

# Początek życia: metabolizm czy replikacja w kontekście „Świata RNA”

Wiesław Dyk\*

Nadesłano: 6 października 2008. Przyjęto do publikacji: 12 stycznia 2009.

## Streszczenie

Wszystkie modele ewolucji przedkomórkowej przyjmują określone założenia i poddawane są testowaniu empirycznemu i teoretycznemu. W przypadku abiogenezy jest to o tyle trudne, że środowisko prebiotyczne jest tylko częściowo poznane, oraz że wiele dziedzin nauki zaangażowanych jest w proces poznawczy. Trzeba mieć świadomość tego, że żaden model abiogenezy nie wyjaśnia ostatecznie i dokładnie badanej rzeczywistości, ale stanowi jej przybliżenie. Procesy wiodące do powstania pierwszego systemu żywego mogły być oparte albo na tworzeniu się polipeptydów, polinukleotydów czy też innych związków w odpowiednim środowisku planetarnym, albo na wzajemnym oddziaływaniu określonych cząsteczek wewnątrz błony lipidowej. W artykule niniejszym poświęca się po pierwsze, szczególną uwagę własnościom enzymatycznym kwasów nukleinowych i ich ewolucyjnym możliwościom oraz po drugie, rodzajowi podłoża chemicznego i własnościom symbiotycznym planety, na której powstaje życie. Chociaż rozważania koncentrują się wokół „świata RNA”, to jednak w genezie pierwszego systemu żywego uwzględnia się białka i ich współdziałanie wewnątrz struktury protokomórkowej otoczonej błoną półprzepuszczalną [1]. Chociaż przyjmuje się, że życie stanowi integralną część Wszechświata, to w podjętych analizach zwraca się szczególną uwagę na to, że życie i planeta na której ono powstaje powinny być badane łącznie. Rozważania dotyczą procesów dokonujących się na poziomie ewolucji molekularnej, począwszy od powstania pierwotnego RNA w „zupie nukleotydowej” aż do momentu pojawienia pierwszego biosystemu.

## Spis treści

1	Wstęp	79
2	Własności katalityczne RNA a geneza życia	81
3	Hipoteza „najpierw replikator” kontra „najpierw metabolizm”	82
4	Scenariusz genezy życia	83
5	Od symbiogenezy do biosystemogenezy	84
6	Zakończenie	86

## 1 Wstęp

Co było pierwsze kura (białko) czy jajko (DNA); replikator czy metabolizm? Badacze skłonni byliby przyznać pierwszeństwo białku i metabolizmowi. Natura początku życia nie została

jednoznacznie określona, stąd nie można wykluczać innych, nawet mało prawdopodobnych scenariuszy jego genezy.

Chociaż DNA posiada przepis na budowę białka, to jednak nie można go zrealizować bez po-

\*Instytut Filozofii, Uniwersytet Szczeciński;

mocy białek. We współczesnych komórkach nośnikiem informacji genetycznej jest DNA (kwas deoksyrybonukleinowy). W DNA zawarty jest zapis sekwencji różnych rodzajów RNA, tworzonych na matrycy DNA. Niektóre z tych RNA, mRNA są wzorcem do syntezy białka. Białka są niezbędne do wszystkich czynności życiowych komórki. Białka katalizują przebieg różnych reakcji, a między innymi replikację DNA (poodwajanie informacji genetycznej), a także proces transkrypcji, który jest procesem przepisywania informacji genetycznej zawartej w DNA (genach) na RNA. Niektóre RNA kontrolują aktywność genów-DNA, a inne służą do produkcji białka. Wynika z tego, że w żywej komórce eukariotycznej DNA nie może powieść się bez białka i białko nie może „powstawać” bez DNA. Jednak RNA wykazuje wiele cech, które wskazują na to, że może być ono pierwotnym materiałem genetycznym, a między innymi: zdolność katalityczna (rybozomy) i sterowanie syntezą białek. Odkrycie rybozymów zmieniło spojrzenie na to jak mogło ewoluować życie. Możemy sobie wyobrazić, że istniała prymitywna forma życia w całości oparta na RNA. W tym świecie RNA mógł egzystować jako materiał genetyczny i jako maszyna enzymatyczna. Z niego ta informacja mogła być transferowana na DNA, RNA i białka. Poparciem na to, że świat białek powstał z RNA jest odkrycie, że w podjednostce rybosomu składnik odpowiedzialny za powstawanie połączeń peptydowych (transferaza peptydylowa) nie jest białkiem, ale jest tylko częścią RNA. Być może rybozym rybosomowy jest reliktem wcześniejszych form życia, kiedy to wszystkie enzymy były RNA [2].

Nie wiadomo jak poza komórką RNA może pełnić funkcję enzymatyczną i jak białko może być nośnikiem informacji genetycznej. Jasno trzeba zaznaczyć, że białko nie może być nośnikiem informacji genetycznej! W obecnym czasie, wobec takich odkryć naukowych nikt nie może nawet przypuszczać, że nośnikiem informacji genetycznej może być białko. Nie pozwalają na to cechy białek, aby mogło być ono nośnikiem czegoś, co ma być stałe. Pojawia się więc paradoks w wyjaśnianiu genezy życia. Aby powstało życie musi być białko i muszą być kwasy nukleinowe. Rozwiązanie tego paradoksu, według Manfreda Eigena [3], powinno zmierzać w kierunku przyznania jednoczesnego tworzenia się cyklu białkowego i nukleinowego, a następnie w warunkach termodynamicznej nierównowagi spontanicznego połączenia obydwóch

cykli w jeden hipercykl białkowo-nukleinowy. Hipercykl stanowiłby pierwszy system żywy, który podlegałby działaniu doboru naturalnego i ewolucji. Sidney Fox [4,5] natomiast argumentuje, że najpierw w procesie ewolucji molekularnej powstały poliaminokwasy zwane protenoidami, a później dopiero kwas nukleinowy. Struktury protenoidowe będąc uporządkowane wewnętrznie same determinowały dalsze procesy ewolucji życia, tj. były przejawem kierunkowości i kontroli interakcji między różnymi elementami.

