# Szósta rewolucja biologiczna: od molekuł do systemów

**AUTOR**

Fundacja Dobre Państwo

**STRESZCZENIE / ABSTRACT**

Współczesna biologia przechodzi fundamentalną transformację, odchodząc od wiktoriańskiego modelu katalogowania organizmów na rzecz rygorystycznej teorii organizacji. Autorzy artykułu argumentują, że zrozumienie życia wymaga dziś narzędzi z zakresu biologii systemowej, matematyki oraz teorii układów złożonych. Tekst analizuje mechanizmy morfogenezy, filotaksji oraz geometrii wielowymiarowej, które pozwalają na głębszy wgląd w strukturę i stabilność organizmów. W obliczu wyzwań związanych z danymi wieloskalowymi, konieczne staje się wypracowanie nowej epistemologii hybrydowej, łączącej tradycyjne metody badawcze z zaawansowanym uczeniem maszynowym. To przejście od molekularnego redukcjonizmu do holistycznego ujęcia systemowego stanowi istotę szóstej rewolucji biologicznej, zmieniając nasze postrzeganie genetyki i dynamiki nieliniowej w przyrodzie.

Contemporary biology is undergoing a fundamental transformation, moving away from the Victorian model of cataloging organisms and toward a rigorous organizational theory. The authors argue that understanding life today requires tools from systems biology, mathematics, and the theory of complex systems. The text examines the mechanisms of morphogenesis, phyllotaxis, and multidimensional geometry, which allow for deeper insights into the structure and stability of organisms. Faced with the challenges of multiscale data, it is imperative to develop a new hybrid epistemology that combines traditional research methods with advanced machine learning. This shift from molecular reductionism to a holistic systems approach constitutes the essence of the sixth biological revolution, transforming our understanding of genetics and nonlinear dynamics in nature.

Współczesna biologia przechodzi radykalną transformację, którą można określić mianem szóstej rewolucji naukowej. Autor tekstu przekonuje, że tradycyjne podejście, opierające się na katalogowaniu części składowych organizmu i redukcjonistycznym

odczytywaniu kodu genetycznego, wyczerpało swój potencjał poznawczy. Życie nie jest już postrzegane jako suma chemicznych komponentów, lecz jako wyrafinowany, dynamiczny ustrój relacji, sieci i sprzężeń zwrotnych. W tym nowym paradygmacie matematyka – od teorii sieci i topologii po dynamikę nieliniową – przestaje być jedynie narzędziem opisu, stając się kluczowym architektem rozumienia procesów biologicznych. Autor stawia tezę, że organizm to przede wszystkim złożony porządek normatywny, który aktywnie zarządza swoją formą w warunkach permanentnej zmiany. Ta zmiana perspektywy zmusza nas do porzucenia poznawczej bierności i asekuranctwa. Autor postuluje odejście od antropocentrycznego i ziemiocentrycznego modelu biologii na rzecz uniwersalnej nauki o formach organizacji materii. W obliczu wyzwań astrobiologii i systemowego modelowania, biologia staje się potężną, rygorystyczną nauką o strukturach ukrytych możliwości, która rzuca wyzwanie nie tylko naszemu rozumieniu przyrody, ale i fundamentom naszej kultury politycznej oraz ekonomicznej.

**SŁOWA KLUCZOWE**

szósta rewolucja biologiczna | biologia systemowa | morfogeneza | filotaksja | geometria wielowymiarowa | dynamika nieliniowa | układy złożone | epistemologia hybrydowa | reakcja z dyfuzją | sterowalność chaosu | architektura wirusa | biologia matematyczna | struktury ukrytych możliwości | efekty sieciowe | złożoność biologiczna

## Biologia systemowa: koniec ery redukcjonizmu

Biologia osiągnęła prawdziwą dojrzałość dopiero w momencie, gdy przestała przypominać wiktoriańskie muzeum osobliwości, a zaczęła stawać się rygorystyczną teorią organizacji. Wcześniej funkcjonowała niczym prymitywna biurokracja: skrupulatnie katalogowała napotkane byty, porządkowała ich powierzchowne podobieństwa, śledziła zawiłe rodowody i rozszczepiała mechanizmy dziedziczenia, aż w końcu zeszła do poziomu molekularnego kodu. Dziś jednak ten potężny gmach wiedzy przechodzi kolejne, niezwykle głębokie przesilenie, ponieważ coraz wyraźniej widać, że sama chemia życia, choć absolutnie konieczna, nie jest już interpretacyjnie wystarczająca. Współczesny paradygmat naukowy przesuwa punkt ciężkości z pytania o materialny składnik na fundamentalne kwestie ustrojowe, pytając o organizację, dynamikę, sieciowość i wieloskalową sterowalność procesów. W efekcie matematyka przestała być zaledwie posłusznym

rachmistrzem od danych, a stała się głównym architektem rozumienia, bez którego dzisiejsza biologia systemowa nie mogłaby funkcjonować jako spójna, holistyczna rama badawcza.

