

**Stephane Tirard, Michel Morange,
Antonio Lazcano**

**Definicja życia : krótka historia
nieuchwytnego przedsięwzięcia
naukowego**

Scripta Philosophica. Zeszyty Naukowe Doktorantów Wydziału Filozofii KUL 1,
105-126

2012

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach
dozwolonego użytku.

STEPHANE TIRARD, MICHEL MORANGE,
ANTONIO LAZCANO

DEFINICJA ŻYCIA: KRÓTKA HISTORIA NIEUCHWYTNEGO PRZEDSIĘWZIĘCIA NAUKOWEGO¹

Pomimo spektakularnego rozwoju naszego rozumienia molekularnych podstaw, stanowiących fundament zjawisk biologicznych, wciąż brakuje ogólnie przyjętej definicji życia, choć, na co wskazuje ogromna liczba toczonych dyskusji, uczyniono wszystko, aby taką definicję sformułować². Chociaż fenomenologiczny opis życia jest możliwy, precyzyjna definicja życia pozostaje nieuchwytnym intelektualnym przedsięwzięciem. Nie jest to przypadek wyjątkowy. Jak napisał bowiem kiedyś Nietzsche, istnieją koncepcje, które można zdefiniować, podczas gdy inne mają tylko historię³.

¹ Tłumaczenie na podstawie: S. Tirard, M. Morange, A. Lazcano, *The definition of life: a brief history of an elusive scientific endeavor*, „Astrobiology” 10(2010) nr 10, s. 1003–1009. Za zgodą: ©Mary Ann Liebert, Inc., publishers, New Rochelle, NY 10801-5215 USA.

² Zob. np. *Defining Life: the Central Problem in Theoretical Biology*, red. M. Rizzotti, Padova: University of Padova 1996; C.E. Cleland, C.F. Chyba, *Defining 'Life'*, „Origins of Life and Evolution of the Biosphere” 32(2002) nr 4, s. 387–393; *Fundamentals of Life*, red. G. Palyi, C. Zucchi, L. Caglioti, Paris: Elsevier 2002; R. Popa, *Between Necessity and Probability: Searching for the Definition and Origin of Life*, Berlin: Springer 2004.

³ A. Lazcano, *What is life? A brief historical overview*, „Chemistry & Biodiversity” 5(2008) nr 1, s. 1–15.

Celem niniejszego eseju jest omówienie z historycznego punktu widzenia kilku z wielu (często niezadowolających) definicji życia, które podjęto z różnych perspektyw naukowych, oraz pokazanie, jak kwestia definicji życia była często pomijana w biologii jedynie po to, by później niejednokrotnie do niej powrócić.

Brak definicji życia w niektórych przypadkach może być poważnym obciążeniem dla nauk biologicznych. Widać to na przykład przy intensywnych debatach na temat ostatecznej natury mikroskopijnych struktur marsjańskiego meteorytu Allan Hills 84001, niekończących się dyskusjach na temat żywych lub nie wirusów, a ostatnio przy zaskakujących osiągnięciach biologii syntetycznej, polegających na chemicznym wytworzeniu całego genomu bakterii i jego włączeniu do mykoplazmy⁴. Brak definicji życia jest również zauważalny podczas obciążonych etycznie debat podejmowanych pod wpływem istotnych dokonań z zakresu badań biomedycznych dotyczących, wymieniając tylko kilka przykładów, aborcji, eutanazji oraz organizmów transgenicznych.

Uważa się, że publikacja Schrödingera *What is Life?* zapoczątkowała narodziny biologii molekularnej⁵. Jak opisano poniżej, nie jest to do końca prawdą. W rzeczywistości następująca po publikacji o podwójnej helisie modelu DNA dyskusja o definicji życia znikła z głównego nurtu biologii, ponieważ ta koncentrowała się na molekularnych mechanizmach leżących u podstaw replikacji DNA i syntezy białek. Poszukiwanie wyraźnego rozróżnienia pomiędzy tym, co żywe, a co nie, zanikło w czasie rozwoju biologii molekularnej. Prawdą jest, że kilku wybitnych biologów molekularnych, w tym Crick, Monod i inni⁶, uważało, że problem natury życia został już rozwiązany. Być może dlatego, że dzielili wspólne z innymi przekonanie, według którego fizyka i chemia są wystarczające, aby wyjaśnić nie tylko cechy określające organizmy, ale także sposób

⁴ M. Bedau, *Life after the synthetic cell*, „Nature” 465(2010), s. 422–424; D.W. Deamer, *Life after the synthetic cell*, „Nature” 465(2010), s. 423; D.G. Gibson i inni, *Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome*, „Science” 329(2010), s. 52–56.

⁵ Krytyczne ujęcie tego problemu zob. E.J. Yoxen, *Where does Schrödinger's 'What is life?' belong in the history of molecular biology?*, „History of Science” 17(1979), s. 17–52.

⁶ M. Morange, *The resurrection of life*, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 40(2010) nr 2, s. 179–182.

pojawienia się życia. Jednak ich postawa była często niejednoznaczna. Z jednej strony wielu biologów molekularnych zakładało, że kwestia życia została rozwiązana i że organizmy nie są niczym więcej niż tylko fizykochemicznymi mechanizmami. Z drugiej strony byli oni także przekonani, że sekret życia znajduje się w istnieniu informacji genetycznej i kodu genetycznego przekładającego te informacje, które nie występują w zwykłych fizykochemicznych podmiotach, a zatem są przypisane do specyficznych właściwości organizmów.

Jak wynika z wielu książek i artykułów publikowanych w ciągu ostatnich kilku lat, problem definicji życia nie zniknął, lecz wciąż powraca. Być może jak nigdy wcześniej w historii nauki rozwój nauk biologicznych doprowadził do ponownej dyskusji na temat definicji życia ujętej z nowej perspektywy. Ale nie zawsze był to problem wymagający natychmiastowego rozwiązania. Jak argumentuje się w pracy, od XIX wieku większość prób wyjaśnienia pochodzenia życia nie opierała się na jasno sprecyzowanych definicjach życia, ale głównie na intuicyjnych jego koncepcjach, które nie zawsze były jednoznacznie określone. Różne propozycje dotyczące powstania życia zaproponowane przez Buffona, Lamarcka, Darwina, Huxleya, Oparina lub Haldane'a były częścią ich bardziej rozbudowanych teorii ewolucji, jednak krytyczne, ponowne zbadanie ich prac ujawnia także zróżnicowane koncepcje życia, które stosowali do stworzenia jego precyzyjnej definicji. W rzeczywistości problem ostatecznej natury życia i poszukiwanie jego precyzyjnej definicji wciąż pojawiają się na nowo. Czy problem definicji życia jest podejmowany we współczesnych naukach przyrodniczych? I jakiego typu odpowiedzi są obecnie poszukiwane?