Odkrycie enzymatycznych własności RNA stwarza podstawę do wyobrażenia sobie jeszcze innego scenariusza zdarzeń. Rozwiązanie powstałego paradoksu można poszukiwać w tzw. „świecie RNA” i procesach symbiogenezy na poziomie ewolucji chemicznej.

Przyjęta ogólna nazwa „świat RNA” może być rozumiana dwojako: albo RNA powstał wcześniej niż DNA i białka i z RNA enzymatycznym należy wiązać pierwszy etap powstawania życia, albo z powstaniem RNA nie należy łączyć genezy życia, tzn. początki życia należy przesunąć na okres wcześniejszy, poprzedzający powstanie RNA. W pierwszym ujęciu przyznaje się, że kluczowym dla genezy życia była spontaniczna synteza enzymatycznego RNA w pierwotnej zupie nukleotydów. W drugim natomiast uznaje się, że powstanie RNA enzymatycznego poprzedziły hipotetyczne chemiczne procesy, które zapoczątkowały proces ewolucji życia.

Po odkryciu własności katalitycznych RNA, wbrew centralnemu dogmatowi w biologii:

$$\text{DNA} \Rightarrow \text{RNA} \Rightarrow \text{BIAKO},$$

niektórzy badacze są skłonni uznać inny model, tj.

$$\text{RNA} \Rightarrow \text{DNA} \Rightarrow \text{BIAKO}.$$

Zauważa się bowiem, że u wielu organizmów cząsteczki RNA wpływają na hydrolizę RNA, splicing czy translację. RNA buduje maszynę translacyjną i stanowi czynnik katalizujący powstanie wiązania peptydowego, bez którego nie mógł powstać łańcuch białkowy. Z punktu widzenia procesów życiowych powstanie procesu replikacji mogło być krokiem milowym w kierunku komórkowej organizacji życia. Dane pochodzące z licznych badań molekularnych stały się podstawą do tego, że wielu biologów i filozofów biologii jest zdania, że RNA był pierwszą cząsteczką niosącą informację genetyczną, która była przeniesiona później na

DNA i na białka (np. J.D. Watson). Tak więc DNA i białka ewoluowały później [6].

## 2 Własności katalityczne RNA a geneza życia

RNA jest wiele typów. Funkcją jednego z nich jest przenoszenie informacji z DNA do rybosomów, czyli struktur produkujących białka. Inne typy RNA wchodzą w skład rybosomów lub też współdziałają z nimi w syntezie białka. Jeszcze inne są to rybozomy, które pełnią rolę enzymów. Interesujący nas enzymatyczny RNA posiada własność katalizowania samego siebie. Już wcześniej zwrócono uwagę na to, że RNA może pełnić rolę nie tylko nośnika informacji genetycznej, ale również posiada własności enzymatyczne. Samopowielające się cząsteczki RNA powstałe na pierwotnej Ziemi mogły być jednocześnie katalizatorami i substratami swej własnej replikacji. Prowadzone badania procesów dojrzewania prekursorowych RNA przez S. Altmana [7] i T. R. Cecha [8,9] doprowadziły do odkrycia własności katalitycznych tych cząstek. RNA wykazujące własności katalityczne nazywa się rybozymami. Rybozomy są interesujące z tego punktu widzenia, gdyż [10]:

1. rolę enzymów nie muszą, jak to było dotychczas, pełnić białka. Enzymatyczny RNA jest enzymem nieproteinowym
2. katalityczne własności RNA mają istotne znaczenie w wielu procesach biochemicznych, np. katalizują hydrolizę i niektóre oddziaływania internukleotydowe
3. procesy katalityczne kwasów rybonukleinowych odsłaniają szersze znaczenie struktury RNA oraz oddziaływań tak między cząsteczkami, jak i wewnątrz cząsteczek w procesie katalitycznym
4. własności katalityczne rybozymów wykorzystuje się w terapii genowej. Dokonuje się na przykład hydrolizy RNA wirusów
5. własności katalityczne RNA mogą być uważane za biochemiczne „skamieniałości”. Mogły to być pierwsze biomolekuły, które odegrały istotną rolę w procesie genezy życia.

Ostatnia własność RNA ma szczególne znaczenie w rozumieniu procesów genezy i ewolucji życia. Chociaż własności RNA znamy z jego funkcji w komórce, to jednak próbuje się uzasadnić jego

istnienie przed powstaniem komórek. Można zatem założyć, że pierwszy etap powstania systemu żywego wiąże się z przypadkowym utworzeniem się enzymatycznego RNA w „nukleotydowej zupie”.

