poprawiły się warunki powstawania trwałych skamieniałości (wiele organizmów zaczęło wytwarzać rozmaite szkielety). Z całą pewnością miało tu znaczenie skumulowanie się powolnych zmian środowiskowych (np. rosnące stężenie tlenu w atmosferze, zmiany klimatyczne) oraz nagromadzenie zmian ewolucyjnych u organizmów. Eksplozja różnorodności była zapewne przesunięta w czasie konsekwencją powstania komórki eukariotycznej i wyewoluowania rozrodu płciowego.

Wydarzenia ewolucyjne, które poprzedziły eksplozję kambryjską, nie pozostawiły śladów w zapisie kopalnym. O tym, co i kiedy się działo, możemy wnioskować dzięki porównawczym badaniom molekularno-genetycznym współczesnych organizmów. Około 2 miliardy lat temu, w drodze ścisłej symbiozy co najmniej dwóch różnych organizmów podobnych do bakterii, powstały organizmy eukariotyczne: komórki zawierające osobne jądro i organelle. Z takich właśnie komórek zbudowane są wszystkie „wyższe” rośliny i zwierzęta, ale także „niższe” organizmy: glony, pierwotniaki, grzyby. Organizmy bezjądrowe (prokarioty) istnieją nadal i mają się bardzo dobrze – to są, między innymi, wszystkie współczesne bakterie. Ale powstanie komórki eukariotycznej otworło drogę do wyewoluowania specyficznego sposobu rozmnażania się, rozrodu płciowego. Jego ważną cechą, odróżniającą od rozrodu przez klonowanie, jest zróżnicowanie genetyczne potomstwa: każdy osobnik dostaje losową kombinację genów obojga rodziców.

Niewątpliwie powstanie płci zapoczątkowało kolejną wielką zmianę oblicza biosfery. Rozród płciowy jest obecnie tak rozpowszechniony w przyrodzie, że przywykliśmy go uważać za coś oczywistego. A jednak dla biologów sukces ewolucyjny tego skomplikowanego sposobu rozmnażania jest jedną z największych zagadek. Patrząc wstecz na historię życia, łatwo dojść do przekonania, że to właśnie istnienie płci przyczyniło się do przyspieszenia ewolucji, a w szczególności do niebywałego wzrostu różnorodności gatunkowej. Samo pojęcie gatunku ma sens jedynie w odniesieniu do organizmów rozradzających się płciowo – bo gatunek to populacja osobników krzyżujących się wyłącznie między sobą. Z punktu widzenia szybkości wzrostu populacji, jej zdolności do przetrwania w zmieniającym się środowisku, słowem: biorąc pod uwagę szanse każdego gatunku, a także możliwość wyodrębnienia się nowych gatunków, rozród płciowy jest niewątpliwie korzystny. Ale to nie tłumaczy, w jaki sposób doszło do wyewoluowania tak szczególnego, skomplikowanego i kosztownego sposobu rozmnażania. Dobór naturalny to gra, która rozgrywa się wyłącznie pomiędzy osobnikami, a „dobro gatunku” – termin notorycznie spotykany w literaturze popularnej (nie mówiąc już o „dobru biosfery”) – to pojęcie sprzeczne z teorią ewolucji. Z pozorów każdemu osobnikowi opłacałoby się bardziej przekazywać swój genotyp następnemu pokoleniu poprzez rozród bezpłciowy (klonowanie) niż poprzez poszukiwanie odpowiedniego partnera w celu zmieszania genów. Skoro jednak płeć istnieje, to musi być ewolucyjny mechanizm przewyciężający tę trudność. W chwili, gdy to piszę, zagadka ewolucji płci wydaje się bliska rozwiązania. Zaproponowane hipotezy zmierzają zarówno do wyjaśnienia ekonomii tego zjawiska (co się komu bardziej opłaca), jak do wyjaśnienia sekwencji wydarzeń ewolucyjnych, które mogły doprowadzić do wykształcenia się tak skomplikowanego i precyzyjnie regulowanego procesu. Omówienie tych hipotez i wciąż istniejących wokół nich kontrowersji rozsądziłoby ramy tego artykułu. Warto jednak zwrócić uwagę na jeszcze jedną konsekwencję istnienia płci: jest nią nieuchronna, wpisana w strategię gatunku śmierć każdego osobnika. Bakterie, z których każda dzieli się na dwie komórki potomne, też umierają – ale jest to zawsze wydarzenie przypadkowe; każda dziś żyjąca bakteria jest połówką bakterii poprzedniego pokolenia, ta z kolei była połową swojej bakterii