1. RACZEJ KONCEPCJE ŻYCIA NIŻ PRECYZYJNE DEFINICJE

Z perspektywy czasu okazuje się nieco zaskakujące, że od XVIII wieku aż do pierwszej połowy XX wieku niektórzy z najbardziej wpływowych przyrodników i biologów opisywali pochodzenie oraz ewolucję

życia bez podawania jego precyzyjnej definicji, polegając za to na dość ogólnikowych koncepcjach życia, które obejmowały fenomenologiczne opisy i wyjaśnienia⁷. Znaczącym przykładem jest teoria życia francuskiego przyrodnika hrabiego Georges de Buffona (1707–1788), opracowana w *Histoire naturelle*⁸. Opiera się ona na tym, co Buffon nazywał drobinami organicznymi (hipotetyczne jednostki materii nie powinny być mylone z tym, co dzisiaj chemicy nazywają związkami organicznymi), które zostały zużyte i przekształcone przez organizm. Bez faktycznego podania definicji życia Buffon twierdził, że podczas powstawania organizmów żywych takie hipotetyczne cząsteczki były odpowiedzialne za przekazywanie tzw. modelu wewnętrznego, który wskazuje organizację każdego gatunku. Koncepcja gatunków Buffona jest raczej częścią dość szerokiego poglądu na życie i nie należy jej postrzegać tylko jako zbioru istot żyjących w danym czasie, ale również jako pokolenia trwające w czasie, pokolenie po pokoleniu.

Jako fiksycysta Buffon twierdził, że chociaż niewielkie zróżnicowanie może mieć miejsce w obrębie danego gatunku, to jednak nie ma ewolucji. Sugerował, że podczas wczesnych lat historii Ziemi, kiedy planeta ostygła, jednostki nazwane drobinami organicznymi wytwarzały spontanicznie następne pokolenia, które z kolei doprowadziły do powstania różnych gatunków, a każdy z nich był zdefiniowany przez specyficzną wewnętrzną formę. Zainteresowanie Buffona koncentrowało się bardziej na organizacji tych małych jednostek i na koncepcji gatunków niż na zrozumieniu podstawowej natury życia. Brak definicji życia nie niepokoił Buffona, ponieważ dla niego materia wytwarzała to, co nazwał drobinami organicznymi, które – jak zakładał – były najprostszymi formami życia.

Pół wieku później, w 1802 roku Jean-Baptiste Lamarck opisał własną teorię wyjaśniającą przekształcenia gatunków na podstawie ich zwyczajów i roli wpływu środowiska na organizmy. Lamarck zakładał, że proces ewolucyjny zaczął się samorzutnie z najprostszymi żywych istot na skutek animalizacji delikatnej, galaretowatej materii odznaczającej

⁷ S. Tirard, *Origin of life and definition of life, from Buffon to Oparin*, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 40(2010) nr 2, s. 215–220.

⁸ G. Buffon, *Histoire naturelle, générale et particulière*, t. 2, Paris: Imprimerie Royale 1749.

się posiadaniem siły witalnej, rodzajem wzbudzenia materii⁹. Prace Lamarcka stanowią jasno, że dla niego życie nie może być zredukowane do prostej definicji, ale powinno zawierać koncepcję przekształcania organizacji żywych istot i gatunków.

Podobnie jak większość jego poprzedników, Darwin zaproponował wyjaśnienie procesu ewolucyjnego, w którym również brakowało jasno sprecyzowanej definicji życia. Tak samo jak wielu mu współczesnych, Darwin odrzucił pomysł, że rozkład istniejących wcześniej związków organicznych mógł doprowadzić do pojawienia się organizmów. Choć świadomie unikał dyskusji na temat pochodzenia życia w *Origin of Species*, to jednak analiza jego kilku innych tekstów i korespondencji z przyjaciółmi oraz znajomymi pokazuje, że przyjął za oczywiste możliwość naturalnego pojawienia się pierwszych form życia¹⁰ oraz koncepcję, że związki organiczne mogły utworzyć prymitywne i proste istoty żywe. Jego uwagi nie powinny być jednakże odczytywane jako sugerowanie, że dokonywał on rozważań z punktu widzenia chemii prebiotycznej, ale raczej jako uznanie, że luka chemiczna oddzielająca organizmy od form nieożywionych nie była nie do pokonania¹¹.

Dnia 1 lutego 1871 roku Darwin wysłał list do swojego bliskiego przyjaciela Josepha D. Hookera, w którym pisał: „często mówi się, że wszystkie warunki dla powstania pierwszej żywej istoty obecne teraz mogły być od dawna dostępne. Ale jeśli (i ach! cóż to za jeśli) moglibyśmy sobie wyobrazić jakiś ciepły, nieduży staw, gdzie obecne są wszelkiego rodzaju sole zawierające amoniak i fosfor, światło, ciepło, elektryczność, w którym poprzez reakcję chemiczną utworzył się związek białkowy, podatny na jeszcze bardziej złożone zmiany, to obecnie taka materia byłaby natychmiast zjedzona lub wchłonięta, co nie zdarzyłoby się przed powstaniem żywych stworzeń”.

Innymi słowy, Darwin zakładał, że pojawienie się życia stwarza sytuację, która zapobiega tworzeniu się nowego życia¹². Jest to kluczowa

⁹ S. Tirard, *Génération spontanée*, w: *Lamarck: Philosophe de la Nature*, red. P. Corsi, J. Gayon, G. Gohau, S. Tirard, Paris: Presses Universitaires de France 2006, s. 65–104.

¹⁰ J. Peretó, J.L. Bada, A. Lazcano, *Charles Darwin and the origins of life*, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 39(2009) nr 5, s. 395–406.

¹¹ Tamże.

¹² Tamże.

kwestia, gdyż podkreśla nie tylko fakt, że życie jest częścią własnego środowiska, ale także że formowanie i modyfikacje życia w czasie wprowadzają historyczność, a przez to nieodwracalność koncepcji życia.

Z innego punktu widzenia fizyczne i chemiczne cechy ożywionej materii opisał w 1869 roku bliski przyjaciel Darwina Thomas Huxley w swoim słynnym wykładzie *On the Physical Basis of Life*, wykazując znaczenie białkowych elementów w konstytuowaniu tego, co wówczas nazywane było protoplazmą. Nie było to częścią wyraźnej definicji życia, ale koncepcją podstaw życia, która odzwierciedla ekstrapolację fizykochemicznego spojrzenia na zjawiska biologiczne.

Takie ujęcie jest częścią teoretycznych ram określających wkład Aleksandra I. Oparina i Johna B.S. Haldane'a w opis pochodzenia życia jako procesu, który jest częścią globalnego procesu ewolucji. Ewolucyjna perspektywa Oparina i Haldane'a odgrywa obecnie kluczową rolę w kształtowaniu dyskusji na temat pochodzenia życia, podobnie jak sposób, w jaki przedstawili oni niezależnie od siebie podstawowe cechy życia w kontekście procesu wzrostu złożoności materii, choć bez podjęcia nawet próby zdefiniowania życia.