Teoretycznie możliwy jest scenariusz genezy życia, w ramach którego przyjmuje się, że najpierw w historii Ziemi pojawiły się organizmy przechowujące materiał genetyczny w RNA. Freedmann Dyson analizując badania M. Eigena podaje, że po pierwsze, „replikacja RNA mogła być fundamentalnym procesem, wokół którego rozwinęły się pozostałe procesy biologiczne. Po drugie: odkrycie podwójnej helisy pokazało, że geny są strukturalnie prostsze niż enzymy” [11]. W tym kontekście można uznać, że wirusy są pierwszymi istotami żywymi. Częściej jednak przyjmuje się współcześnie, że metabolizm jest podstawową cechą życia, a w tym aspekcie wirusy są tworamí martwymi. W tym kontekście wirusy można uznać za ożywioną materię, gdyż zawierają kwasy nukleinowe jako materiał genetyczny i mogą się reprodukować jak organizmy komórkowe. Na tym jednak kończy się ich cecha „życia”. Są na pograniczu istot ożywionych, gdyż nie są zdolne do przeprowadzania procesów metabolicznych i nie mogą się reprodukować na zewnątrz komórki gospodarza. Z uwagi na to, że nie mają budowy komórkowej, ani nie prowadzą procesów metabolicznych, wirusy, według współczesnej klasyfikacji, nie zostały zakwalifikowane do żadnego z pięciu królestw istot żywych. Materiałem genetycznym wirusów może być DNA i RNA, a w ich genomie istnieje zazwyczaj do kilkuset genów.

W latach 70. minionego wieku podejmowano rozważania istoty i pochodzenia życia na Ziemi i uważano wirusy za najprostsze organizmy żywe [13,14]. Także i obecnie niektórzy uważają, że plazmidy bakteryjne mogłyby być uznane za pierwotne organizacje życia [15].

Zagadnienie powyższe domaga się dalszych analiz interdyscyplinarnych w kontekście istoty życia. Naszą uwagę skupimy jednakże na katalitycznych własnościach RNA. Chociaż istnienia w przeszłości świata RNA nie można w pełni udowodnić, to jednak podejmowane są próby eksperymentalnego potwierdzenia w eksperymentach laboratoryjnych. Podejmowane wysiłki są krytykowane przez niektórych badaczy genezy życia, gdyż, jak się twierdzi, w laboratorium można tak zaplanować warunki i tak dobrać skład i stężenie reagentów, by otrzymać z góry zaplanowany wynik. Nie ma więc

możliwości sprawdzenia, czy tak rzeczywiście było przed prawie 4 miliardami lat na Ziemi.

Mimo wielu wątpliwości, wyniki doświadczeń związane z ewolucją *in vitro* (ewolucją kierunkową) wskazują na duże prawdopodobieństwo „świata RNA”. W badaniach *in vitro* najpierw miesza się ze sobą cząsteczki RNA o różnych sekwencjach, a następnie selekcjonuje pod względem ich zdolności do katalizowania wybranej podstawowej reakcji biologicznej [6]. Cząsteczki, które wykazują chociaż minimalną zdolność katalizowania tej reakcji namnaża się, poddaje się działaniu czynników mutagenicznych i następnie znów poddaje selekcji. Proces ten jest powtarzany tak długo aż cząsteczki RNA staną się sprawne w katalizowaniu danej reakcji biologicznej. Ale nie tylko konkretnej reakcji. Eksperymenty laboratoryjne potwierdzają, że „RNA ma duży zakres funkcji, to znaczy może katalizować wiele biologicznie ważnych procesów” [6].

Potwierdzeniem pochodzenia życia od enzymatycznego RNA jest to, że wiele reakcji enzymatycznych przebiega w obecności kofaktorów, czyli cząstek zawierających rybonukleotyd. Współcześnie cząstki te (kofaktory) właściwie nie pełnią żadnych funkcji w żywej komórce, stąd często nazywana jest „molekularną skamieniałością”. Jest to relik z czasów prebiotycznych, kiedy to procesy życiowe przebiegały dzięki enzymatycznym własnościom RNA.

Oprócz argumentów z ewolucji kierunkowej i z „molekularnych skamieniałości” za hipotezą „świata RNA” przemawiają badania procesów przebiegających we współczesnych komórkach. Mimo, że w komórkach występują kompleksy RNA i białka, to jednak aktywne centrum znajduje się w RNA. W komórkach występują RNA kodujące i niekodujące. RNA kodujące służy jako matryca syntezy białek. RNA niekodującego jest wiele typów. Niektóre z nich spełniają w komórce rolę enzymów i są to wspomniane wyżej rybozomy [16]. Rybozomy niekodujące kontrolują też ekspresję genów i pełnią funkcję ryboprzełączników.

Ryboprzełączniki, czy też przełączniki RNA (*riboswitch*) są to cząsteczki RNA wiążące niskocząsteczkowe metabolity komórkowe. Fakt ten umożliwia cząsteczkom RNA regulację transkrypcji lub translacji odpowiednich mRNA. Proces ten przebiega bez udziału białka. W niekodujących regionach mRNA (UTR – *untranslated region*) w układzie *cis* powstają motywy strukturalne, które wiążą poszczególne metabolity komór-

kowe. Wiązanie to indukuje zmiany w strukturze UTR oraz jest przyczyną aktywacji lub represji translacji czy też transkrypcji. Wiadomo, że taka regulacja przy pomocy przełączników RNA wpływa na uaktywnienie lub represję genu.

Po przedstawieniu enzymatycznych własności RNA i możliwych tego konsekwencji, zastanowimy się nad tym, co było pierwsze: replikator czy metabolizm?