macierzystej, i tak aż do prakomórki z praoceanu sprzed 4 miliardów lat. Świadczy to o tym, że przynajmniej niektóre bakterie nigdy nie umarły. Tymczasem organizm eukariotyczny żyje przez określony czas, produkując komórki rozrodcze, dające początek następnemu pokoleniu; komórki linii rozrodczej trwają, ale ich rodzice umierają.

Zapoczątkowany eksplozją kambryjską wzrost różnorodności gatunkowej biosfery trwa nadal. Dziś zamieszkuje Ziemię około 30 milionów gatunków, począwszy od bakterii po wieloryby i rajskie ptaki. Nawet nie wiemy, ile ich jest – potrafimy zidentyfikować kilka procent tej liczby. Skąd się biorą gatunki? U organizmów rozmnażających się płciowo o powstaniu nowego gatunku mówimy wtedy, gdy z populacji wyodrębnia się grupa osobników izolowanych rozrodczo: krzyżujących się między sobą, ale nie dających płodnego potomstwa z pozostałymi osobnikami populacji macierzystej (i wszystkich innych). Dochodzi do tego zazwyczaj wtedy, gdy macierzysta populacja ulega rozczłonkowaniu, w jej podzbiorach kumulują się zmiany spowodowane przez przypadkowe mutacje, przebrane przez filtr doboru naturalnego; kiedy oddzielone populacje znów się spotkają, okaże się, że osobniki już się nie krzyżują. Cały przebieg specjacji (bo tak nazywa się powstawanie nowych gatunków) – od podziału populacji macierzystej po uzyskanie izolacji rozrodczej – trwa zazwyczaj znacznie krócej niż późniejsze trwanie gatunku. Specjacja polega więc na rozgałęzieniu linii ewolucyjnej. Czasem zdarza się, że obie populacje nadal trwają, czasem populacja macierzysta szybko wymiera i pozostaje tylko gatunek potomny albo też wymierają gatunki potomne, a stary gatunek macierzysty trwa jako „żywa skamieniałość”.

U organizmów, które mnożą się tylko przez podział komórki, również dochodzi do przemian ewolucyjnych tak daleko idących, że obserwując dziś dwie spokrewnione formy, nie wahamy się zaliczyć je do rozmaitych gatunków. Tu również możemy mieć do czynienia z dychotomicznym podziałem populacji macierzystej na potomne, coraz bardziej się różniące, ale może to być stopniowa zmiana jednej linii ewolucyjnej. W każdym razie u organizmów bezpłciowych wyodrębnienie gatunków jest decyzją arbitralną, a ustalenie daty, kiedy gatunek powstał, może być tylko orientacyjne.

Dane paleontologiczne, zwłaszcza te, które dotyczą morskich planktonowych mikroorganizmów, są na tyle bogate, że pozwala-