2. CECHY ŻYCIA – KU EMPIRYCZNEJ DEFINICJI?

Chociaż fenomenologiczne opisy są możliwe, precyzyjna definicja życia pozostaje nieuchwytnym przedsięwzięciem intelektualnym. Nie zaskakuje, jak twierdził w przeszłości Immanuel Kant, występowanie precyzyjnych definicji w matematyce i filozofii, ale empiryczne koncepcje (jak ma to miejsce w przypadku pytania, czym jest życie) mogą być jasno eksplikowane jedynie przez opisy, które zależą od kontekstu historycznego¹³. Próby zdefiniowania życia powinny zatem uwzględniać różnice pomiędzy najprostszymi możliwymi formami życia i bardziej złożonymi organizmami, takimi jak rośliny i zwierzęta. Definicje życia muszą być

¹³ I. Fry, *The Emergence of Life on Earth*, New Brunswick: Rutgers University Press 2002.

otwarte i nie mogą być ograniczone przez nasz obecny stan wiedzy. Być może potrzebne jest raczej podanie warunków brzegowych niż precyzyjna definicja. Odpowiedzi na pytanie, czym jest życie, będą dostarczane przez różnych specjalistów pracujących nad różnymi zagadnieniami i z różnych perspektyw, począwszy od początków życia na Ziemi, skończywszy na biologii syntetycznej i poszukiwaniu życia pozaziemskiego. Odpowiedzi będą kontekstowe i dlatego częściowo różne. Jednak nie ma powodu, aby uznawać, że współistnienie różnych odpowiedzi będzie ostatecznym stanem badań i będzie wykluczać a priori możliwe, mocne powiązania między tymi wąsko ukierunkowanymi odpowiedziami¹⁴.

Z punktu widzenia współczesnej biologii prawidłowe zrozumienie minimalnych właściwości wymaganych, aby uznać system za żywy, narzuca konieczność rozpoznania ewolucyjnych procesów, które doprowadziły do powstania samego systemu. Pojawienie się życia było związane z przejściem od czystych reakcji chemicznych do autonomicznych, odtwarzających się bytów zdolnych do ewoluowania na drodze naturalnej selekcji. Jak ten proces przebiegał – nie wiadomo. Nie znamy też natury pierwszych systemów żywych i nie wiemy, w jakim punkcie przeszłości zaistniała różnica pomiędzy chemicznym systemem a pierwszymi prawdziwymi organizmami?

Odkrycie i rozwój aktywności katalitycznych cząsteczek RNA, czyli rybozymów, stanowiło znaczne wsparcie idei „świata RNA” – hipotetycznego, ewolucyjnego etapu poprzedzającego rozwój białek i genomów DNA, podczas którego istniały alternatywne formy życia oparte na rybozymach. Poszczególne typy dowodów na poparcie istnienia świata RNA doprowadziły do zaproponowania tezy, według której punktem wyjścia historii życia na Ziemi było pojawienie się de novo świata RNA z bogatej w nukleotydy prebiotycznej zupy.

Są to skrajnie redukcjonistyczne propozycje sugerujące, że życie może być zredukowane do pojedynczej żywej cząsteczki, to znaczy, że życie może być dobrze zdefiniowane i że dokładny punkt, w którym ono powstało, można utożsamić z nagłym pojawieniem się pierwszej replikującej cząsteczki RNA. Takie poglądy mają długą historię. Podczas obrad okrągłego stołu, który był częścią słynnego Darwin Centennial

¹⁴ M. Morange, *The resurrection of life*.

Discussions zorganizowanego przez Uniwersytet Chicago w 1959 roku, Herman J. Muller powiedział: „myślę, że jedną z najbardziej fundamentalnych właściwości wyróżniających żywą rzecz – która może być z tego powodu użyta do zdefiniowania życia – jest jej zdolność do tworzenia kopii samej siebie. Nazywamy to »reprodukcją« – ale takie kopie muszą również zawierać innowacje – mutacje – które odróżnią żywą rzecz od jej rodziców [...]. Naturalna selekcja nie mogłaby trwać bez niezbędnych podstaw, czyli umiejętności lub zdolności materiału do kopiowania nie tylko siebie, ale także swoich odmian. To, moim zdaniem, jest sercem życia, a taki materiał, gdy powstanie, słusznie jest nazywany »żywym«”¹⁵.

Kryteria zastosowane przez Mullera¹⁶ do określenia życia (reprodukcja, mutacja, a także zdolność do przekazywania mutacji) zostały szybko przez wielu odrzucone¹⁷. Oczywiście brak ogólnie akceptowanej definicji życia czasami sprawia wrażenie, że to, co jest uważane za jego pochodzenie, jest definiowane za pomocą nieprecyzyjnych terminów, co prowadzi do założenia, że cechy, które wyewoluowały kolejno po pojawieniu się życia, są w rzeczywistości pierwotne. Na przykład jeszcze kilka lat temu uważano pochodzenie kodu genetycznego oraz syntezy białek za równoznaczne z pojawieniem się samego życia. Prawdą jest, że istnieją istotne wyjątki. Zaskakujące jest spostrzeżenie Stenta: „Chociaż nie ma pewności, że pierwszymi powielającymi się materiałami genetycznymi powstałymi w pierwotnej zupie dawnych oceanów były kwasy nukleinowe lub jakieś polimery przypominające polinukleotydy, obecnie stało się jasne, że badanie pochodzenia kodu genetycznego – sposobów, według których mógł powstać, bez brania pod uwagę tego, że podobnie jak Atena wyrósł z głowy Zeusa – jest prawdopodobnie najkorzystniejszym sposobem rozwiązania tego problemu”¹⁸.

¹⁵ H.J. Muller, *Panel one: The origin of life*, w: *Evolution after Darwin: Issues in Evolution*, t. 3, red. S. Tax, C. Callender, Chicago: The University of Chicago Press 1959, s. 7.

¹⁶ Tamże.

¹⁷ A. Lazcano, *Historical development of origins of life*, w: *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology: The Origins of Life*, red. D.W. Deamer, J. Szostak, Cold Spring Harbor: Cold Spring Harbor Press 2010, s. 1–16.

¹⁸ G.S. Stent, *That was the Molecular Biology that was*, „Science” 160(1968), s. 390–395.

Dostępne dowody dostarczają znacznego poparcia dla podejścia zaproponowanego przez Stenta. Rzeczywiście, cztery z głównych reakcji obejmujących proces biosyntezy białka, tj. aktywacja aminokwasów, synteza aminoacylo-RNA, tworzenie wiązania peptydowego i oparte na RNA kodowanie, są katalizowane przez rybozomy, a ich komplementarny charakter wskazuje, że po raz pierwszy pojawiły się w świecie RNA¹⁹. To zdecydowanie wspiera hipotezę, że katalizowana przez rybosomy i kodowana przez kwas nukleinowy synteza białka jest wynikiem darwinowskiej selekcji opartych na RNA układów biologicznych, a nie zwykłych fizykochemicznych interakcji, które miały miejsce w prebiotycznym środowisku.