### 3 Hipoteza „najpierw replikator” kontra „najpierw metabolizm”

Podstawowym atutem spontanicznego powstania RNA w „zupie nukleotydowej” jest to, że życie powstało zgodnie z prawami fizyki i chemii. Największym zarzutem przeciw hipotezie „Świata RNA” jest to, że jest mało prawdopodobne utworzenie się tzw. „zupy nukleotydowej” i jeszcze mniejsze spontaniczne powstanie w niej enzymatycznego RNA [17]. Zbyt wiele musiałoby być spełnionych zbiegów okoliczności, wielu koniecznych połączeń, by w konsekwencji pojawił się nukleotyd. Każdy nukleotyd składa się z wielu cząstek węgla, azotu, tlenu, wodoru oraz fosforu. Wszystkie te cząstki łączą się w strukturę przestrzenną zwaną nukleotydem. Argumentuje się, że dotychczas nie udało się w warunkach laboratoryjnych otrzymać nukleotydów, tak jak otrzymuje się aminokwasy, podstawowe elementy białka. Badania związane z laboratoryjnym otrzymywaniem nukleotydów prowadzone są przez wielu naukowców, m.in. przez Geralda F. Joyce’a i Jacka W. Szostaka. Eksperymentalnie wykazano, że *in vitro* można otrzymać rybozomy przyspieszające reakcję RNA [18, 19]. Wniosek stąd, że życie powstało na Ziemi i nie jest wykluczone, że może powszechnie występować w Kosmosie.

Dobór reagentów, ich stężeń i warunków nie może być argumentem pomniejszającym wartość prowadzonych badań zmierzających do potwierdzenia świata RNA. Powszechnie wiadomo, że model powstania życia podany przez Aleksandra Oparina i potwierdzające go badania laboratoryjne prowadzone przez Stanleya L. Millera i Harolda C. Ureya okazały się bardzo wyidealizowane. Wiadomo bowiem, że atmosfera ziemską miała w rzeczywistości dużo mniej wodoru, prawie 10 000 mniejsze ilości, niż zakładali to badacze [20]. W obronie trendu w protobiologii zwanego „oparinizmem” podaje się, że badania komet i meteoroidów wykazały, że były

one źródłem pierwiastków, z którego się utworzył się wczesny „odżywczy bulion” złożony z aminokwasów i innych związków. Nie ma potwierdzenia, by istniały w „posłańcach z kosmosu” jakiegokolwiek nukleotydy.

Alternatywny model „Świata RNA” nie został jednak obalony. Steven A. Bonner [22] z Westheimer Institute for Science and Technology w Gainesville na Florydzie podaje, że nawet gdybyśmy przyjęli tezę niekatalitycznych, ale metabolicznych podstaw genezy życia, to nie unikniemy paradoksu. Musimy rozwiązać paradoks związany z reaktywnością cząsteczek organicznych. Reaktywność ta z jednej strony może ułatwić przemianę materii wiodącą do wyłonienia się życia, ale z drugiej strony, może przyczynić się do rozkładu wszelkich reakcji wiodących do wyłonienia się życia.

Mimo narzucających się trudności nie ustają badania zmierzające do laboratoryjnego przetestowania koncepcji „świata RNA” – „najpierw był replikator”. A większość badań egzobiologicznych (astrobiologicznych) nastawionych jest na poszukiwanie związków organicznych we Wszechświecie i na potwierdzenie hipotezy, że „najpierw był metabolizm”. Hipoteza „najpierw replikator”, tzn. najpierw był enzymatyczny RNA, może być testowana w laboratorium, ale bez naśladowania warunków podanych przez Millera i Ureya oraz bez kurczowego trzymania modelu metabolicznego.

Neguje się zasadność „świata RNA” z tego powodu, gdyż RNA posiada grupę karbonylową (atom węgla połączony jest podwójnym wiązaniem z atomem tlenu). Grupa karbonylowa jest bardzo reaktywna w przemianach materii, co w konsekwencji prowadzi do powstawania substancji smołopodobnej. To właśnie z tego powodu uznawało się, że ryboza i inne cukry nadają się bardziej na asfalt niż na pierwotny materiał genetyczny. Jednakże sytuacja się zmienia, gdy w środowisku naturalnym, w którym przebiegają procesy biogenne znajduje się bor. Jeśli zmiesza się boran ze związkami organicznymi występującymi w meteorytach i podda się tę mieszaninę wyładowaniom atmosferycznym, to powstanie ryboza, która już nie ulega rozkładowi. Okazuje się, że bor stabilizuje węglowodany - rybozę. Ryboza pod wpływem boranu związa się i zachowuje klarowną postać. W trakcie prowadzonych eksperymentów, Benner mieszał związki organiczne z kolemanitem zawierającym boraks. Można zamiast kolemanitu dodawać inne minera-

ły zawierające boraks, np. uleksyt i kernit. Konsekwencje są zawsze takie same: powstaje ryboza, która nie ulega przekształcaniu się w asfalt. Wyniki tego doświadczenia nie przesądzają jeszcze sprawy, ale stają się podstawą argumentacji hipotezy „najpierw replikator”. Badania te otwierają nowy rozdział w protobiologii, wskazują na nowe aspekty poszukiwań życia poza naszą planetą oraz stwarzają podstawę do pytania o związek początku życia z RNA lub o prostsze niż RNA podstawy genezy życia.

