

ANDRZEJ B. LEGOCKI\*

## Hipotezy i dylematy na temat powstania i unikatowości życia

Wybitny genetyk i filozof francuski Jacques Monod (1910–1976) napisał kiedyś, że gdyby ewolucja na Ziemi odbyła się raz jeszcze od początku, to najprawdopodobniej prowadziła by ona do zupełnie innej formy życia. Wskazał w ten sposób na rolę przypadku w długim szlaku budowania złożoności fenomenu życia, której ramy wyznaczyły chemiczne właściwości węgla – centralnego pierwiastka przyrody ożywionej.

Węgiel powstaje w gwiazdach. Proste pierwiastki takie, jak wodór i hel, stanowiące 99,999% materii Wszechświata, narodziły się w pierwszych minutach jego ekspansji. Z upływem miliardów lat, wodór i hel młodego Wszechświata ulegały spalaniu we wnętrzach gwiazd, prowadząc do powstania cięższych pierwiastków „biologicznych”, takich jak węgiel, tlen, azot i fosfor. Kiedy gwiazdy docierały do kresu swego trwania i eksplodowały, ich komponenty rozpraszały się w przestrzeni kosmicznej. Pozostałości po nich z czasem kondensowały w chmury zagęszczającej się materii, zapoczątkowując w ten sposób tworzenie planet. Procesy te zajmować musiały miliardy lat. Taki scenariusz odsłania najbardziej bodaj tajemniczą właściwość Wszechświata. Ukazuje mianowicie, dlaczego musi on trwać aż miliardy lat, ażeby mógł w nim pojawić się choćby najmniejszy przyczółek życia.

Mimo ogromnego postępu zachodzącego we wszystkich dziedzinach nauk przyrodniczych nie udało się dotąd jednoznacznie wyjaśnić, w jaki sposób doszło do abiogenezy, czyli powstania na naszej planecie fenomenu życia z materii nieożywionej. Nie było to zapewne jednostkowe wydarzenie, lecz wieloetapowy proces ewolucyjny, w którym formowały się układy o coraz wyższej złożoności. Powstało szereg możliwych scenariuszy pojawienia się życia, opartych na prawach fizyki oraz chemicznych właściwościach związków organicznych. Na podstawie tych przesłanek oraz zachowanych skamieniałości paleontologicznych naszkicowane zostały hipotezy domniemanego przebiegu wczesnych etapów pojawienia się życia na Ziemi. Określono także przypuszczalne właściwości środowiska, w którym mogło ono wtedy w ogóle zaistnieć. Były one zasadniczo różne od tych, które obecnie panują na Ziemi.

Złożoność oraz nieogarniona wprost różnorodność form życia powodują, że żadna definicja tego fenomenu nie ogarnia wszystkich naraz jego atrybutów. Panuje na ogół

---

\* Prof. dr hab. Andrzej B. Legocki (legocki@ibch.poznan.pl), członek rzeczywisty PAN, Instytut Chemii Bioorganicznej PAN

zgodność, że wszystkie żywe organizmy wyróżnia od układów nieożywionych kilka podstawowych cech, do których trzeba zaliczyć:

- zdolność do autoreplikacji, to znaczy możliwość powielania pierwotnych informacji strukturalnych, umożliwiającą zachowanie ciągłości ich przekazu,
- zdolność do przetwarzania różnych form energii oraz samodzielne prowadzenie przemian (metabolizmu) obejmujących cztery główne rodziny makrocząsteczek biologicznych: białka (enzymy), kwasy nukleinowe (samoreplikujący DNA oraz RNA), lipidy (tłuszcze, ściany komórkowe) oraz węglowodany (cukry, celuloza),
- podatność na zmienność oraz zdolność do trwałego przystosowania się do różnorodnych warunków środowiska,
- hierarchiczną i złożoną architekturę budowy.

Jedną z podstawowych cech wszystkich organizmów żywych jest zdolność do utrzymania ciągłości życia pomimo śmierci pojedynczych osobników, a nawet wymierania całych gatunków. Ten atrybut życia wynika z uniwersalności reguł przyrody oraz zasady monofiletycznego pochodzenia wszystkich żywych organizmów, które – jak się dzisiaj przyjmuje – pochodzą od wspólnego przodka.