3. ŻYCIE JAKO SAMOPODTRZYMUJĄCY SIĘ SYSTEM

Od XIX wieku metabolizm był uznawany za najważniejszą cechę życia. Takie przekonanie doprowadziło do postrzegania wirusów i innych subkomórkowych struktur biologicznych jako nieożywionych. Z tego powodu Félix d’Herelle – współodkrywca bakteriofagu razem z F. Twortem – usilnie próbował wykazać, że bakteriofagi były w stanie przyswoić obcą materię, co znaczyłoby, że zachodzi w nich metabolizm, a więc są żywymi bytami²⁰. Uznanie, że stale wytwarzane życie jest oparte na sieci anabolicznych i katabolicznych reakcji oraz przepływie energii, doprowadziło Maturanę i Varełę²¹ do zdefiniowania życia jako systemu autopoietycznego, czyli jako bytu określonego przez wewnętrzny proces samopodtrzymywania i samowytwarzania. Jak wskazuje Bernal, życie jest „ucieleśnieniem pewnej ilości samopodtrzymujących się procesów

¹⁹ R.K. Kumar, M. Yarus, *RNA-catalyzed amino acid activation*, „Biochemistry” 40(2001) nr 24, s. 6998–7004.

²⁰ W.C. Summers, *Félix d’Herelle and the Origins of Molecular Biology*, New Haven: Yale University Press 1999.

²¹ H.R. Maturana, F.J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Boston: Reidel 1980.

chemicznych”²². Idea autopoiezy pojawiła się już wcześniej w historii, ale dla Bernala oraz kilku jemu współczesnych badaczy, jak Oparina, ostateczna natura systemów żywych nie mogła być w pełni zrozumiana bez uwzględnienia perspektywy ewolucyjnej²³. Oczywiście powielanie było warunkiem sine qua non dla przetrwania życia, podczas gdy replikacja może być pojmowana jako molekularny mechanizm leżący u podstaw reprodukcji organizmów.

Systemy autopoietyczne są z definicji samopodtrzymujące się i samowytwarzające się. Jednak według Tibora Gántiego samopodtrzymywanie się jest rzeczywistym kryterium dla życia, natomiast reprodukcja jest potencjalnym kryterium²⁴. Choć autopoieza dotyczy i jest ograniczona do minimalnych form życia²⁵, jest to koncepcja w dużej mierze zależna od istnienia metabolizmu, a dla wielu niezależna od perspektywy ewolucyjnej. Komórki i organizmy zbudowane z komórek są autopoietyczne i stale metabolizują, stale wpływają na skład chemiczny ich otoczenia²⁶. Organizmy wielokomórkowe natomiast składają się z jednostek, które są żywymi systemami same w sobie i pozostaną takimi nawet wtedy, gdy cały system zostanie zniszczony²⁷, na co wskazuje na przykład niezwykle sukces transplantacji organów.

Istnieje wiele fizycznych i chemicznych odpowiedników uważanych za autopoietyczne i imitujących niektóre z podstawowych właściwości życia. Jednym z najbardziej interesujących przykładów są samoreplikujące się micle i liposomy opisane przez Piera Luigiego Luisiego i jego współpracowników. Na przykład syntetyczne pęcherzyki utworzone z kwasu kaprylowego, zawierające wodorotlenek litu i stabilizowane przez pochodne kwasu oktanowego, wykazują właściwości katalityczne podczas hydrolizy oktanianu etylu. Powstały kwas kaprylowy jest włączo-

²² J.D. Bernal, *The problem of stages in biopoiesis*, w: *The Origin of Life on the Earth*, red. A.I. Oparin, London: Pergamon Press 1959, s. 38–43.

²³ A. Lazcano, *What is life?*

²⁴ T. Gánti, *The Principles of Life*, Oxford: Oxford University Press 2003.

²⁵ P.L. Luisi, A. Lazcano, F.J. Varela, *What is life? Defining life and the transition to life*, w: *Defining Life: the Central Problem in Theoretical Biology*, red. M. Rizzotti, Padova: University of Padova 1996, s. 149–165.

²⁶ L. Margulis, D. Sagan, *What is Life?*, London: Weidenfeld and Nicholson 1995.

²⁷ E. Szathmáry, M. Santos, C. Fernando, *Evolutionary potential and requirements for minimal protocells*, „Topics in Current Chemistry” 259(2005), s. 167–21.

ny do ściany miceli, co powoduje ich wzrost, a ostatecznie fragmentację w ciągu kilku „pokoleń”²⁸.

Replikacja jest istotną molekularną własnością żywych systemów, ale nie wystarcza do ich zdefiniowania. Odtwarzające się micle i liposomy nie wykazują swoistej genealogii lub filogenezy, które są przypisywane wszystkim formom życia. To samo odnosi się do prionów, których namnażanie ogranicza się do przekazywania fenotypów poprzez samoutrwalanie zmian w konformacjach białek. Jak podkreślił Orgel²⁹, systemy te replikują bez przekazywania informacji, to znaczy nie wykazują mechanizmów dziedziczności, w przeciwieństwie do istot żywych. Wieloznaczność słowa „informacja” spowodowała ogromne zamieszanie. Konieczne jest powrót do definicji podanej przez Francisca Cricka w jego słynnym wykładzie z 1957 roku, w którym ustanowił centralny dogmat biologii molekularnej: „Informacja oznacza tutaj precyzyjne określenie sekwencji albo zasad w kwasie nukleinowym, albo reszt aminokwasowych w białku”³⁰.

Organizmy mogą być uznawane za najważniejszy przykład autopoietycznych systemów³¹. Jednakże właściwości leżące u podstaw samopodtrzymywania się istot żywych są wynikiem procesów historycznych. Biologom trudno przyjąć definicję życia, w której brakuje odniesień darwinowskich. Niezależnie od stopnia złożoności wszystkie istoty żyjące zostały ukształtowane w wyniku długotrwałej ewolucyjnej historii. Dlatego właściwe zrozumienie minimalnych właściwości wymaganych, aby system mógł być uznany za żywy, domaga się poznania procesów ewolucyjnych, które do tego doprowadziły.

²⁸ P.A. Bachmann, P.L. Luisi, J. Lang, *Autocatalytic self-replicating micelles as models for prebiotic structures*, „Nature” 357(2002), s. 57–59.

²⁹ L.E. Orgel, *Self-organizing biochemical cycles*, „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America” 97(2000) nr 23, s. 12503–12507.

³⁰ F.H.C. Crick, *On protein synthesis*, „The Symposia of the Society for Experimental Biology” 12(1958), s. 138–163; M. Morange, *What history tells us XIII. Fifty years of the Central Dogma*, „Journal of Biosciences” 33(2008) nr 2, s. 171–175.