W porównaniu z białkami enzymatyczny RNA jest słabym katalizatorem, przekazywana przez niego informacja jest mało dokładna. Poszukuje się zatem wcześniejszych stadiów ewolucji RNA. Spekuluje się, że pierwszym nośnikiem genów mogły być PNA (*Peptide Nucleic Acid*) czyli kwas peptydonukleinowy [23, 24]. Jest to syntetyczny polimer, którego szkielet stanowi poliamid, który może być utworzony z podjednostek N-(2-aminoetylo)glicyny połączonych wiązaniem peptydowym. Szkielet ten zastępuje fosforanowocukrowy szkielet naturalnych kwasów nukleinowych [25].

Własnością PNA jest większa stabilność połączeń. Stabilność ta jest wynikiem braku obecności reszt kwasu fosforowego w szkielecie cząsteczki. Do szkieletu tego dołączają się zasady azotowe i tworzą się połączenia PNA-PNA oraz PNA-RNA i PNA-DNA. Proste amidy, zasady azotowe i większa stabilność pozwalają widzieć istotną rolę PNA w procesie biogenezy. Nie ma jednakże żadnych argumentów za tym, żeby taka cząsteczka mogła istnieć w stanie naturalnym.

## 4 Scenariusz genezy życia

Z dotychczasowych rozważań wiemy, że w świetle hipotezy świata RNA, najprawdopodobniej w początkowych stadiach genezy życia, przemiany związane z syntezą białka oraz replikacja katalizowane były przez rybozomy [26, 27]. Życie mogło powstać na Ziemi w zagłębieniach, których powierzchnia była pokryta związkami zawierającymi bor. Poszukiwaniu naturalnych miejsc, które stanowiłyby „miskę” powstawania „zupy nukleotydowej” wskazuje się między innymi na Dolinę Śmierci w Kalifornii. Tereny te zawierają związki boru i w przeszłości były wypełnione związkami organicznymi i cyklicznie były nawadniane i osuszane. Dzięki własnościom środowiskowym powsta-

jąca w dużych ilościach ryboza była stabilna, co stwarzało odpowiednie warunki do ewolucji życia.

Procesy genezy życia rozpoczęły się niemalże natychmiast po ostudzeniu skorupy ziemskiej. Równoległe mogły przebiegać procesy tworzenia się aminokwasów [28] i nukleotydów [29]. W pierwotnej „zupie nukleotydów” mieszczącej się na podłożu związku boru tworzyły się cząstki pre-RNA i RNA jako struktur przenoszących informację genetyczną [30].

W fazie pierwotnej pierwsze systemy żywe oparły swe funkcjonowanie na strukturze i własnościach enzymatycznych hipotetycznego PNA czy też RNA [31]. W „pierwotnej zupie” znajdowały się, oprócz kwasów rybonukleinowych, również inne związki organiczne, a nade wszystko aminokwasy. W pierwszych etapach genezy życia istotną rolę odgrywały struktury i ich własności kwasów rybonukleinowych oraz rybonukleinowych. Cząsteczki RNA oddziałując z innymi związkami organicznymi wyznaczały pierwotne szlaki biochemiczne życia [32]. Powstałe struktury - z kwasów nukleinowych i innych cząstek organicznych, a zwłaszcza z pierwotnych białek - zostały otoczone błoną lipidową, która tworzyła się w biogennym i wodnym środowisku. Otoczenie błoną prostych białek i kwasów nukleinowych było podstawą do utworzenia się pierwszej komórki. Wraz z powstaniem pierwszych komórek rozpoczyna etap ewolucji biologicznej. Fakt ten sprzyjał pojawieniu się pierwotnego metabolizmu. W komórkach nastąpiła symbioza replikacji z metabolizmem, by w następnych etapach ewolucji protokomórek metabolizm stał się główną cechą systemów żywych. Długotrwała ewolucja metaboliczna, dokonująca się wewnątrz samoodtworządzających się błon tłuszczowych, doprowadziła do powstania form zdolnych do dokładnej replikacji [33, str. 105].

Chociaż cykle białkowe powstały równocześnie z nukleinowymi, to jednak pierwotne białka nie spełniały funkcji katalitycznych, gdyż w dalszym ciągu procesy transportu informacji i replikacji kierowane były przez RNA. W dalszym procesie ewolucji w powstałe rybonukleoproteinowe struktury komórkowe wbudowywane były inne aminokwasy i następowało doskonalenie się tejże struktury i ich funkcji. Różnicująca się struktura i udoskonalająca się funkcja struktur białkowo-nukleinowych coraz bardziej zastępowała rolę RNA, aż wreszcie nastąpiło przejście przez białko wszystkich funkcji katalitycznych [26,34]. Dostarczanie na Ziemię róż-

nych aminokwasów mogło odbywać się za pomocą meteorytów. W naturalnym środowisku kosmicznym liczba aminokwasów wynosi 103, a współczesne życie wykorzystało ich tylko 20. Jednakże enzymatyczne RNA powstawało na Ziemi, w tych miejscach, w których występowały związki boru. Powstanie żywej komórki nastąpiło w wyniku połączenia właściwości kwasów nukleinowych i białek. Enzymatyczne RNA odegrało jednak kluczową rolę w zainicjowaniu procesów ewolucji życia, czyli nastąpiło przejście od chemicznego stadium symbiogenezy do biosystemogenezy.