Głównym celem dociekań biologicznych jest poznawanie złożoności świata ożywionego oraz jego różnorodności. Mimo iż budowa wszystkich komórek, a więc podstawowych składowych każdego żywego organizmu, jest uderzająco do siebie podobna, przyroda zdołała wykształcić w ciągu miliardów lat ewolucji zadziwiająco różnorodność organizmów. Nadaje ona każdemu wyższemu organizmowi niepowtarzalną unikalność.

Jeśli idzie o hipotezy na temat zaistnienia życia na naszej planecie, to jedna z nich, bodaj najpopularniejsza z obecnie rozważanych koncepcji zakłada, że życie pojawiło się na Ziemi samoistnie, w wielu etapach, w wyniku zdolności cząsteczek chemicznych do samoorganizowania się. Procesy te zostały zapoczątkowane krótko po uformowaniu się planety. Najpierw, w warunkach wczesnej Ziemi, w wyniku zajścia reakcji chemicznych pomiędzy prostymi związkami nieorganicznymi, doszło do utworzenia związków organicznych. Po upływie milionów lat stały się one strukturalnymi elementami prakomórek, umożliwiając powstanie związków makrocząsteczkowych oraz pojawienie się funkcjonalnych przemian metabolicznych.

Inną koncepcją pojawienia się życia na Ziemi jest teoria panspermii oparta na hipotetycznych scenariuszach egzobiologii, która została sformułowana przez chemika szwedzkiego Svante Arrheniusa (1859–1927) na początku XX wieku i lansowana później przez uczonych brytyjskich Francisca Cricka (1916–2004) i Freda Hoyle'a (1915–2001). Zakładała ona, że pierwsze prymitywne formy życia przywędrowały do nas ze Wszechświata. Teorii tej nie da się całkowicie wykluczyć, choć trudno się do niej bardziej szczegółowo odnieść, ponieważ przenosi ona problem powstania załączków życia z Ziemi na inne planety.

Początkowa trudność w akceptowaniu hipotezy panspermii wynikała między innymi z małego prawdopodobieństwa przetrwania organizmów żywych w przestrzeni międzygwiazdnej. W roku 2014 NASA zdołała jednak wykazać, że plazmidy (koliste cząsteczki pozachromosowego DNA) są w stanie przetrwać lot kosmiczny na powierzchni rakiety, a nawet wytrzymać najbardziej krytyczny moment wejścia rakiety w atmosferę. Ponadto udowodniono, że przetrwalniki bakterii przeżywają na wysokości kilkudziesięciu kilometrów w bardzo rozrzedzonej atmosferze. Innym, pośrednim argumentem jest niedawna sugestia badaczy francuskich, iż przewaga aminokwasów lewoskrętnych w białkach organizmów żywych, z jaką mamy do czynienia na Ziemi, może być związana ze zjawiskiem kołowej polaryzacji światła nowo tworzących się gwiazd, co miałyby uprawdopodobniać hipotezę panspermii.

Trzecia wreszcie, zupełnie odmienna od poprzednich koncepcja, ma charakter metafizyczny. Zakłada ona, że podstawą pojawienia się fenomenu życia był nadprzyrodzony akt stwórczy, którego nie da się opisać przy pomocy znanych praw fizyki i chemii. Teoria ta przeniosła problem powstania życia do sfery wiary, a więc obszaru pozanaukowego.

Punktem wyjścia ugruntowanej wśród współczesnych przyrodników, pierwszej z wymienionych wyżej koncepcji, jest hipoteza, że pojawienie się najwcześniejszych etapów uformowania się łańcucha życia nastąpiło w wyniku reakcji chemicznych, które wyznaczyła budowa atomowa i reaktywność kilku pierwiastków. Reakcje te doprowadziły do pojawienia się związków organicznych z najprostszych cząsteczek nieorganicznych. Te zaś w wyniku długotrwałych przemian stały się następnie osnową makrocząsteczek oraz całej złożonej maszynierii życia.