³¹ L. Margulis, D. Sagan, *What is Life?*

4. FIZYKA I DEFINICJA ŻYCIA

W 1944 roku Erwin Schrödinger opublikował swoją słynną książkę *What is Life?* Powszechnie uważa się, że wskazuje ona (zawierając tylko jedno odniesienie do literatury biologicznej) początek zainteresowania fizyków naturą życia i dziedzicznością³². W istocie tak nie jest. Pracę Schrödingera należy traktować jako zwieńczenie długiej tradycji prób wyjaśnienia natury życia w kategoriach czysto fizycznych³³. Widać to na przykładzie różnorodnych XIX-wiecznych prób opisywania systemów żywych, opierających się na magnetyzmie, napięciu powierzchniowym, radioaktywności i na innych zjawiskach fizycznych³⁴. Chociaż wiele z tych prób zawiodło w rozpoznaniu wyjątkowości systemów żywych i roli ewolucji darwinowskiej, to mogą być one postrzegane jako część procesu sekularyzacji nauk o życiu.

Koncepcje Jerome'a Aleksandra, Stephane'a Leduca i Alfonso L. Herrery są typowymi przykładami tej tendencji. Podobnie jak wielu mu współczesnych, meksykanin Alfonso L. Herrera był przekonany, że życie mogło być wytworzone w laboratorium, i zaproponował autotroficzną teorię znaną jako plazmogenez. Herrera poświęcił ponad 50 lat na eksperymentowanie z różnymi rodzajami substancji, próbując „zade-monstrować fizykochemiczne cechy towarzyszące życiu”³⁵. Początkowo używał mieszaniny wody i oleju (lub benzyny), by określić kształt, rozmiar i ruch struktur przypominających komórki. Później dopracował swoją koncepcję i pomimo akademickiej izolacji, w której pracował, rozwinął swoją teorię „plazmogemii”, która próbowała wyjaśnić pochodzenie pierwotnej, fotosyntetyzującej protoplazmy. Założenia teorii zaowocowały podjęciem eksperymentów z formaldehydem i pochodnymi cyjanowodoru (np. NH_4SCN)³⁶, które jak teraz wiemy, powodują powstanie cukrów i bardzo kolorowych polimerów, które Herrera niestety pomylił

³² Por. E.J. Yoxen, *Where does Schroedinger's*.

³³ A. Lazcano, *What is life?*

³⁴ E.F. Keller, *Making Sense of Life: Explaining Biological Development with Models, Metaphors, And Machines*, Cambridge: Harvard University Press 2002.

³⁵ A.L. Herrera, *Note sur l'imitation du protoplasme*, „Bulletin de la Société zoologique de France” 26(1902), s. 144–149.

³⁶ Tenze, *A new theory on the origin and nature of life*, „Science” 96(1942), s. 14–15.

z fotosyntetyzującymi barwnikami³⁷. Prawdopodobnie najwspanialsze opisy takich prób nie znajdują się w raportach naukowych, ale w próbach wskrzeszenia życia przez ponurego Adriana Leverkühna, które tak doskonale opisuje Tomasz Mann w powieści *Doktor Faustus*.

Książka Schrödingera, z drugiej strony, zapowiadała intensywność współczesnych prób ekstrapolacji do biologii głęboko zakorzenionej tendencji fizyków do wyszukiwania praw ujmujących wszystko, które mogą być częścią wielkiej teorii obejmującej wiele, jeśli nie wszystkie, złożonych systemów. Współczesne próby wyjaśnienia natury życia na podstawie teorii złożoności i zjawiska samouporządkowania mogą być w pewnym sensie pojmowane jako część tej głęboko zakorzenionej tradycji intelektualnej³⁸. Niestety w niektórych przypadkach zwrot w kierunku samoródtwa czai się za odwołaniami do niezdefiniowanych „nowo powstających właściwości” lub „zasad samoorganizacji”, które są podstawą wielkich uogólnień, a te niewiele mają wspólnego z rzeczywistymi zjawiskami biologicznymi³⁹. Porównanie powstania życia do przenikania fizycznego systemu jest wspaniałą metaforą, a nie poprawnym wyjaśnieniem⁴⁰.

Samoorganizacja i złożoność nie są czymś unikalnym dla biologii i mogą być przypisane wielu różnym systemom, w tym komputerowo generowanym automatom komórkowym, złożonym modelom przepływu różnych płynów, jak tornada, cyklicznym zjawiskom chemicznym (jak reakcja Biełousowa-Żabotyńskiego i reakcja formozowa) oraz organizacji cząsteczek lipidowych w warstwach bimolekularnych, micelach i liposomach⁴¹. Istnieją pewne wspólne cechy wymienionych systemów samoorganizujących się i, jak stwierdziło wielu teoretyków, podlegają one ogólnym zasadom, tożsamym z uniwersalnymi prawami natury. Być może jest to

³⁷ L. Perezgasga, E.Silva, A. Lazcano, A. Negrón-Mendoza, *Herrera's sulfocyanic theory on the origin of life: a critical reappraisal*, „International Journal of Astrobiology” 2(2003) nr 4, s. 1–6.

³⁸ E.F. Keller, *Making Sense of Life*.

³⁹ T. Fenchel, *Origin and Early Evolution of Life*, Oxford: Oxford University Press 2002; A. Lazcano, *Historical development*.

⁴⁰ M. Morange, *Life Explained*, New Haven: Yale University Press 2008.

⁴¹ Por. D.J. Farmer, *Cool is not enough*, „Nature” 436(2005), s. 627–628.

prawda. Problem polega na tym, jak podkreślił Farmer⁴², że takie obejmujące wszystko zasady, o ile istnieją w ogóle, do tej pory nie zostały odkryte.

Takie podejście doprowadziło do powstania wielu modeli teoretycznych i wniosków na temat pochodzenia i natury życia, które można uznać w pewnym sensie za teoretyczny odpowiednik propozycji Leduca i Herrery, „uszlachetnionej” dzięki współczesnej renomie podejścia matematycznego i modelowania komputerowego. Niektóre z tych prób opierają się na założeniach, że życie jest stale odnawiającym się, złożonym, interakcyjnym systemem, jaki powstał: jako samoorganizujące się cykle metaboliczne niewymagające do istnienia genetycznych polimerów; lub w wyniku katalizy krzyżowej lipidopodobnych cząsteczek pochodzenia prebiotycznego, które z kolei doprowadziły do wzrostu i rozszczepienia niekowalencyjnych, protokomórkowych zespołów wykazujących podobne do żywych form właściwości⁴³.