## 5 Od symbiogenezy do biosystemogenezy

Życie powstało z materii nieożywionej na drodze ewolucji materii. Badania chemii kosmosu i planet poza naszym Układem Słonecznym potwierdza fakt, że przestrzeń kosmiczna „usiana” jest związkami organicznymi, że w meteorytach występują aminokwasy, że woda jest powszechnym związkiem i może wystąpić w postaci ciekłej w gruncie Marsa i innych planetach. Wydaje się zatem, że życie powinno być powszechnym zjawiskiem we Wszechświecie. Dotychczas konkluzja ta jednak nie ma potwierdzenia w badaniach astrobiologicznych. Faktem jest, że życie w postaci różnych form istnieje w ekstremalnych warunkach na Ziemi. Dlaczego więc nie może wystąpić gdzieś w Kosmosie? Odpowiedź na to pytanie daje Lynn Margulis, wskazując na specyficzność Ziemi, tzn. jest to symbiotyczna planeta [35]. Chociaż termin „symbioza” odnosi się wprost do powstania nowych narządów, nowych organizmów i do wspólnego życia różnych form organizmów, to jednak możemy go odnieść do różnych form materii oraz powstałych z nich struktur nieożywionych.

Próby ukazania molekularnej symbiozy białka i RNA przedstawił Freeman Dyson [11]. W ramach przyjętego przez siebie rozumienia symbiozy na poziomie chemicznym ukazuje on procesy kształtowania się makrocząsteczek życia i spajania ich za pomocą oddziaływań chemicznych. Przy uwzględnieniu różnych własności materii i jej ewolucyjnego charakteru można, na poziomie przedbiologicznym, mówić o symbiogenezie, tzn. o powstaniu nowych struktur oraz nowych systemów ożywionych z elementów i konglomeratów już wcześniej powstałych w wyniku reakcji chemicznych. Symbiogeneza dotyczy powstania w „zupie nukleotydowej”

kwasów nukleinowych oraz białek w „pierwotnym bulionie”.

Chociaż genezy materii szukamy w odległych procesach ewolucji Wszechświata i wewnątrz gwiazd, to pierwszy etap powstania życia związany jest z przemianami chemicznymi i warunkami planetarnymi. Lynn Margulis przyjmując koncepcję seryjnej endosymbiozy już na poziomie konsolidacji komórek stwierdza, że możemy podejmować próby wyjaśniania wcześniejszych etapów życia, gdyż jest ono chemicznie konserwatywne [33, str. 55]. Pierwotne cząsteczki życia odzwierciedlają nie tylko chemiczne uwarunkowania ich powstawania, ale także symbiotyczne własności planety (Ziemi), na której zostały wykreowane. Składanie całości z elementów oraz wyłanianie się biosystemów z części jest naturalnym procesem odzwierciedlającym symbiotyczny charakter planety. Chociaż świat jest przepełniony związkami organicznymi i chociaż możliwe było powstanie aminokwasów na innych planetach, to nigdzie indziej poza Ziemią nie spotyka się nukleotydów i kwasów nukleinowych. Może to świadczyć za tezę, że to właśnie pre-RNA czy RNA „uczyniły pierwszy krok” ku życiu i odegrały istotną rolę w biosystemogenezie. Scenariusz symbiogenezy odnoszący się do „świata RNA” został przedstawiony wyżej i uzupełnia w pewnej mierze symbiogenetyczne powstawanie tkanek, narządów, organizmów i gatunków.

Symbiogeneza w „świecie RNA” dotyczy środowiska ziemskiego. Znamienne jest bowiem, że mimo wielu podobieństw nie odkryto identycznego systemu słonecznego, jak nasz Układ Słoneczny. Mimo też wielu podobieństw nie znaleziono symbiotycznej planety zdolnej do wyłonienia różnorodności z powszechnych elementów w „kosmicznej zupie”.

Hipoteza „świata RNA” oraz koncepcja symbiogenezy wypełnia lukę w wyjaśnianiu paradoksu genezy życia. Jaśniej można zauważyć ciągłość procesu ewolucji życia z materii nieożywionej, poprzez najprostsze związki organiczne, prymitywne żywe organizmy aż do współczesnych skomplikowanych, pod względem strukturalnym i funkcjonalnym, żywych systemów. Tylko niezajomość zasad ewolucji, jak podaje L. Margulis, może być powodem wiary, iż życie powstało w Kosmosie i zostało przesłane na Ziemię w postaci gotowych zarodków. Autorka ta opowiadając się za naturalnym powstaniem życia na Ziemi stwierdza, że jednak najprostszym systemem żywym nie jest RNA,

DNA, czy białko ale „struktury otoczone błonami stanowią warunek *sine qua non* wszelkiego życia” [33, str. 117]. O istnieniu życia możemy mówić dopiero od chwili, gdy przyjęło ono formę komórkową jako „wynik wzajemnych oddziaływań między cząsteczkami-nośnikami informacji genetycznej (jak RNA), i tłuszczowymi błonami, oddzielającymi je od zewnętrznego świata” [33, str. 119]. RNA i DNA poza komórką są tylko związkami chemicznymi, nawet otoczenie RNA błoną liposomową nie stanowi organizacji jednostki życia. Nawet w czasie procesu ewolucyjnego włączenie RNA, ze względu na swoje własności katalityczne, do komórki wspomaga namnażanie rybozymów, umożliwia produkcję białek i z tego względu mogło stać się podstawą do formowania się pierwotnych komórek. RNA może ulegać mutacjom, które nie korygowane, czy nie reperowane przyczyniły się do powstania różnorodnych form RNA. RNA inaczej niż DNA, podlega mutacjom, co umożliwia usprawnienie procesu replikacji i ewolucję biosystemów [36].