O tym, że wodór i hel były pierwszymi pierwiastkami, które pojawiły się po Wielkim Wybuchu, astrofizycy wiedzieli już od dawna. W związku z tym zadawano sobie pytanie, czy możliwe było połączenie obu tych pierwiastków wiązaniem chemicznym w ówczesnych ekstremalnych warunkach, które zasadniczo różniły się od współcześnie panujących na Ziemi. Tutaj bowiem hel, najprostszy „gaz szlachetny”, nie wykazuje żadnej reaktywności chemicznej. W warunkach Wielkiego Wybuchu i uwolnienia niewyobrażalnych ilości energii mogło jednak dochodzić do interakcji cząstek subatomowych prowadzących do tworzenia związków chemicznych, które w normalnych warunkach ziemskich nie mogą powstać. W roku 2019 astrofizykom udało się po raz pierwszy w odległej mgławicy planetarnej NGC 7027, będącej pozostałością po wypalanej gwiazdzie w gwiazdozbiorze Łabędzia, zidentyfikować od dawna poszukiwaną cząsteczkę wodorku helu ( $\text{HeH}^+$ ). Ten dwuatomowy związek mógł być pierwszym, a więc najstarszym związkiem chemicznym, w rodzącym się Wszechświecie.

Życie na Ziemi opiera się na dostępności wody oraz chemicznej reaktywności węgla. Warunkują je także specyficzne właściwości geochemiczne i klimatyczne naszej planety.

Proste związki organiczne wykrywane są również w śladowych ilościach w pozaziemskich obiektach Wszechświata; w asteroidach, meteoroidach oraz pyłe międzygwiazdowym. Śladów tych nie można jednak traktować jako indykatorów życia teraźniejszego ani też reliktyw życia przeszłego. Obecność tych związków w przestrzeni pozaziemskiej oznacza jedynie, iż gdzieś we Wszechświecie wystąpiły warunki sprzyjające utworzeniu materii organicznej z prostych związków nieorganicznych. Jednak od tych związków do wykształcenia zorganizowanych form życia wiedzie niemal nieskończenie długi łańcuch zdarzeń, którego każde ogniwo może zaistnieć jedynie z niezwykle małym prawdopodobieństwem. Nawet jeśli zdarzenia te rozpatruje się w astronomicznej skali czasu. Być może więc występowanie życia na Ziemi jest zjawiskiem unikatowym dla całej naszej galaktyki Drogi Mlecznej.

Ziemia powstała jako część tworzącego się w tym samym czasie Układu Słonecznego, uformowanego z zagęszczającego się obłoku gazów i pyłów kosmicznych, z którego wyłoniły się protoplanety. Jedną z nich przekształciła się 4,54 mld lat temu w naszą Ziemię. Skalne planety, takie jak Ziemia, po uformowaniu weszły w okres Wielkiego Bombardowania, w którym spadały na nie meteoryty, asteroidy oraz kawałki skał. Dotychczas przyjmowano, że ten okres, który zakończył się ok. 3,9 mld lat temu, może wyznaczać granicę pojawienia się załazków życia, ponieważ nawet jeśli one mogłyby wówczas się pojawić, zostałyby natychmiast zniszczone w ekstremalnie abiotycznych warunkach.

W roku 2017 międzynarodowy zespół badaczy doniósł o odkryciu skamieniałych mikroorganizmów w żelazistych skałach osadowych składających się na otwory hydrotermalne pradawnego oceanu w pasie Nuvvuagittuq w Kanadzie. Wiek tych osadów oszacowano na 4,28 mld lat, co wskazywałoby na pojawienie się aktywności biologicznej oraz gromadzenie się biomasy wkrótce po utworzeniu oceanów 4,41 mld lat temu, a więc jeszcze w trakcie trwania Wielkiego Bombardowania. Pewnym potwierdzeniem hipotezy, że abiogeneza mogła wtedy istotnie mieć swój początek w pobliżu oceanicznych otworów hydrotermalnych, jest fakt, iż spetryfikowane struktury najstarszych drobnoustrojów mają identyczną budowę jak skamienieliny współcześnie wykrywane w okolicach podmorskich wulkanów.