Jednakże najważniejsi biolodzy ewolucyjni i „prebiotyczni” chemicy są ostrożni z wyjaśnieniami opierającymi się na założeniu, że powstanie życia było wynikiem ponadczasowych zasad matematycznych lub fizycznych, według których replikacja, selekcja i adaptacja nie odgrywają żadnej roli. Oczywiście mogą się mylić. Taki brak zainteresowania nie oznacza przekonania, że naturalne procesy, które doprowadziły do powstania pierwszych form życia, są zwolnione z ograniczeń narzucanych przez fizykę lub że wyjaśnienia dotyczące pojawienia się życia powinny być ograniczone do kwestii powstania kwasów nukleinowych lub ich prekursorów. Mimo wielu fascynujących teoretycznych i eksperymentalnych analogów⁴⁴ wiedza o biologii sugeruje, że zasadnicze cechy systemów żywych nie mogłyby pojawić się bez materiału genetycznego odpowiadającego za przechowywanie, ekspresję i przekazywanie, dzięki replikacji, potomstwu informacji, która podlega zmianom ewolucyjnym.

⁴² Tamże.

⁴³ Zob. np. S.A. Kauffman, *The Origins of Order: Self Organization and Selection in Evolution*, New York: Oxford University Press 1993; D. Segré, D. Ben-Eli, D.W. Deamer, D. Lancet, *The lipid world*, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 31(2001) nr 1–2, s. 119–145.

⁴⁴ H.J. Morowitz, *Beginnings of Cellular Life: Metabolism Recapitulates Biogenesis*, Binghamton: Yale University Press 1992; S.A. Kauffman, *The Origins of Order*; D. Segré, D. Ben-Eli, D.W. Deamer, D. Lancet, *The lipid world*.

Fundamentalne założenie przekonania, według którego szlaki metaboliczne powstały przed genetycznymi komponentami, opiera się na hipotezie, że istnieją wewnętrzne fenotypowe prawa zakorzenione w procesach fizycznych, to znaczy w powstających, samoorganizujących się systemach⁴⁵. Niestety skomplikowane modele obiecywały dużo, ale nie dostarczyły zbyt wiele. Dowód potwierdzający spontaniczne powstanie układu katalitycznego i replikacji metabolicznej byłby faktycznie ekscytujący, jeśli mógłby być zademonstrowany. Dotychczas nie ma dowodu, że metaboliczne cykle mogły spontanicznie samoorganizować się, a tym bardziej replikować, ulegać mutacjom i ewoluować.

Prawdą jest, że dokonano abiotycznej syntezy kilku podstawowych metabolicznych półproduktów w warunkach laboratoryjnych przypominających te panujące w kominach hydrotermalnych lub innych ekstremalnych środowiskach. Ponadto łatwo założyć, że prebiotyczne związki organiczne uległy wielu skomplikowanym przekształceniom. Jednak spostrzeżenia te nie dowodzą, że samoorganizacja takich związków doprowadziła do powstania szlaków metabolicznych przed pojawieniem się materiału genetycznego. W rzeczywistości dostępne dowody eksperymentalne wykorzystane do poparcia teorii „najpierw metabolizm”⁴⁶ są równie zgodne z „najpierw genetycznym” opisem życia. Systemy takie nie oznaczają same w sobie, że pierwotny metabolizm powstał przed genetycznymi polimerami i mogą być wyjaśnione przez zaktualizowaną wersję hipotezy heterotroficznej, potwierdzającej wkład różnorodnych środowisk, w których powstały w sposób abiotyczny związki organiczne⁴⁷.

⁴⁵ Por. S.A. Kauffman, *The Origins of Order*.

⁴⁶ Poglądy na rozwój życia z materii nieożywionej można podzielić na dwie klasy – hipotezy „najpierw replikator”, według których przypadkowo powstała duża cząsteczka zdolna do replikacji (np. RNA), i hipotezy „najpierw metabolizm”, według których małe cząsteczki utworzyły ewoluującą sieć reakcji napędzanych przez źródło energii (przyp. tłumacza).

⁴⁷ A. Lazcano, *Historical development; tenże, Which way to life?*, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 40(2010) nr 2, s. 161–167.

5. EWOLUCJA DARWINOWSKA I DEFINICJA ŻYCIA

Po rozmowach Bernala z Einsteinem w 1946 roku w Princeton, dotyczących zasadniczej jedności życia na Ziemi pod względem procesów biochemicznych, Bernal napisał, że „życie zawiera odmienny element, logicznie inny od występujących ówczesznie w fizyce, bynajmniej nie mityczny, ale element historii. Zjawiska biologii muszą być [...] zależne od wydarzeń. W konsekwencji jednostka życia jest częścią historii życia, a tym samym bierze udział w jego pochodzeniu”⁴⁸. Historia w biologii zakłada genealogię i w dłuższej perspektywie filogenezę⁴⁹. Filogeneza wymaga wewnątrzkomórkowego, genetycznego aparatu umożliwiającego przechowywanie, ekspresję i przekazywanie, dzięki reprodukcji, informacji potomstwu, która podlega zmianom ewolucyjnym. Biologom trudno wyobrazić sobie, jak ten proces mógł się rozpocząć bez genetycznych cząsteczek, których chemiczny charakter nie powinien być ograniczony do kwasów nukleinowych występujących w istniejących formach żywych.

Dobrym wyjaśnieniem może tu być stwierdzenie, że ewolucja darwinowska jest niezbędną do zrozumienia natury samego życia. Ale czy to wystarczy? Życie może być zdefiniowane jako samopodtrzymujący się system chemiczny (np. system, który włącza zasoby do własnych elementów budulcowych), zdolny podlegać darwinowskiej ewolucji⁵⁰. Taka definicja życia oznacza, że organizmy autotroficzne, tj. sinice i rośliny, są oczywiście organizmami ożywionymi. Ale co z pierwszymi formami życia? Oczywiście, jeśli na samym swym początku życie było już samowystarczalnym podmiotem zdolnym do przekształcania zasobów zewnętrznych w swoje elementy składowe, wobec tego musiało być wyposażone w jakieś pierwotne szlaki metaboliczne, które umożliwiły mu wykorzystywanie surowców z otoczenia (tj. CO₂ i N₂). Alternatywnie pierwszymi żywymi jednostkami były układy podlegające darwinowskiej ewolucji (np. obdarzone genetycznymi polimerami zdolnymi do replikacji i dziedziczenia), których samowystarczalne właściwości zależały od dostępności cząsteczek

⁴⁸ A. Brown, *J.D. Bernal: the Sage of Science*, Oxford: Oxford University Press 2005.

⁴⁹ A. Lazcano, *What is life?*

⁵⁰ Por. G.F. Joyce, *Foreword*, w: *Origins of Life: The Central Concepts*, red. D.W. Deamer, G. Fleischaker, Boston: Jones and Bartlett 1994.

organicznych obecnych w pierwotnym środowisku. Chociaż należy to rozumieć jako zaktualizowaną wersję hipotezy prebiotycznej zupy i heterotroficznego pochodzenia życia, osoby badające pochodzenie życia muszą zastanowić się nie tylko, w jaki sposób pojawiły się systemy replikujące, ale także w jaki sposób doszło do zamknięcia ich wewnątrz komórki i jak ewoluowały pierwotne szlaki metaboliczne⁵¹.