Lynn Margulis jako biolog nie zajmuje się genezą życia, ale bada współczesne struktury i własności systemów żywych. Z punktu widzenia współczesnych form ożywionych krytykuje ona Freemana Dysona za próby zastosowania terminu „symbiogeneza” do etapu ewolucji chemicznej i biochemicznej, a nawet uznaje, że „pierwotna zupa nukleotydowa” nigdy nie istniała. Najpierw zatem była biosystemogeneza a później symbiogeneza. Podobne stanowisko zdaje się utrzymywać wspomniany wyżej S. Fox. Uzasadnia on, że kopolimer, jako makrocząsteczka niosąca informację, powstał pierwszy, a białko i kwas nukleinowy powstał wewnątrz ewoluującego protenoidu. Tak więc najpierw powstała komórka.

W artykule niniejszym nie neguje się tego, że komórka jest pierwszym żywym systemem, ale stojąc na stanowisku ewolucji chemicznej przyjmuje się, że życie jest wynikiem serii procesów, najpierw ewolucji kosmicznej i planetarnej, a następnie – co podejmuje się w artykule – ewolucji molekularnej i protobiologicznej. W tym ujęciu stosowane przez biologów takie pojęcia, jak „symbioza” i „symbiogeneza” posiadają szerszy zakres. Przyjmuje się, że symbioza i symbiogeneza pojawiały się już na etapie ewolucji atomowej oraz przemian chemicznych, a więc poprzedziły procesy biosystemogenezy.

Możliwość nowego szerszego spojrzenia na procesy ewolucji molekularnej i protobiologicznej

stwarza okazję do wykorzystania znanych nam terminów: „symbioza” i „symbiogeneza” do zrozumienia i wyjaśnienia procesów poprzedzających genezę życia. Początkowo terminy te odnosiły się do opisanego procesów ewolucji biologicznej i oznaczały one [33, str. 13-14]:

- „symbioza, czyli układ w którym osobniki należące do różnych gatunków żyją ze sobą w fizycznym kontakcie”
- „Ewolucyjne pojęcie symbiogenezy oznacza powstawanie nowych tkanek, narządów i organizmów – a nawet gatunków – poprzez ustanowienie długotrwałych lub stałych związków symbiotycznych”.

Obecnie, co dla biologa może wydawać się naiwne, „**symbioza**” odnosi się do interakcji między prostymi związkami chemicznymi, a „**symbiogeneza**” wiąże się z istnieniem swobodnego determinizmu, wyznaczania określonych szlaków ewolucyjnych, będących podstawą pierwotnej kierunkowości i wewnętrznie kontrolowanych interakcji. W miarę wzrostu złożoności i różnorodności struktur pojawiają się określone własności i funkcje prowadzące do wytworzenia się komórek i współczesnych form życia.

## 6 Zakończenie

Proces abiogenezy jako system dynamiczny wymaga się potwierdzenia przez tzw. obserwacje biologiczne: kosmochemiczne, geochemiczne i laboratoryjne. Rozważany w niniejszym artykule „świat RNA” stworzył okazję do przedyskutowania moż-

liwości powstania życia w oparciu o enzymatyczne własności RNA. Mimo, iż wielu badaczy uważa taki scenariusz powstania życia za bardzo mało podobny, to jednak nie niemożliwy. W sferze geochemicznej powołano się na specyficzność podłoża planety, na którym miałyby przebiegać procesy prowadzące do powstania życia. Wskazano tutaj na rolę związków zawierających bor. Specyficzność chemii planety uzasadnia brak potwierdzenia analizowanej hipotezy w obserwacjach kosmochemicznych. Badania laboratoryjne potwierdzają jednak realną możliwość świata RNA.

Oprócz obserwacji biologicznych w testowaniu modelu „świata RNA” powołano się na idee Lynn Margulis w ukazaniu roli własności symbiotycznych planety (Ziemi) obfitującej w różnorodne systemy żywe.

Korzystając z terminów dobrze znanych na płaszczyźnie biologicznej, podjęto się próby rozwiązania wielu dylematów spotykanych w trakcie wyjaśniania genezy życia na etapie ewolucji molekularnej i protobiologicznej. Wśród tych dylematów wymienia się: najpierw kwas nukleinowy czy najpierw białko; najpierw replikator czy najpierw metabolizm; najpierw symbiogeneza czy najpierw biosystemogeneza. Z punktu widzenia „Świata RNA” podjęto się próby wykazania, że najpierw był kwas nukleinowy, replikator, symbioza i symbiogeneza. Na obecnym stadium rozwoju życia rola RNA, replikacji, symbiozy i symbiogenezy nie znika. W wyniku ewolucji doszło do połączenia sprzeczności w jeden spójny żywy system i uwydatnienia roli białka, metabolizmu i procesów biosystemogenezy.

---

## Literatura

- [1] J. Oró, „Chemical Evolution and the Origin of Life”, *Adv Space Res* **3**, 88–89 (1983).
- [2] J. D. Watson, T. A. Baker, S. P. Bell, A. Gan, M. Levine, i R. Losick, *Molecular Biology of the Gene* (Pearson/Cummings, CSHL Press, 2004).
- [3] M. Eigen, „Self-organisation of matter and the evolution of biological macromolecules”, *Naturwissenschaften* **58**, 465–523 (1971).
- [4] S. Fox i A. Pappelis, „Synthetic Molecular Evolution and Protocells”, *Quarterly Review of Biology* **68**, 79–82 (1993).
- [5] S. W. Fox, „Proteinoid experiments and evolutionary theory”, [w:] M. Ho i P. Saunders (red.), *Beyond Neo-Darwinism* (New York 1984), str. 15–60.
- [6] E. P. Solomon, L. R. Berg, i D. W. Martin, *Biologia*, wg wyd. VII amerykańskiego, tłum. A. Pecio i S. Hofman (MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2007).