Za najstarsze lądowe, utrwalone przejawy życia na Ziemi uważa się stromatolity, wapienne złoża biosedymentacyjne powstałe z jednokomórkowych nitkowatych sinic porastających dna zbiorników wodnych. W okresie wyłaniania się pierwszych kontynentów i tworzenia się płytkich szelfów morskich tworzyły one warstwy, na których stopniowo osiadał muł węglanowy. Spetryfikowane maty skamieniałych drobnoustrojów znaleziono w wielu różnych miejscach Ziemi, m.in. w południowo-zachodniej Grenlandii (datowane na 3,7 mld lat) i Zachodniej Australii (3,48 mld lat). Współczesne stromatolity powstają w ciepłych i silnie zasolonych zatokach morskich. Znane są także pokłady

prekambryjskich onkoidów – złóż osadów sinicowych otoczonych przez warstwy soli węglanowych. Występują one także w Polsce, w Górach Świętokrzyskich i Tatrach.

Podjęcie badań nad początkami życia jest w gruncie rzeczy poszukianiem istoty zjawiska dziedziczności związanej z wyłonieniem się pierwszych mechanizmów replikacyjnych, a więc kluczowych reakcji dla utrwalenia struktury pierwotnej poprzez tworzenie jej kolejnych kopii. Aby mechanizm replikacji mógł zacząć działać, następujące po sobie rundy kopiowania muszą odnosić się zawsze do wyjściowej cząsteczki, a nie do pojawiających się mutantów, powstałych w wyniku błędnego kopiowania. W łańcuchu życia zaistnienie pierwszej reakcji replikacji było bez wątpienia zdarzeniem o znaczeniu przełomowym.

Niektórzy badacze uważają, że zjawisko replikacji chemicznej ma cechy procesu samoregulującego, a udział w nim wzięły losowo powstałe cząsteczki chemiczne o właściwościach szczególnie sprzyjających temu procesowi. Pojawiły się one w pierwotnym bulionie wczesnej Ziemi w wyniku spontanicznych oddziaływań pomiędzy organicznymi produktami pierwszych syntez abiotycznych. Być może cały proces był wspomagany katalitycznie. Jak wiadomo, w przyrodzie niemal wszystkie reakcje biochemiczne oraz większość oddziaływań molekularnych przebiegają przy udziale katalizatorów. Te zaś, same nie uczestnicząc w przemianach, umożliwiają optymalne dopasowanie się substratów dla zajścia danej reakcji. W trakcie ewolucji cechy niezwykle sprawnych katalizatorów nabyły białka. W czasie pojawiania się pierwszych załączków replikowania, kiedy nie było jeszcze białek, funkcje katalityczne mogły pełnić nieorganiczne kompleksy mineralne znajdujące się w glebie.

Drugą, uniwersalną i równie ważną jak zdolność do replikacji cechą systemów żywych jest możliwość kontrolowania reakcji chemicznych składających się na ciągi metaboliczne, od których zależne są wszystkie procesy fizjologiczne. Można zastanawiać się, która z tych właściwości pojawiła się pierwsza. Niektórzy badacze uważają, że to właśnie metabolizm pojawił się pierwszy przed replikacją. Choć w takim przypadku mogłyby pojawić się trudności z utrwaleniem jego przebiegu.

Pierwsze teorie na temat powstania życia pochodzą z lat 20. XX wieku. Ich autorami byli biochemik angielski John B.S. Haldane (1892–1964) oraz biolog rosyjski Aleksander Oparin (1894–1980). Obaj reprezentowali pogląd, że załączkiem życia było pojawienie się prostych reakcji chemicznych w środowisku redukcyjnym „pradawnej zupy”. W swojej książce *The Origin of Life* Oparin postulował, że życie wyłoniło się spontanicznie, przy czym w ślad za cząsteczkami organicznymi pojawiły się agregaty nadcząsteczkowe – zawiesiny koacerwatów, mające zdolność do łączenia się ze sobą lub rozszczepiania na kropelki potomne. Mogły to być zatem twory wykazujące się zdolnością do uczestniczenia w pierwotnych oddziaływaniach fizycznych, a następnie w przemianach chemicznych, z których dopiero później mogły wyłonić się pierwsze protokomórki.

Mimo iż atomy tlenu były obecne na Ziemi od jej początków w postaci skał wapiennych oraz krzemionki, warunkiem pojawienia się pierwotnych przemian było utrzymanie ściśle beztlenowej atmosfery.