WNIOSKI

Próby sformułowania definicji żywych systemów prowadzą często tylko do fenomenologicznych opisów życia, z kolei te są redukowane zaledwie do listy zaobserwowanych (lub wywnioskowanych) właściwości. Spisy te są nie tylko niezadowolające z epistemologicznego punktu widzenia, mogą też również łatwo stać się nieaktualne i pozbawione kryteriów, według których można by kwestię życia (i jego śladów) zdefiniować⁵².

Badanie pochodzenia i natury życia jest skazane na pozostanie, w najlepszym wypadku, pracą w toku. Trudno znaleźć definicję życia zaakceptowaną przez wszystkich, ale historia biologii pokazała, że niektóre działania są o wiele bardziej owocne niż inne. Według Goulda zrozumienie natury życia wymaga uznania zarówno granic określonych przez prawa fizyki i chemii, jak również przypadkowości historii⁵³.

Łatwo docenić atrakcyjność systemu autopoietycznego i teorii złożoności, gdy próbuje się zrozumieć podstawową naturę systemów żywych. Wyszukane modele teoretyczne pochodzące z teorii samoorganizacji nie zostały poparte jednoznacznymi dowodami empirycznymi wykazującymi, że system dużych lub małych cząsteczek może spontanicznie powstać i ewoluować w niegenetyczne sieci katalityczne. Prawdą jest,

⁵¹ A. Lazcano, *What is life?*

⁵² J.D. Oliver, R.S. Perry, *Definitely life but not definitively*, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 36(2006) nr 5–6, s. 515–521.

⁵³ S.J. Gould, ‘*What is life?*’ as a problem in history, w: *What is Life? The Next Fifty Years*, red. M.P. Murphy, L.A.J. O’Neill, Cambridge: Cambridge University Press 1995, s. 25–39.

że wiele właściwości przypisywanych komórkom obserwuje się również w systemach niebiologicznych, np. kataliza, kierowana przez matrycę reakcja polimeryzacji i samoorganizacja lipidowych cząsteczek lub tornad. Tak jak ogień, życie potrafi mnożyć się i wymieniać materię i energię ze swoim otoczeniem. Systemy żywe mają właściwości autopoietycznych, samouporządkowanych, replikujących się systemów chemicznych. Istnieje jednak rozróżnienie pomiędzy czysto fizykochemiczną ewolucją a doborem naturalnym, który jest jedną z cech biologicznych. Mimo wielu opublikowanych komentarzy podstawowa natura życia nie może być zrozumiana bez materiału genetycznego oraz darwinowskiej ewolucji i uzasadnione jest przypuszczenie, że była to jedna z właściwości definiujących powstałe pierwsze systemy biologiczne.

Hipotezy, według których pierwszy system biologiczny był pojedynczą cząsteczką zdolną do replikacji, mutacji i przekazywania dziedzicznych zmian swojemu potomstwu, mogą dowodzić, że życie zaczęło się, gdy taki związek powstał⁵⁴. Jednak jeśli pochodzenie życia jest postrzegane jako stopniowe (ale niekoniecznie wolne), rozwojowe przejście między nieożywionym a żywym, to systemy biologiczne są wynikiem ewolucyjnego procesu, którego nie można wyjaśnić samoródtwem. Nadal nie znamy ważnych procesów poprzedzających życie, ale istnieją mocne dowody ewolucyjnego kontinuum, które płynnie łączy syntezę prebiotyczną i akumulację cząsteczek organicznych w pierwotnym środowisku z pojawieniem się samowystarczalnych, replikujących systemów chemicznych podlegających darwinowskiej ewolucji. Innymi słowy, pojawienie się życia na Ziemi powinno być postrzegane jako ewolucyjny wynik procesu, a nie pojedyncze, przypadkowe zdarzenie.

W pewnym sensie wszyscy próbujący zdefiniować życie mogą mieć rację, ale tylko częściowo. Życie jest na pewno złożonym, termodynamicznie otwartym system autopoietycznym podlegającym darwinowskiej ewolucji, ale musimy zrozumieć, jak te dobrze zdefiniowane cechy pojawiły się i połączyły. W ciągu ostatnich pięćdziesięciu lat nastąpiła tu znacząca zmiana. Poszukiwanie zasad życia przekształciło się w historyczny problem. Pytanie nie brzmi już „jakie cechy przypisane są organizmom,

⁵⁴ H.J. Muller, *Panel one*.

a jakie przedmiotom nieożywionym?” ale „jak te cechy zostały stopniowo powiązane z obiektami, które nazywamy organizmami?”⁵⁵.

Jak podsumowano w innym miejscu⁵⁶, uznanie, że życie jest wynikiem ewolucyjnego procesu ograniczonego przez prawa fizyki i chemii, może prowadzić do akceptacji tezy mówiącej, że wiele właściwości związanych z systemami żywymi, tj. replikacji, samoorganizacji lub katalizy, cechuje także jednostki nieożywione. Niektóre systemy nie mogą być „półżywe”, ale mogą wykazywać pewne właściwości, które my łączymy z życiem, np. samoorganizacja, replikacja lub darwinowska ewolucja. Istnienie pośrednich bytów jest konsekwencją istnienia dwóch dobrze określonych kategorii i to nie uchyla ich istnienia: dowód na pośrednie byty pomoże zdefiniować te dwie kategorie precyzyjniej. To pozwala nam dyskutować np. o tym, czy wirusy są żywe, z nowej perspektywy. Pytanie to pojawiło się ponownie wraz z wyizolowaniem gigantycznych wirusów oraz nagromadzeniem danych ukazujących bogactwo i różnorodność świata wirusów. Wirusy były prawdopodobnie bardzo ważnymi aktorami w ewolucji, szczególnie podczas jej pierwszych etapów, przenosząc geny z jednego organizmu na drugi. Ale nie posiadają one metabolizmu oraz zdolności syntetyzowania. Nazywanie ich żywymi powoduje powstanie niejasności. Znajdują się one oczywiście po nieożywionej stronie bariery między światem żywym a nieożywionym.

Francis Crick i Jacques Monod nie mylili się, gdy twierdzili, że rozwiązano tajemnicę życia i wyjaśniono molekularne cechy organizmów⁵⁷. Kwestia życia nie jest już tajemnicą. Pytanie, jakie musimy zadać, gdy dociekamy natury życia, nie brzmi już „jakie cechy są odnajdywane w organizmach, a jakie w przedmiotach nieożywionych?”, ale „jak te cechy stopniowo związały się z obiektami, które nazywamy organizmami?” Brakuje nam definicji życia, ale nie należy zapominać, że w nauce najbardziej interesującą mogą być właśnie pytania, na które nie można odpowiedzieć.

Z języka angielskiego przełożyła
Urszula K. Czyżewska

⁵⁵ M. Morange, *Life Explained*.