Dlatego teza o szóstej rewolucji biologicznej zasługuje nie na kurtuazyjne przytaknięcie, lecz na pełną, żarliwą obronę w świecie akademickim. Nie dzieje się tak dlatego, że matematyka rzekomo zastąpi nam fizyczne laboratorium, lecz z dużo bardziej prozaicznego powodu – bez niej laboratorium coraz częściej po prostu nie wie, czego właściwie szuka. Współczesne nauki o życiu nie mogą być już rozumiane jako prosta suma genetyki, biochemii i nowoczesnego obrazowania, ponieważ są dziś przede wszystkim naukami o układach złożonych, przypominającymi w swojej naturze globalną ekonomię. Własności całości w żadnym wypadku nie redukują się tam do własności poszczególnych części, co oznacza, że biolog lekceważący dynamikę nieliniową czy teorię sieci coraz częściej przypomina jedynie biernego notariusza rzeczywistości. To jest właśnie ten krytyczny moment, w którym centryczna ostrożność intelektualna staje się formą bierności poznawczej, a nauka, zamiast kolejnych księgowych faktów, dramatycznie potrzebuje odwagi pojęciowej.

Pierwsza wielka rewolucja biologiczna była rewolucją skali, gdy mikroskop uczynił widzialnym to, co wcześniej pozostawało ontologicznie niedostępne dla ludzkiego oka. Z kolei druga rewolucja była rewolucją porządku, niemal prawną kodyfikacją natury, w której Linneusz z całą chłodną suwerennością klasyfikatora nadał przyrodzie nazwę, rangę i logiczną przejrzystość. Trzecia i czwarta rewolucja, napędzane przełomowymi odkryciami Darwina i Mendla, wprowadziły do biologii historyczny wymiar bezlitosnej selekcji oraz bezwzględny rachunek prawdopodobieństwa w dziedziczeniu. Piąta zaś była rewolucją kodu, pozwalającą zobaczyć życie jako proces nieustannego kopiowania i nieuniknionego błędu, co ostatecznie przesunęło biologię z poziomu biernego widzenia na poziom głębokiego rozumienia. Szósta rewolucja uczy nas jednak, że podobnie jak najdoskonalsza konstytucja nie tworzy jeszcze sprawnie funkcjonującego państwa, tak sam zapis genetyczny bez dynamiki pozostaje tylko martwym archiwum.

## Matematyka: fundament architektury życia

Zaczyna się spór naprawdę istotny, który bezwzględnie wymaga od nas porzucenia poznawczej bierności. Biologia molekularna przyzwyczaiła nas do wygodnej metafory, wedle której organizm jest posłusznym wykonawcą programu zapisanego w genomie. Ta wizja była produktywna, niemniej dziś coraz wyraźniej dostrzegamy jej niebezpieczne uproszczenie, wszak genom nie stanowi suwerennego, legislacyjnego centrum bytu. Jest on raczej uczestnikiem skomplikowanego ładu normatywnego, w którym znaczenie mają gradienty chemiczne, napięcia mechaniczne,

ograniczenia topologiczne oraz historia układu. Jeżeli wolno zapożyczyć język prawa i ekonomii, gen z pewnością nie jest autokratą. Stanowi on zaledwie jednego z aktorów w wielopoziomowym porządku instytucjonalnym, w którym realną sprawczość wytwarza dopiero gra reguł, sprzężeń zwrotnych i kosztów przejścia.

Ta fundamentalna zmiana perspektywy nie jest wyłącznie egzotycznym kaprysem kilku matematyków zapatrzonych w równania. Stanowi ona recepcję głębokiej transformacji współczesnej nauki, zmuszając nas do intelektualnego rygoru. Najnowsze przeglądy z zakresu biologii systemowej, czyli dziedziny badającej organizmy jako zintegrowane sieci, podkreślają konieczność łączenia danych przestrzennych, czasowych i wieloskalowych. Samo modelowanie musi dziś nierozerwalnie łączyć wiedzę mechanistyczną z narzędziami uczenia maszynowego, przy czym kluczowe pozostaje zachowanie interpretowalności. Innymi słowy, nie wystarcza nam już ani goły eksperyment, ani goła predykcja. Potrzebna jest epistemologia hybrydowa, w której mechanizm i dane pracują wspólnie, a matematyka staje się narzędziem negocjacji między nimi.