Tlen w stanie wolnym pojawił się atmosferze ziemskiej dopiero 2 mld lat po uformowaniu się planety. Fotosyntetyzujące bakterie – sinice żyjące na powierzchni oceanów systematycznie wytwarzały pewne ilości tlenu w procesie fotosyntezy oksygenicznej. Tworzyły się „oazy tlenu” wykorzystywane przez drobne organizmy morskie, a pozostały w wodzie tlen ulegał związaniu przez związki chemiczne wydobywające się z podwodnych wulkanów. Towarzyszyły temu dynamiczne ruchy płyt tektonicznych Ziemi oraz pojawianie się minerałów mających zdolność do wiązania tlenu. Moment, w którym tlen stał się nieodzownym czynnikiem metabolizmu komórkowego, tzw. katastrofa tlenowa (*Great Oxidation Event*), był przełomowy w dziejach życia na Ziemi. Z jednej strony oznaczał bowiem wielkie wymieranie gatunków beztlenowych, z drugiej zaś dał początek rozkwitowi i późniejszej dominacji nowego życia opartego na oddychaniu tlenowym.

W roku 1953 na Uniwersytecie Chicago dwaj badacze amerykańscy Stanley Miller (1930–2007) i Harold C. Urey (1893–1981) przeprowadzili sławne doświadczenie, które można uznać za pierwszą laboratoryjną symulację syntezy związków organicznych z najprostszych cząsteczek nieorganicznych. Reakcję przeprowadzono w zadziwiająco prostym zestawie, zbudowanym z dwóch szklanych kolb połączonych z sobą kilkoma rurkami. Do pierwszej kolby wprowadzone zostały najprostsze związki gazowe, takie jak metan, amoniak, wodór i para wodna, które zapewne były obecne w pierwotnej atmosferze. Tę gazową mieszaninę o silnie redukcyjnych właściwościach poddano działaniu łuku elektrycznego, imitującego wyładowania elektryczne zachodzące na pierwotnej Ziemi. W drugiej kolbie następowało skroplenie oraz kondensacja powstających nowych związków. Po kilku dniach funkcjonowania takiej miniaturowej atrapy pierwotnego świata, w kondensacie, który stopniowo nabierał barwy złocistej, pojawiło się 20 związków organicznych, wśród których wykryto 4 aminokwasy białkowe. Późniejsze modyfikacje eksperymentu Millera i Ureya obejmowały naświetlania za pomocą promieni UV mieszaniny gazów o nieco zmienionym składzie i w obecności niewielkich ilości pospolitych minerałów, którym próbowano przypisać funkcje pierwszych katalizatorów. W mieszaninie uzyskiwanych produktów wykrywano nie tylko aminokwasy, ale także zasady nukleotydowe oraz proste prekursory związków tłuszczowych. Ten etap powstawania załączków życia określa się mianem ewolucji chemicznej, polegającej na tworzeniu monomerów, z których w kolejnym etapie mogły wyewoluować polimery biologiczne. Z pewnym uproszczeniem można powiedzieć, że po ewolucji chemicznej nastąpiła ewolucja biologiczna i dopiero ta doprowadziła do pojawienia się pierwszych komórek.

Współczesne symulacje komputerowe potwierdziły, że pierwsze przemiany chemiczne na prebiotycznej Ziemi zaistnieć mogły w środowisku hydrotermalnym. W okresie

ciężkiego bombardowania powierzchni planety w oceanicznych głębinach okołowulkanicznych mogło tworzyć się nawet więcej związków organicznych niż w eksperymentach Millera-Ureya. Przekształceniom tym sprzyjać mogły generujące energię przemiany elektrochemiczne zachodzące między związkami siarkowo-żelazowymi, obficie występującymi w okolicach podmorskich wulkanów i tworzącymi tzw. ogniwa termodynamiczne.

Cząsteczką wszechobecną we Wszechświecie i w redukcyjnym środowisku prebiotycznej Ziemi jest formamid, powstały w wyniku reakcji wody z cyjanowodorem wydobywającym się z wnętrza podmorskich wulkanów. W warunkach tlenowych jest on gazem silnie toksycznym, ale także ważnym prekursorem niektórych aminokwasów oraz rybonukleotydów, z których zbudowane są łańcuchy RNA.