ją oszacować tempo wymierania i tempo powstawania nowych gatunków przez cały okres ostatnich 600 milionów lat. Biorąc pod uwagę średni okres trwania gatunków i czyniąc dodatkowe założenia, obliczono, że średnie tempo wymierania mogło wynosić ok. 2,5 gatunku rocznie, a tempo specjacji – rocznie ok. 3 gatunki. Daje to pewnie pojęcie o skali zjawiska – choćby o tym, że średnio rzecz biorąc, zarówno wymieranie, jak powstawanie nowych gatunków jest zjawiskiem skrajnie rzadkim (średnio 2-3 gatunki na rok, kiedy równocześnie żyje ich około 30 milionów!). Ale liczby przeciętne źle oddają rzeczywistość, ponieważ ani tempo wymierania, ani tempo specjacji nie są równomierne. W pewnych momentach wydarzały się na Ziemi hekatomby masowych wymierań, po których następowały z reguły okresy wzmożonej specjacji, w ciągu kilkunastu milionów lat z nawiązką rekompensujące poprzednie straty. O ile koniec gatunku jest (przynajmniej teoretycznie) konkretnym, uchwytym wydarzeniem (umiera ostatni przedstawiciel), to początek gatunku rozciąga się na dziesiątki lub setki tysięcy lat i trudno ten moment zlokalizować.

Czwarty początek: inwazja na ląd

Wszystko, co wiemy o życiu na naszej planecie aż do okresu sylurskiego, który się zaczął około 435 milionów lat temu, dotyczy nie ziemi, lecz morza. Ląd oferuje organizmom łatwy dostęp do światła i do niezbędnych pierwiastków odżywczych – deficytowych w oświetlonych warstwach oceanu, ale do życia przede wszystkim potrzebna jest woda. Dzisiejsza bujna roślinność i bogactwo gatunków zwierząt lądowych mogą istnieć dzięki temu, że organizmy same zmieniły środowisko. Nagie skały pokryła gleba – wytwór organizmów. Dzięki glebie, utrzymującej wilgoć, korzenie roślin lądowych – nawet tych największych – nadal zanurzone są w wodzie, zawierającej pierwiastki odżywcze. **Inwazji lądu w okresie sylurskim dokonały konsorcja grzybów i glonów (żaden z tych organizmów zapewne sam nie dałby sobie rady).** Ten wyspecjalizowany tandem dokonał pierwszych zmian środowiska lądowego, „uczynił sobie ziemię poddaną”. Kolejno opanowywały ziemię nowe grupy organizmów. Także i dziś, kiedy gdzieś odsłoni się nagi, jałowy teren – wyrośnie z oceanu wulkaniczna wy-

spa albo cofający się lodowiec odkryje żwiry i piaski – następuje sukcesja organizmów (często pionierami również są konsorcja glonowo-grzybowe – porosty), stopniowo przybywa gleby, siedlisko wzbogaca się w składniki organiczne (wyprodukowane przez rośliny) i mineralne (wyplukane z podłoża). W naszych czasach, kiedy gatunki pionierskie, zdolne do zagospodarowania nowego terenu już istnieją i tylko gdzieś czekają na swoją szansę, proces sukcesji od nagiej skały do bujnego lasu może zająć mniej niż sto lat. Kiedy po raz pierwszy dokonywała się inwazja lądów, kolejni sukcesorzy musieli się dopiero wykształcić w drodze ewolucji. Zajął to miliony lat, ale był to początek nowej epoki. Dziś lądy, których powierzchnia stanowi zaledwie 1/3 powierzchni globu, produkują 2/3 biomasy roślinnej, a więc zużywają 2/3 dwutlenku węgla i produkują 2/3 tlenu całej biosfery. Na lądach zamieszkuje większość spośród 30 milionów gatunków roślin i zwierząt Ziemi (trzeba jednak przyznać, że nasza znajomość różnorodności gatunkowej oceanów jest niedostateczna). Teraz od ekosystemów lądowych zależy bilans pierwiastków, obieg wody, a nawet klimat całego globu.

Poprzez sylur, dewon, karbon i perm różnorodność biologiczna utrzymywała się na stałym poziomie mimo szeregu kolejnych załamań i odrodzeń. W faunie pojawiły się kręgowce lądowe: płazy, gady, potem gady ssakokształtne; drzewiasta roślinność osiągnęła niebywały rozkwit w karbonie, kiedy to pojawiły się też pierwsze owady. Koniec ery paleozoicznej nastąpił 225 milionów lat temu, na przełomie permu i triasu, i była to największa katastrofa w dziejach życia na Ziemi.