Nieprzypadkowo na gruncie Fundacji Dobre Państwo pojawia się mocny akcent położony na nieliniowość, bifurkacje oraz sterowalność chaosu. Te zjawiska są traktowane jako kategoria nie tylko fizyczna, lecz również społeczna, polityczna i biologiczna. Niedawno opublikowany tam tekst o dynamice nieliniowej formułuje trafną intuicję, że chaos nie jest brakiem porządku, lecz źródłem adaptacyjności. Stabilność nie jest stanem martwej równowagi, toteż musimy ją rozumieć jako proces ciągłego odtwarzania struktury. Ta intuicja pozostaje całkowicie zgodna z duchem współczesnej biologii matematycznej, która odrzuca statyczne iluzje. W życiu nie chodzi bowiem o bezruch, lecz o utrzymywanie formy w warunkach permanentnej zmiany.

## Geometria: prymat nad biologiczną metaforą

Najbardziej eleganckim wprowadzeniem do tej nowej logiki pozostaje filotaksja, czyli zjawisko polegające na ścisłym uporządkowaniu organów roślinnych w przestrzeni wzrostu, które pozwala dostrzec twarde reguły w rozmieszczeniu liści czy nasion względem osi pędu. Przez dekady to regularne rozmieszczenie traktowano z pobłażaniem, widząc w nim jedynie dekoracyjną numerologię przyrody. Uważano to za rodzaj botanicznego ornamentu, stworzonego ku uciesze estetów zapatrzonych w złoty podział. Tymczasem zjawisko to stanowi jeden z najbardziej bezwzględnych dowodów na to, że geometria i mechanika nie są w biologii poetycką metaforą, lecz twardym mechanizmem formotwórczym. Złoty kąt nie jest magicznym talizmanem natury, lecz surowym skutkiem takiego rozmieszczenia kolejnych zawiązków, które minimalizuje konflikt

przestrzenny, optymalizuje ekspozycję na światło i perfekcyjnie zarządza lokalną gospodarką wzrostu.

Nadszedł czas, aby wypowiedzieć na głos tezę równie niepopularną, co fundamentalnie oczywistą. Kiedy sentymentalna humanistyka rozpływa się nad harmonią natury, zazwyczaj zupełnie nie pojmuje, że owa harmonia nie ma absolutnie nic wspólnego z sielskim, pastoralnym spokojem. W rzeczywistości jest ona wynikiem bezlitosnej, niemal brutalnej ekonomii przestrzeni, w której nie ma miejsca na sentymenty. Roślina wcale nie układa swoich liści pięknie, ponieważ estetyka nie leży w jej ewolucyjnym interesie; ona układa je wyłącznie skutecznie. To, co ludzkie oko z upodobaniem estetyzuje jako idealną proporcję, natura wypracowuje w pocie czoła jako inżynieryjne rozwiązanie problemu alokacji drastycznie ograniczonych zasobów. Z punktu widzenia wytrawnego ekonomisty filotaksja jawi się więc jako niedościgniony model efektywności rozmieszczenia kapitału, a z perspektywy prawnika przypomina spontaniczny porządek funkcjonujący bez centralnego ustawodawcy.

Z tego geometrycznego rygoru naturalnie przechodzimy do morfogenezy, czyli procesu polegającego na powolnym powstawaniu form biologicznych, który pozwala zrozumieć dramatyczne przejście od jednorodnego stanu zarodkowego do skomplikowanej struktury. Trzeba tu od razu zaznaczyć, że zjawisko to nie oznacza po prostu banalnego powiększania objętości organizmu w czasie. Oznacza ono różnicowanie się materii na osie, segmenty, granice, plamy i wreszcie w pełni funkcjonalne narządy. Morfogeneza jest zatem rygorystyczną nauką o tym, w jaki dokładnie sposób układ żywy nabywa swojego ostatecznego kształtu. Właśnie w tym miejscu rola Alana Turinga okazuje się intelektualnie piorunująca i całkowicie wywrotowa. Ten sam wybitny umysł, który pomógł ludzkości zrozumieć naturę obliczalności, udowodnił również, że lokalne reakcje chemiczne sprzęgnięte z dyfuzją mogą spontanicznie łamać symetrię i produkować stabilne wzory.