- [7] S. Altman, M. F. Baer, M. Bartkiewicz, H. Gold, C. Guerrier-Takada, J. A. Kirsebom, N. Lumelsky, i K. Peck, „Catalysis by the RNA subunit of Rnase – a minireview”, *Gene* **82**, 63–64 (1989).
- [8] T. R. Cech, „The chemistry of self-splicing RNA and RNA enzymes”, *Science* **236**, 1532–1539 (1987).
- [9] T. R. Cech i B. Z. Bass, „Biological catalysis by RNA”, *Annu Rev Biochem* **55**, 599–629 (1986).
- [10] Por. R. Kierzek, „Własności katalityczne kwasów rybonukleinowych (RNA)”, [w:] J. Barciszewski, K. Łastowski, i T. Twardowski (red.), *Nowe tendencje w biologii molekularnej i inżynierii genetycznej oraz medycynie* (Poznań 1996), str. 139.
- [11] F. Dyson, *Origins of Life* (Cambridge University Press, 1986). (korzystam z tłum. polskiego [12]).
- [12] F. Dyson, *Początki życia*, tłum. P. Golik (PIW, Warszawa 1993), str. 46.
- [13] Por. S. W. Ślaga, „Odrębność żywej materii na przykładzie wirusów”, *Rocz Fil* **XI**, 87–108 (1963).
- [14] S. W. Ślaga, „Powstanie życia wobec genezy i ewolucji wirusów”, *Studia Philosophiae Christianae* **1**, 193–228 (1967).
- [15] Por. np. G. Węgrzyn, „The minimal genome paradox”, *J Appl Genet* **42**, 385–392 (2001).
- [16] K. Kruger, P. J. Grabowski, A. J. Zaugg, J. Sand, D. E. Gottschling, i T. R. Cech, „Self-splicing RNA: autoexcision and autocyclization of the ribosomal RNA intervening sequence of *Tetrahymena*”, *Cell* **31**, 147–157 (1982).
- [17] Por. R. Shapiro, „Prebiotic cytosine synthesis: A critical analysis and implications for the origin of life”, *Proc Natl Acad Sci USA* **96**, 4301–4401 (1999).
- [18] N. Paul, G. Springsteen, i G. F. Joyce, „Conversion of a Ribozyme to a Deoxyribozyme through in Vitro Evolution”, *Chemistry & Biology* **13**, 329–338 (2006).
- [19] K. E. McGinness, M. C. Wright, i G. Joyce, „Continuous In Vitro Evolution of a Ribozyme that Catalyzes Three Successive Nucleotidyl Addition Reactions”, *Chemistry & Biology* **9**, 585–596 (2002).
- [20] J. W. Schopf, *Kolebka życia. O narodzinach i najstarszych śladach życia na Ziemi*, tłum. J. Kaźmierczak (PWN, Warszawa 2002), str. 124. (Wydanie angielskie: [21]).
- [21] J. W. Schopf, *Cradle of Life. The Discovery of Earth's Earliest Fossils* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey 1999).
- [22] Por. A. Ricardo, M. Carrigan, A. Olcott, i S. Benner, „Borate Minerals Stabilize Ribose”, *Science* **303**, 196 (2004).
- [23] N. Lahav, *Biogenesis. Theories of Life's Origin* (Oxford University Press, New York-Oxford 1999), str. 203–204.
- [24] R. M. Hazen, *Genesis. The Scientific Quest for Life's Origin* (Joseph Henry Press, Washington 2005), str. 222.
- [25] L. E. Orgel, „The Origin of Biological Information”, [w:] J. W. Schopf (red.), *Life's Origin. The Beginnings of Biological Evolution* (University of California Press, Berkeley-Los Angeles-London 2002), str. 152–154.
- [26] L. E. Orgel, „Some consequences of the RNA World Hypothesis”, *Orig Life Evol Biosph* **33**, 211–218 (2003).
- [27] K. E. McGinness i G. F. Joyce, „In Search of an RNA Replicase Ribosome”, *Chemistry & Biology* **10**, 5–14 (2003).
- [28] S. L. Miller i H. C. Urey, „Organic compound synthesis on the primitive earth”, *Science* **130**, 249–255 (1959).
- [29] D. W. Deamer i G. R. Fleischaker, *Origins of Life – the Central Concepts* (Jones and Barlett, Boston 1994).
- [30] R. D. Knight i L. F. Landweber, „The early evolution of the genetic code”, *Cell* **101**, 569–572 (2000).
- [31] J. A. Doudna i T. Cech, „The Chemical Repertoire of Natural Ribozymes”, *Nature* **418**, 222–228 (2002).
- [32] T. J. Gibson i A. Lamond, „Metabolic Complexity in the World and Implications for the Origin of Protein Synthesis”, *J Mol Evol* **30**, 7–15 (1990).
- [33] L. Margulis, *Symbiotyczna planeta*, tłum. M. Ryszkiewicz (Wydawnictwo CiS, Warszawa 2000).
- [34] P. U. D.P. Bartel, „Constructing an RNA World”, *Trends Cell Biol* **9**, M9–M13 (1999).
- [35] L. Margulis, *Symbiotic Planet. A New Look at Evolution* (Massachusetts 1998). (Patrz też polskie tłumaczenie [33]).
- [36] Por. J. P. M.T. Madigan, J.M. Matinko, *Brock Biology of Microorganisms* (New Jersey 1997).