Początek piąty i szósty: dwa odrodzenia

Ocenia się, że wielkie wymieranie pod koniec permu pochłonęło większość żyjących wówczas gatunków. Nie wiemy, co spowodowało ten kataklizm i nie ma tu miejsca na rozważanie wszystkich hipotez – od katastrofy kosmicznej, poprzez zmianę klimatu, ruch kontynentów, po wzmożony wulkanizm i rozmaite kombinacje tych czynników. Wiadomo jednak, że po tej zagładzie nastąpiła kolejna eksplozja różnorodności gatunkowej, następny wielki początek. Odszedł świat ery paleozoicznej. Chociaż życie zachowało ciągłość, chociaż wiele form życiowych przetrwało, to jed-

nak oblicze Ziemi się zmieniło. Starożytną florę i faunę paleozoiku zastąpiła flora i fauna mezozoiku – paleobiologicznego średniowiecza. Ta zmiana musiała być widoczna. Mimo wysiłku dziewiętnastowiecznych malarzy-pejzażystów, którzy z inspiracji ówczesnych paleontologów odtwarzali dewońskie krajobrazy, oraz dzisiejszych grafików komputerowych, którzy sugestywnie ożywiają świat dinozaurów w filmach fabularnych, nigdy nie będziemy wiedzieli, jak naprawdę wyglądał, jak pachniał i jak szumiał świat paleozoiczny, a jak – mezozoiczny. Przez następne miliony lat wydarzały się kolejne epizody mniej już gwałtownych wymierań i następujące po nich kolejne, „małe” początki, aż wreszcie 65 milionów lat temu znowu nastąpiła wielka katastrofa, koniec świata dinozaurów. Tym razem już wiemy, że bezpośrednią przyczyną był upadek asteroidy. Chociaż katastrofa nie była aż tak głęboka jak poprzednia, to jednak oblicze Ziemi znowu bardzo się zmieniło: nadeszła era kenozoiczna, z jej charakterystyczną florą i fauną (podobną już do współczesnej). To był następny wielki początek, którego nadejście z całą pewnością zależało od przypadku. Gdyby nie kosmiczna katastrofa, być może inaczej potoczyłyby się dzieje. Gdyby nie nos Kleopatry...

Człowiek: koniec ewolucji czy siódmy początek?

Mamy dziś schyłek drugiego tysiąclecia po narodzeniu Chrystusa, dobiega końca 65. milion lat ery kenozoicznej. Około 200 tysięcy lat temu pojawił się nasz gatunek, *Homo sapiens*, od około 40 tysięcy lat przejawiający wyraźną aktywność cywilizacyjną i tworzący kulturę. Ale już od prawie 2 milionów lat nasi przodkowie dysponowali nadzwyczaj silnie rozwiniętym mózgiem; od ponad miliona lat wytwarzali kamienne narzędzia; około 700 tysięcy lat temu zaczęli się posługiwać ogniem, to znaczy wykorzystywali zewnętrzne (a nie tylko pokarmowe) źródła energii. Ta energetyczna zachłanność jest charakterystyczna dla naszego gatunku. Swoje istnienie zawdzięcza on niewątpliwie drugiej energetycznej rewolucji w historii życia na Ziemi (pierwszą było pojawienie się fotosyntezy), a mianowicie wynalazkowi ciepłokrwistości.

Nie wiemy dokładnie, kiedy to się stało, zapewne około 60 milionów lat temu. Przedmiotem badań jest wciąż kwestia, jak do tego doszło. Z punktu widzenia mechanizmów ewolucji pojawia-