Jeśli powyższy opis brzmi dla kogoś nazbyt abstrakcyjnie, to wynika to wyłącznie z faktu, że zbyt długo uczono nas biologii jak dogmatycznego katechizmu elementów. Zdecydowanie za mało mówiono o niej jako o wyrafinowanej teorii procesów, skupiając się na wkuwaniu list części składowych. Reakcja z dyfuzją oznacza w praktyce po prostu tyle, że pewne substancje oddziałują na siebie lokalnie, a jednocześnie rozchodzą się w przestrzeni z zupełnie odmiennymi prędkościami. Ten z pozoru prosty mechanizm w zupełności wystarcza, aby pierwotna jednorodność utraciła swoją stabilność i ustąpiła miejsca skomplikowanemu wzorowi. W tym głębokim sensie paski zebry czy precyzyjna segmentacja rozwijającego się ciała nie są żadnym estetycznym kaprysem ewolucji, lecz dowodem na to, że forma rodzi się z fundamentalnej niestabilności. Kto zatem nadal upiera się przy potocznym obrazie organizmu jako wiernego

wykonania prostego planu genetycznego, ten dramatycznie myli konstytucję państwa z gotowym budynkiem.

Ta sama bezwzględna logika relacji prowadzi nas jeszcze dalej, prosto ku fascynującym obszarom geometrii wielowymiarowej. Dla czytelnika nieprzyzwyczajonego do tego matematycznego żargonu trzeba od razu i z całą mocą powiedzieć jedną kluczową rzecz. Wyższy wymiar nie oznacza tu żadnej metafizycznej fantazji ani taniego science fiction z drugorzędnego serialu telewizyjnego. Oznacza on po prostu dodatkowy, niezbędny stopień swobody w precyzyjnym opisie skomplikowanych relacji przestrzennych. Matematyka bez wahania przechodzi do wymiaru czwartego, szóstego czy jeszcze wyższego dokładnie wtedy, gdy nasza swojska, trójwymiarowa rzeczywistość staje się zbyt ciasna dla eleganckiego opisu układu.

Klasyczne, podręcznikowe modele kapsydów wirusowych przez długie dekady opierały się na bardzo wygodnej intuicji. Zakładano mianowicie, że białkowa otoczka wirusa musi dać się opisać prostymi, szkolnymi regułami geometrii ikozaedralnej. I rzeczywiście, dla wielu dobrze zbadanych przypadków to eleganckie założenie sprawdzało się znakomicie, dając badaczom poczucie pełnej kontroli. Ale biologia, jakby na złość wszystkim akademickim scholastykom zakochanym w prostocie, wprost uwielbia generować wyjątki. Szybko pojawiły się wirusy, których skomplikowana architektura za nic nie chciała zmieścić się w tym klasycznym, uładzonym szkicu. Wtedy właśnie do gry musiała wejść matematyka wyższych wymiarów, zaawansowana teoria grup i śmiała inspiracja parkietażami Penrose'a, udowadniając, że to, co w trzech wymiarach wygląda na bałagan, w sześciu staje się krystalicznym porządkiem.

W tym kontekście geometria wielowymiarowa zyskuje znaczenie nie tylko czysto deskryptywne, ale przede wszystkim głęboko strategiczne. Dogłębne zrozumienie architektury wirusa to w gruncie rzeczy precyzyjne rozpoznanie jego twardych ograniczeń konstrukcyjnych. A to z kolei otwiera przed nami realną możliwość celowej, medycznej interwencji w jego strukturę. Używając języka ekonomii, moglibyśmy powiedzieć, że poznanie tej ukrytej geometrii ujawnia nam rzeczywisty koszt funkcjonalny utrzymania określonej formy biologicznej. W języku samej biologii oznacza to dokładnie to samo, lecz brzmi znacznie uczciwiej, uświadamiając nam, że wiedza o strukturze bywa początkiem wiedzy o tym, jak skutecznie zaburzyć składanie kapsydu.

Właśnie w tym newralgicznym punkcie zaczyna się najważniejsza, fundamentalna polemika z potocznym, a niestety często też akademicko wtórnym redukcjonizmem. Zbyt wiele szacownych szkół myślenia wciąż zachowuje się tak, jakby żywy organizm dało się bezkarnie rozebrać na pojedyncze elementy, a potem z tych elementów magicznie odtworzyć sens całości. Owszem, analityczny rozbiór jest w nauce absolutnie potrzebny, ale on sam w sobie po prostu nie wystarcza do zrozumienia fenomenu życia. Złożoność biologiczna nie jest przecież zakurzonym magazynem

części zamiennych, z którego można dowolnie dobierać komponenty, lecz wyrafinowanym ustrojem relacji. Dlatego właśnie szósta rewolucja biologiczna wcale nie neguje dorobku poprzednich pięciu, lecz mądrze je integruje, znosząc jedynie szkodliwe złudzenie, że którakolwiek z wąskich perspektyw może już samotnie wystarczyć.