Niektóre z „pierwotnych” związków organicznych wielokrotnie zidentyfikowano w obiektach kosmicznych. W roku 1969 w południowej Australii spadł sławny meteoryt Murchison, zbudowany z minerału należącego do tzw. chondrytów węglistych. Zidentyfikowano w nim ponad 70 organicznych związków pozaziemskiego pochodzenia, wśród których było 18 aminokwasów. Ponadto analizy przeprowadzone w ostatnich latach przy użyciu nowoczesnej spektroskopii wysokiej rozdzielczości potwierdziły obecność w tym meteorycie prostego cukru rybozy – strukturalnego komponentu cząsteczek RNA, a także zasad nukleotydowych – uracylu i ksantyny.

Astrofizyczną ciekawostką ujawnioną w roku 2020 było zidentyfikowanie we wnętrzu meteorytu Murchison drobin przedsolarnego pyłu kosmicznego pochodzącego sprzed 7 mld lat, a więc starszego o 2 mld lat od naszego Układu Słonecznego. Znaleziony pył, zbudowany z węgla krzemu (karborundu), który był świadkiem ewolucji gwiazd, można więc uznać za autentyczną kapsułę kosmicznego czasu.

Pogląd, że powstanie pierwszej protokomórki mogło zainicjować uruchomienie łańcucha zdarzeń prowadzących do pojawienia się życia jeszcze przed możliwością zreplikowania pierwotnych struktur chemicznych, nie zyskał jednak akceptacji wszystkich badaczy zajmujących się problematyką abiogenezy. Leslie Orgel (1927–2007), Manfred Eigen (1927–2019), Graham Cairns-Smith (1931–2016) oraz Julius Rebek (ur. 1944) zaprezentowali w swych pracach koncepcję, według której mechanizmy replikacji musiały poprzedzać zjawiska formowania się pierwszych komórek. Cairns-Smith sugerował nawet, że pierwszymi replikatorami mogły być nieorganiczne kryształy mineralne.

Proste układy autokatalityczne pojawiły się przypuszczalnie już w pierwotnym bulionie prebiotycznej Ziemi, w którym powstające organiczne produkty syntez spełniały jednocześnie rolę prymitywnych autokatalizatorów. Reakcje takie mogły polegać na wyszukiwaniu z pomocą oddziaływań wodorowych substratów dopasowanych komplementarnie do wyjściowych struktur. W ten sposób tworzył się łańcuch przemian polegający na kolejnych odtworzeniach pierwotnej struktury pełniącej rolę matrycy. Jednakże w kolejnych rundach kopiowania mogły występować błędy, co powodowało, że w puli

powstających produktów replikacji pojawiały się niekiedy cząsteczki nie zawsze wiernie oddające strukturę wyjściową.

W poszukiwaniu cząsteczek organicznych, które miałyby właściwość samoodtworzenia się, Juliusz Rebek w Kalifornijskim Instytucie Scripps zaprojektował serię syntetycznych związków, pochodnych nukleozydu adenozy. Niektóre z nich wykazywały zdolność do przyłączania do ich fragmentów związków o komplementarnej budowie za pomocą wiązań wodorowych. Po połączeniu ich ze sobą wiązaniem kowalencyjnym odtworzona zostawała struktura związku wyjściowego. Po rozdzieleniu pierwotnego związku wyjściowego (matrycowego) od powstałej pierwszej kopii każda z tych cząsteczek mogła oddzielnie podjąć wyszukiwanie ze środowiska komplementarnych substratów ulegających połączeniu, powtarzając w ten sposób pierwszą rundę replikacji. Zapewne nie dowiemy się już nigdy, jakie cząsteczki mogły jako pierwsze ulec samoodtworzeniu, stając się w ten sposób pierwszymi replikatorami. We współczesnych symulacjach chodzi jedynie o rozpoznanie mechanizmu, który mógł wówczas, być może drogą losową, zaistnieć. Dzisiaj proces ten nazywamy po prostu dziedziczeniem.