nie się zwierząt ciepłokrwistych nie było **wielkim wydarzeniem**. Ot, wyspecjalizowana adaptacja fizjologiczna, jak wiele innych. Ale kiedy spoglądamy wstecz na **historię życia na Ziemi**, możemy powiedzieć, że coś ważnego się wtedy zaczęło. Ciepłokrwistość – termin niepotrzebnie wyrugowany z języka fizjologii – lepiej oddaje istotę rzeczy od oficjalnej „stałocieplności” czy „endotermii”. Ciepłokrwiste zwierzęta ani nie mają całkiem stałej ciepłoty ciała, ani wewnętrzna produkcja ciepła (endotermia) nie jest jedynym sposobem na jej utrzymanie. Istota rzeczy polega na tym, że zwierzęta ciepłokrwiste utrzymują względnie stałą, wysoką temperaturę ciała, niezależnie od temperatury otoczenia. Wysoka temperatura ciała to możliwość przyspieszenia procesów metabolicznych, a zatem zwiększenia tempa przetwarzania energii; w sensie fizycznym – osiągnięcie większej mocy. Stałe utrzymywanie wysokiej temperatury ciała daje gotowość do rozwinięcia tej mocy w każdej chwili, aby wykonać jakąś pożyteczną pracę, jak pogoń, ucieczka czy opieka nad potomstwem, niezależnie od zmieniających się warunków środowiskowych. Utrzymanie tej gotowości zwiększa o rząd wielkości przeciętne zużycie energii. Ale zwiększona moc tak bardzo podnosi wydajność pobierania i trawienia pokarmu, że straty pokrywane są z dużą nawiązką.

W historii życia na Ziemi zanotowano kilka prób zapoczątkowania takiej właśnie życiowej strategii; zapewne próbowały jej trójstopniowe gady ssakokształtne i niektóre jurajskie dinozaury. Sukces, który nastąpił już po kosmicznej katastrofie na przełomie kredy i trzeciorzędu, odniosły dwie grupy kręgowców: ssaki i ptaki. Dla tych ostatnich duża moc, osiągnięta dzięki wysokiej temperaturze ciała, stała się prerekwizytem zdolności do lotu; te pierwsze wysokiej temperaturze ciała zawdzięczają niebywałe udoskonalenie systemu nerwowego, a w szczególności mózgu. Jedne i drugie zdołały opanować większość środowisk na Ziemi.

Ciepłokrwistość była więc warunkiem wstępnym rozwoju mózgu, bez niej nie byłoby mowy o wyewoluowaniu ssaków naczelnych i człowieka. Tym, co zadecydowało o dalszym przyspieszonym rozwoju, był rozwój mowy – sprzężenie zwrotne ewolucji biologicznej i kulturowej; fascynujący, ale najtrudniejszy temat dociekań dla biologów ewolucyjnych, antropologów i historyków kultury, bo każdy z nich, chcąc nie chcąc, musi się zapuścić na teren obcej dla siebie dziedziny nauki.

Uznanie naszego gatunku za wyjątkowy to nie tylko antropocentryczna megalomania. Rzeczywiście, człowiek jest gatunkiem **niezwykłym**. Jego sukces przejawia się **niebывалым** wzrostem **liczebności populacji** (nadal zachowujemy się jak kolonia bakteryjna na sztucznej pożywce, w początkowej, **wykładniczej** fazie **wzrostu**). **Już** obecnie liczebność naszego gatunku, a także jego **biomasa**, osiągnęła rozmiary rekordowe **w skali biosfery**. **Osobniczy budżet energetyczny**, to znaczy ilość **energii** przeciętnie zużywanej na utrzymanie się przy życiu i **wydatki** potomstwa, **przekracza** dziesięciokrotnie wartości **typowe** dla **zwierząt stałocieplnych** podobnych rozmiarów, a **więc** ponad **stukrotnie** więcej, niż potrzeba do życia organizmowi **zmiennoocieplnemu**. Wszystko to decyduje o **niespotykanie** silnym **wplywie** pojedynczego gatunku na całość biosfery. **Z** drugiej strony, **wplywu** tego nie należy przeceniać. **W biosferze** cały czas dzieją się rzeczy o skali czasowej, do której **nijak** się mają nasze tysiąclecia; bakterie w swojej masie bardziej **wplywają** na globalny obieg pierwiastków i klimat planety niż wszyscy ludzie, wraz ze swymi fabrykami, samochodami i samolotami naddźwiękowymi.