⁵⁶ A. Lazcano, *What is life?*

⁵⁷ M. Morange, *Life Explained*.

BIBLIOGRAFIA

- Bachmann P.A., Luisi P.L., Lang J., Autocatalytic self-replicating micelles as models for prebiotic structures, „Nature” 357(2002), s. 57–59.
- Bedau M., Life after the synthetic cell, „Nature” 465(2010), s. 422–424.
- Bernal J.D., The problem of stages in biopoiesis, w: *The Origin of Life on the Earth*, red. A.I. Oparin, Londyn: Pergamon Press 1959, s. 38–43.
- Brown A., J.D. Bernal: the Sage of Science, Oksford: Oxford University Press 2005.
- Buffon G., *Histoire naturelle, générale et particulière*, t. 2, Paryż: Imprimerie Royale 1749.
- Cleland C.E., Chyba C.F., Defining ‘Life’, „Origins of Life and Evolution of the Biosphere” 32(2002) nr 4, s. 387–393.
- Crick F.H.C., On protein synthesis, „The Symposia of the Society for Experimental Biology” 12(1958), s. 138–163.
- Deamer D.W., Life after the synthetic cell, „Nature” 465(2010), s. 423.
- Defining Life: the Central Problem in Theoretical Biology*, red. M. Riz-zotti, Padwa: University of Padova 1996.
- Farmer D.J., Cool is not enough, „Nature” 436(2005), s. 627–628.
- Fenchel T., *Origin and Early Evolution of Life*, Oksford: Oxford University Press 2002.
- Fry I., *The Emergence of Life on Earth*, Nowy Brunswick: Rutgers University Press 2002.
- Fundamentals of Life*, red. G. Palyi, C. Zucchi, L. Caglioti, Paryż: Elsevier 2002.
- Gánti T., *The Principles of Life*, Oksford: Oxford University Press 2003.
- Gibson D.G., Glass J.I., Lartigue C., Noskov V.N., Chuang R.Y., Algire M.A., Benders G.A., Montague M.G., Ma L., Moodie M.M., Merryman C., Vashee S., Krishnakumar R., Assad-Garcia N., Andrews-Pfannkoch C., Denisova E.A., Young L., Qi Z.Q., Segall-Shapiro T.H., Calvey C.H., Parmar P.P., Hutchison C.A., III, Smith H.O., Venter J.C., Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome, „Science” 329(2010), s. 52–56.

- Gould S.J., 'What is life?' as a problem in history, w: *What is Life? The Next Fifty Years*, red. M.P. Murphy, L.A.J. O'Neill, Cambridge: Cambridge University Press 1995, s. 25–39.
- Herrera A.L., Note sur l'imitation du protoplasme, „Bulletin de la Société zoologique de France” 26(1902), s. 144–149.
- Herrera A.L., A new theory on the origin and nature of life, „Science” 96(1942), s. 14–15.
- Joyce G.F., Foreword, w: *Origins of Life: The Central Concepts*, red. D.W. Deamer, G. Fleischaker, Boston: Jones and Bartlett 1994.
- Kauffman S.A., *The Origins of Order: Self Organization and Selection in Evolution*, Nowy Jork: Oxford University Press 1993.
- Keller E.F., *Making Sense of Life: Explaining Biological Development with Models, Metaphors, And Machines*, Cambridge: Harvard University Press 2002.
- Kumar R.K., Yarus M., RNA-catalyzed amino acid activation, „Biochemistry” 40(2001) nr 24, s. 6998–7004.
- Lamarck J.-B., *Recherches sur l'organisation des corps vivants*, Paryż: Maillard 1802.
- Lazcano A., Historical development of origins of life, w: *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology: The Origins of Life*, red. D.W. Deamer, J. Szostak, Cold Spring Harbor: Cold Spring Harbor Press 2010, s. 1–16.
- Lazcano A., What is life? A brief historical overview, „Chemistry & Biodiversity” 5(2008) nr 1, s. 1–15.
- Lazcano A., Which way to life?, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 40(2010) nr 2, s. 161–167.
- Luisi P.L., Lazcano A., Varela F.J., What is life? Defining life and the transition to life, w: *Defining Life: the Central Problem in Theoretical Biology*, red. M. Rizzotti, Padwa: University of Padova 1996, s. 149–165.
- Margulis L., Sagan D., *What is Life?*, Londyn: Weidenfeld and Nicholson 1995.
- Maturana H.R., Varela F.J., *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Boston: Reidel 1980.
- Morange M., *Life Explained*, New Haven: Yale University Press 2008.
- Morange M., The resurrection of life, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 40(2010) nr 2, s. 179–182.

- Morange M., What history tells us XIII. Fifty years of the Central Dogma, „Journal of Biosciences” 33(2008) nr 2, s. 171–175.
- Morowitz H.J., *Beginnings of Cellular Life: Metabolism Recapitulates Biogenesis*, Binghamton: Yale University Press 1992.
- Muller H.J., Panel one: The origin of life, w: *Evolution after Darwin: Issues in Evolution*, t. 3, red. S. Tax, C. Callender, Chicago: The University of Chicago Press 1959, s. 71.
- Oliver J.D., Perry R.S., Definitely life but not definitively, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 36(2006) nr 5–6, s. 515–521.
- Orgel L.E., Self-organizing biochemical cycles, „Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America” 97(2000) nr 23, s. 12503–12507.
- Peretó J., Bada J.L., Lazcano A., Charles Darwin and the origins of life, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 39(2009) nr 5, s. 395–406.
- Perezgasga L., Silva E., Lazcano A., Negrón-Mendoza A., Herrera’s sulfocyanic theory on the origin of life: a critical reappraisal, „International Journal of Astrobiology” 2(2003) nr 4, s. 1–6.
- Popa R., *Between Necessity and Probability: Searching for the Definition and Origin of Life*, Berlin: Springer 2004.
- Segré D., Ben-Eli D., Deamer D.W., Lancet D., The lipid world, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 31(2001) nr 1–2, s. 119–145.
- Stent G.S., That was the Molecular Biology that was, „Science” 160(1968), s. 390–395.
- Summers W.C., *Félix d’Herelle and the Origins of Molecular Biology*, New Haven: Yale University Press 1999.
- Szathmáry E., Santos M., Fernando C., Evolutionary potential and requirements for minimal protocells, „Topics in Current Chemistry” 259(2005), s. 167–211.
- Tirard S., *Génération spontanée*, w: *Lamarck: Philosophe de la Nature*, red. P. Corsi, J. Gayon, G. Gohau, S. Tirard, Paryż: Presses Universitaires de France 2006, s. 65–104.
- Tirard S., Origin of life and definition of life, from Buffon to Oparin, „Origins of Life and Evolution of Biospheres” 40(2010) nr 2, s. 215–220.
- Yoxen E.J., Where does Schrödinger’s ‘What is life?’ belong in the history of molecular biology?, „History of Science” 17(1979), s. 17–52.