W prebiotycznym środowisku obok związków niskocząsteczkowych zaczęły się z czasem pojawiać także struktury łańcuchowe – polimery zbudowane z prostych jednostek monomerycznych, z których niektóre miały zdolność do jednostkowego powielania się. Pojemność kodująca cząsteczek łańcuchowych była oczywiście znacznie większa od tej zawartej w pojedynczych monomerach. Samoreplikowanie długich łańcuchów jest jednakże bardziej skomplikowane niż prostych związków. Istnieje bowiem większe prawdopodobieństwo wystąpienia błędnego skopiowania któregoś z wielu elementów i utworzenia zmienionej struktury w stosunku do matrycy wyjściowej.

Teoretycznymi podstawami reakcji autoreplikacji zajął się chemik niemiecki Manfred Eigen z Instytutu Maxa Plancka w Getyndze (Nagroda Nobla – 1967), wskazując, że jest to proces mogący ulegać stopniowej degradacji wskutek pojawiających się błędów kopiowania, co dotyczy może zwłaszcza struktur bardziej złożonych. Jeśli replikacja ma doprowadzić do założonego celu, to przynajmniej jedna kopia w puli cząsteczek powstałych z odtworzenia musi być identyczna do struktury wyjściowej. Eigen zaproponował teorię hipercykli, według której informacja zakodowana w strukturze pierwotnej powinna być podzielona na wystarczająco małe jednostki, aby zminimalizować prawdopodobieństwo wystąpienia błędnego powielenia.

W hipercyklach samoreplikujących monomery są połączone ze sobą w taki sposób, aby żaden z nich nie mógł replikować odrębnie, ponieważ różna szybkość replikacji poszczególnych jednostek wprowadziłaby niestabilność całego układu. Przekroczenie określonego progu błędnego kopiowania i pojawienie się zbyt wielu mutacji może doprowadzić do zniszczenia tego mechanizmu i utraty przez cały cykl zdolności do przenoszenia informacji (tzw. katastrofa błędu). Hipercykle mogą podlegać ewolucji, w wyniku



której są w stanie poprawić swoją zawartość informacyjną. W tym też sensie wykazują one szereg podobieństw do ekosystemów, w których składowe elementy są także od siebie wzajemnie uzależnione.

Większość współczesnych badaczy uważa, że przed pojawieniem się białek spełniających w komórkach rolę arcykatalizatorów oraz przed nadejściem ery DNA – arcyreplikatora, co mogło nastąpić dopiero 2 mld lat po pojawieniu się pierwszych żywych organizmów, istniał świat, w którym łańcuchy RNA mogły wypełniać obie te funkcje. W roku 1981 dwaj badacze amerykańscy Thomas Cech i Sidney Altman wykazali, że cząsteczki RNA mogą być zarówno nośnikami informacji genetycznej, jak i spełniać funkcje katalityczne bez udziału białek. Za to odkrycie wyróżnieni zostali w roku 1990 Nagrodą Nobla. Cząsteczki RNA zdolne do katalizy nazwano rybozymami, w odróżnieniu od innych rodzajów RNA pełniących wyłącznie rolę nośników informacji genetycznej.

W związku z tym, że cząsteczki RNA nie tworzą łańcuchów o równie stabilnej strukturze jak dwuniciowe DNA, jedynie prymitywne organizmy wirusowe, mogły sobie pozwolić na wykorzystanie w trakcie ewolucji tak prostych replikatorów. Stąd też wirusy typu RNA są dzisiaj uważane za relikty czasów zamierzchłych (retrowirusy). Można przyjąć, że pierwsze układy replikacyjne preferowały raczej krótkie sekwencje matrycowe, co sugerowałoby istnienie niewielkich genomów w pierwszym okresie funkcjonowania łańcucha życia. Dodawanie nowych funkcji oraz zwiększanie złożoności w pojawiających się organizmach prowadziło do powiększenia genomów. Biolog amerykański Sol Spiegelman (1914–1983) z Uniwersytetu Columbia już w latach 60. zidentyfikował krótki łańcuch RNA zbudowany z 218 nukleotydów, który był w stanie replikować się w pozakomórkowym środowisku jedynie w obecności białka polimerazy RNA. Był to jeden z ważkich argumentów za hipotezą, że najpierw w łańcuchu życia mogły pojawić się nośniki informacji genetycznej.