Paleoekologia uczy nas, że w ciągu miliardów lat życie na Ziemi przeżywało głębokie kryzysy, po czym się odradzało. Trwająca kilkadziesiąt tysięcy lat historia cywilizacji też obfitowała w dramatyczne wydarzenia: jedne kultury zastępowały inne, wskutek bezpośredniego konfliktu albo z powodu zmian w środowisku (część **tych** zmian spowodowali sami ludzie, ale inne były od nich **niezależne**). Pojęcie renesansu, rozpoczynania wszystkiego **jeszcze** raz **od początku**, znamy przede wszystkim z naszej własnej historii. **Czy** teraz też mamy się spodziewać kolejnego kryzysu i **nowego** **początku**? Skala czasu historii ludzkości jest śmiesznie mała w **porównaniu** ze skalą czasu trwania życia na Ziemi, a energia, **jaką** **ludzkość** dysponuje – tak znikoma, że można wątpić, czy **obecność** i **dokonania** gatunku *Homo sapiens* da się w ogóle **porównywać** z **prawdziwie** wielkimi wydarzeniami w historii biosfery, jak **wytworzenie** tlenu czy upadek asteroidy. Być może rolę potencjalnego **sprawcy** kolejnego kryzysu życia na Ziemi przypisujemy sobie na skutek **nieuważnej** lektury nie tylko tekstów naukowych, ale i objawionych. Apokalipsa jest **wszak** **wizją** początku, a nie końca.

Przypadek czy konieczność?

Śledząc przebieg wydarzeń w ewolucji życia na Ziemi, widzimy przełomowe wydarzenia, punkty zwrotne, po przekroczeniu których nic już nie było takie jak dawniej. Jedne z nich były etapami w konsekwentnym przebiegu ewolucji – o nich pisali John Maynard Smith i Eörs Szathmáry³. Inne – jak się wydaje – są wynikiem wydarzeń przypadkowych, zewnętrznych dla biosfery, takich jak katastrofy kosmiczne. Nie zawsze wydarzenia te są niezależne, często nie potrafimy dobrze odróżnić jednych od drugich. Najważniejsze pytanie brzmi: czy zaburzenie zewnętrzne (albo nawet spowodowane nagromadzeniem przyczyn wewnętrznych) przestawia życie na dowolną, przypadkową trajektorię, czy też wraca ono uporczywie do swojej z góry wyznaczonej koleiny? Jest to jeden z fundamentalnych problemów biologii, pytanie o determinizm. Fascynuje uczonych i szeroką publiczność, skłania podatników do poświęcania milionów na badania kosmiczne.

Czy życie na Ziemi musiało powstać? Czy musiało powstać w tej postaci? Czy cały tok ewolucji był zdeterminowany? Co stałoby się, gdyby co jakiś czas nie przerywały go zaburzenia – katastrofy kosmiczne, tektoniczne, klimatyczne albo gdyby zaburzenia występowały częściej, w innych momentach? Czy musiała wzrastać liczba gatunków, czy musiały się pojawiać gatunki o coraz wyższych budżetach energetycznych? Czy nieuchronny był rozwój systemu nerwowego, mózgu, inteligencji, czy musiała powstać mowa, a potem kultura i cywilizacja? Jeżeli tak, to czy to jest przypadek, czy konieczność, że jesteśmy ssakami, a nie inteligentnymi ptakami albo cywilizowanymi dinozaurami? Najłatwiej na takie pytania odpowiadać autorom książek *science-fiction*, co zresztą chętnie czynią. Dużą swobodę mają też filozofowie, oddający się spekulacjom. Ale pytanie o determinizm ewolucji życia może być skierowane również do przyrodników.

A zatem: przypadek czy konieczność? Przypadek! – odpowiada Jacques Monod⁴. Konieczność! – nie wątpi Christian de Duve⁵.