Tymczasem nie wszyscy badacze zdają się podzielać taki pogląd, uważając, że najwcześniej jednak mogły pojawić się w głębinach oceanicznych, w pobliżu kominów hydrotermalnych, proste reakcje biochemiczne. Uwolnienie energii zawartej w siarczku żelaza i innych minerałach mogło przyczynić się do uformowania się polimerów oraz zapoczątkowania prostych przemian metabolicznych. Według tych poglądów fakt, że główne elementy budowy błon komórkowych – lipidy, mają mimo podobnego metabolizmu inną budowę u archebakterii i eubakterii, sugerowałby raczej, że metabolizm mógł jednak być pierwszy. Dylemat, co było najpierw – replikacja czy metabolizm – wydaje się więc wciąż ciągle daleki od rozstrzygnięcia.

Nieco innym problemem, który już od dłuższego czasu zaprzęta głowę wielu badaczom, jest kwestia zidentyfikowania pierwszych organizmów komórkowych oraz lepszego poznania budowy ich genomów. Pogląd o istnieniu organizmu lub grupy organizmów, od których wywodzą się wszystkie występujące obecnie na Ziemi organizmy, jest

silnie zakorzeniony wśród biologów. Naturę tej hipotetycznej grupy pradawnych, pierwszych organizmów można opisać jedynie poprzez sekwencję aparatu kodującego, którym był najprawdopodobniej łańcuch RNA. Precyzyjne scharakteryzowanie takiego genomu może dzisiaj okazać się jednak niemożliwe z uwagi na istnienie horyzontalnego przepływu genów, który jest podstawowym mechanizmem formowania genomów prokariotycznych w trakcie ewolucji. O istnieniu pierwszego przodka, z którego wywodzą się wszystkie organizmy, wspominał już Darwin w swoim wielkim dziele *O powstawaniu gatunków*, wydanym w roku 1859.

W roku 2016 zidentyfikowano hipotetyczny minimalny zestaw 355 genów, które mogły wchodzić w skład pierwotnego genomu Ostatniego Wspólnego Przodka wszystkich żyjących obecnie na Ziemi organizmów, należących do domen bakterii, archeonów i eukariontów (*Last Universal Common Ancestor*, LUCA). Zestaw ten wyselekcjonowano drogą analizy porównawczej spośród 6 mln genów kodujących białka prokariotyczne, które zarchiwizowane są we współczesnych bazach danych.

Na tej podstawie podjęto próbę odtworzenia cech organizmów, które mogły mieć taki lub zbliżony zestaw genów. Okazały się nimi metanogenne bakterie zasiedlające beztlenowe środowiska hydrotermalne, w których mogą zachodzić energotwórcze przemiany redukcyjno-oksydacyjne oparte na kompleksach żelazowo-siarkowych. Zakładając powszechnie dzisiaj akceptowany przez przyrodników pogląd o monofiletycznym pochodzeniu organizmów żywych, można przyjąć, że bakterie termofilne oraz hipertermofilne są osadzone najbliżej korzeni filogenetycznego drzewa życia. A to silnie wspiera pogląd, że życie powstało i ewoluowało w gorącym, redukcyjnym środowisku hydrotermalnym.

Karol Darwin, rozmyślając nad zagadką pochodzenia gatunków, często nawiązywał do koncepcji „drzewa życia”, aby zobrazować ewolucyjne relacje między różnymi gatunkami. Naszkicował najpierw patykowate drzewko, które z upływem lat przekształciło się w potężne, wielokonarowe drzewo. Miało ono oznaczać „podobieństwa wszystkich istot tej samej klasy, reprezentowane przez wielkie drzewo i mówiące o nich prawdę”. Niebawem myślenie takie stało się rdzeniem teorii ewolucji. Ale rozważania na ten temat zasługują na odrębną opowieść.

### **Hypotheses and dilemmas around the origin and uniqueness of life**

The emergence of life on Earth and its almost infinite diversity, reflected by a myriad of living organisms, are among the dilemmas that have forever fascinated scientists and philosophers. Today, we are still not able to determine what exactly initiated the chain of events leading to the rise of life – the mechanism of replication of initial structures or perhaps the occurrence of first metabolic reactions. Further approximations of these issues shall probably constitute an overwhelming driving force for future development of life sciences.

**Key words:** origin of replication, chemical evolution