³ John Maynard Smith, Eörs Szathmáry, *op. cit.*

⁴ Jacques Monod, *Przypadek i konieczność. Esej o filozofii biologii współczesnej*, tłum. Jędrzej Bukowski, Biblioteka Głosu, Warszawa 1979.

⁵ Christian de Duve, *op. cit.*

Życie jest wszędzie w Kosmosie i stamtąd zainfekowało Ziemię – napisał przed wielu laty Svante Arrhenius, dziś to samo głosi Fred Hoyle. Ba, życie nie tylko pochodzi spoza Ziemi, ale zostało celowo przeszczepione – twierdzi Francis Crick. Wszyscy wymienieni autorzy to wielcy uczeni, laureaci Nagrody Nobla. Spośród nich tylko Monod był biologiem. Arrhenius, de Duve – to chemicy, Crick i Hoyle są fizykami. Żaden z nich sam nie zajmował się badaniem początków życia i procesu ewolucji, ani eksperymentalnie, ani w drodze systematycznych analiz teoretycznych. By wniknąć w samo sedno zasadniczej kontrowersji, przyjrzyjmy się dwu skrajnym stanowiskom: deterministycznemu de Duve'a i indeterministycznemu Monoda. Monod traktuje powstanie życia jak indywidualny przypadek w klasie zjawisk, dla których można określić prawdopodobieństwo, czyli przewidzieć, jakie zdarzenia mogą się wydarzyć, ale nie można określić, jakie konkretne wydarzenie będzie miało miejsce w określonym momencie. Skoro życie powstało tylko raz – prawdopodobieństwo *a priori* jego powstania było prawie zerowe. Nieprzyjemny z tego wniosek jest taki, że ani powstanie życia, ani pojawienie się człowieka, nie było niczym zdeterminowane: „Wszechświat nie był brzemienny w życie, biosfera nie nosiła w sobie człowieka. Nasz numer padł w grze w Monte Carlo. Cóż w tym dziwnego, że podobnie jak ktoś, [kto] wygra tam miliard, odczuwamy niezwykłość naszego losu?”⁶

Prawdopodobieństwo, że materia ożyje, można by określić *a posteriori*, mając do dyspozycji zbiór zdarzeń, wśród których trafiałoby się powstawanie życia. Skoro jednak znamy tylko jeden taki przypadek, zdaniem wielu uczonych nie możemy o niczym rozstrzygać – ani negatywnie (jak Monod), ani pozytywnie (jak de Duve).

Zdaniem Christiana de Duve'a życie jest procesem deterministycznym. Nie ma miejsca na „szczęśliwe przypadki”. Nawet przetwarzanie informacji – proces na pozór unikatowy w skali wszechświata – jest deterministyczną, nieuchronną konsekwencją właściwości materii, która w danych warunkach uległa komplikacji. Przypadek – owszem, działa, ale tylko w ramach bardzo wyraźnych ograniczeń. Materia organiczna, tj. po prostu związki węgla, są ogromnie pospolite w przestrzeni kosmicznej (stanowią 20%

⁶Jacques Monod, *op. cit.*

pyłu międzygwiazdowego). To musi zaowocować zwiększeniem komplikacji i w końcu powstaniem życia – wszędzie, gdzie się da. De Duve pisze wręcz: „Kosmos jest życiem, z niezbędną infrastrukturą dookoła; tryliony biosfer wytworzonych i utrzymywanych przez resztę wszechświata”⁷. De Duve formułuje tezę o „ograniczonym przypadku” na wszystkich etapach ewolucji, od chemicznego po neurobiologiczny, ale nakłada ograniczenia tak mocne, że w efekcie pozostaje czysty determinizm. Z tego determinizmu – jego zdaniem – nieuchronnie wynika konwergencja, to znaczy upodobnienie form życia, w tym także – konwergencja bytów inteligentnych w skali kosmicznej. Jest więc przekonany o istnieniu wielu innych inteligentnych gatunków we wszechświecie. Jak się wydaje, postawa deterministyczna jest bardziej rozpowszechniona. Wybieramy ją intuicyjnie, bo daje nam komfortowe poczucie porządku, konieczności, sensu. Indeterminizm poraża swoim chłodem i pustką. Nic dziwnego, że Jacquesowi Monodowi tak blisko do filozofii Camusa.

Czy wybór jednej z postaw może wesprzeć nauka? Empirycznym dowodem zdeterminowania procesów ewolucji jest istnienie konwergencji. Znamy wprawdzie tylko jeden przebieg ewolucji, ale jej tok rozgałęział się wielokrotnie na równoległe strumienie (np. po rozdzieleniu kontynentów), zapętlął się (powtarzanie podobnych sekwencji wydarzeń). Obecnie prowadzi się nawet kontrolowane eksperymenty ewolucyjne w mikroskali. Ścisła determinacja procesów ewolucyjnych powodowałaby powstawanie podobnych lub identycznych form (organizmów, biocenoz). Rzeczywiście, znamy wiele takich przykładów – przytaczają je liczne podręczniki biologii. Choćby taki, że wśród awifauny Starego i Nowego Świata występują gatunki ptaków uderzająco podobne morfologicznie, zajmujące identyczne nisze ekologiczne na przykład mucholówek czy nektarodajów, a jednak o zupełnie odrębnej pozycji taksonomicznej – będące więc wynikiem niezależnej ewolucji. Podobne warunki zdeterminowały przebieg ich ewolucji, podobne w najdrobniejszych szczegółach. Z drugiej strony jednak nie we wszystkich lasach świata żyją ptaki zajmujące nisze dzięciołów – a zatem to, że w pewnych rejonach ta bogata w gatunki grupa ptaków odniosła wyraźny sukces ewolucyjny, a w innych wcale jej

⁷Christian de Duve, *op. cit.*

nie ma, to wynik przypadku. Wiele takich danych skłania nas do przyjęcia ostrożnie sformułowanego wniosku o ograniczonym zeterminowaniu ewolucji.

Jak dotąd nie mamy żadnych danych o konwergencji procesów powstawania życia. Być może fizycy zdołają kiedyś określić, czy i w jakich warunkach deterministyczne (wynikające z praw fizyki) przemiany chemiczne mogą doprowadzić do zapoczątkowania procesu doboru naturalnego. Wątpliwe jest jednak, by dało się *a priori* wyznaczyć prawdopodobieństwo, że dobór naturalny między molekułami doprowadzi do takiego sprzężenia struktur i procesów, które zdecydowałibyśmy się nazwać życiem. Czy można *a priori* zdefiniować klasę zjawisk (procesów), do których ten termin odnosilibyśmy bez wahania? Jeżeli znajdziemy nawet życie poza Ziemią, zawęzi to nasz zestaw hipotez, ale rozstrzygnięcia nie przyniesie. Wielu badaczy podkreśla, że trajektorie ewolucji są niepowtarzalne. Nie ma więc powodu zakładać, że immanentne cechy materii doprowadzą do powstania życia, tym mniej – do powstania istot rozumnych. Amerykański ekolog Jared Diamond⁸ wyraził nawet zadowolenie z tego, że prawdopodobnie nie natkniemy się nigdy na inne inteligentne istoty we wszechświecie, bowiem prześledzenie historii naszego gatunku utwierdziło go w przekonaniu, że spotkanie cywilizacji na różnym stopniu rozwoju zawsze się kończy eksterminacją jednej z nich; nie wiadomo, czy to akurat my byśmy wygrali.

JANUARY WEINER, ur. 1947, prof. dr hab., członek-korespondent PAU i PAN, profesor w Instytucie Biologii Środowiskowej UJ; publikuje w międzynarodowych specjalistycznych czasopismach naukowych, jest także autorem podręczników, prac popularnych, recenzji, esejów z zakresu ekologii i biologii ewolucyjnej.

⁸Jared Diamond, *Trzeci szympan*, PIW, Warszawa 1996.