Współczesna, dojrzała biologia staje się tym samym czymś zaskakująco podobnym do zaawansowanej teorii państwa i wolnego rynku. Żaden poważny, szanujący się ekonomista nie uzna dziś przecież, że globalną gospodarkę wyjaśnia wyłącznie prosta suma jednostkowych preferencji konsumentów. Podobnie żaden wybitny prawnik nie zaryzykuje tezy, że skomplikowany porządek instytucjonalny da się sprowadzić do literalnego brzmienia jednego, wyrwanego z kontekstu przepisu. W obu tych dziedzinach liczą się potężne efekty sieciowe, historyczne zależności ścieżkowe, ukryte koszty transakcyjne i emergencja ładu z chaosu lokalnych decyzji. Dokładnie ten sam, wyrafinowany słownik pojęciowy okazuje się dziś zdumiewająco adekwatny dla biologii, udowadniając, że organizm jest dynamicznym porządkiem normatywnym materii.

Biorąc to wszystko pod uwagę, nie jest absolutnie żadną przesadą stwierdzenie, że obrona matematycznego zwrotu w biologii jest dziś obroną samej racjonalności nauki. Trzeba bowiem mieć intelektualną odwagę, by powiedzieć głośno rzecz dla wielu badaczy skrajnie niewygodną. Surowe dane pozbawione solidnej teorii nie są żadną obiektywną neutralnością, lecz po prostu chaosem ubranym w elegancki garnitur. Sama technologiczna obfitość pomiaru, choćby najbardziej precyzyjnego, nie rodzi jeszcze automatycznie głębokiego rozumienia procesów. W epoce wszechobecnych omik i potęgi sztucznej inteligencji to właśnie biologia systemowa brutalnie przypomina nam, że bez spójnego modelu nasza wiedza nieuchronnie rozpada się na bezużyteczne, informacyjne rumowisko.

Jeżeli więc mamy traktować sprawę całkowicie uczciwie, musimy przyznać, że pięć dotychczasowych rewolucji biologicznych wcale nie zakończyło historii tej nauki. One zaledwie doprowadziły nas do fascynującego progu, na którym stało się boleśnie jasne, że życie jest nie tyle konkretną rzeczą, ile wyrafinowaną organizacją rzeczy. Zjawiska takie jak filotaksja i morfogeneza dobitnie pokazują, że biologiczna forma nie spada z nieba jako gotowy cud, lecz wyłania się z bezlitosnej gry ograniczeń. Geometria wielowymiarowa udowadnia z kolei, że nawet mikroskopijny wirus potrafi wymusić na nas porzucenie potocznej, wygodnej intuicji przestrzeni. A z tego wszystkiego wynika teza na wskroś prawdziwa, że biologia XXI wieku bezpowrotnie przestaje być nauką o izolowanych obiektach, stając się nauką o strukturach ukrytych możliwości.

W tym miejscu warto postawić pytanie mocno prowokacyjne, ale z intelektualnego punktu widzenia absolutnie konieczne. Co jest w dzisiejszych czasach bardziej archaiczne i naiwne w swoim podejściu do natury? Czy jest to średniowieczna, mistyczna wiara w élan vital, ową mityczną siłę

życiową napędzającą materię, czy może nowoczesna wiara, że wystarczy poznać sekwencję DNA, aby w pełni pojąć fenomen życia? Prawda jest taka, że jedna i druga postawa całkowicie omija sedno problemu. Życie nie jest ani magicznym duchem wlanym w martwą materię, ani prostym, mechanicznym skutkiem odczytania listy komponentów. Jest ono niezwykle szczególnym reżimem organizacji, w którym materia dosłownie uczy się utrzymywać swoją formę i przetwarzać zewnętrzne zakłócenia we własną przewagę ewolucyjną.

Życia nie daje się już uczciwie i rzetelnie opisywać jako zwykłej sumy chemicznych składników wrzuconych do probówki. Trzeba wejść znacznie głębiej, w sam pulsujący środek tej nowej ontologii biologii, gdzie prymitywny materiał ustępuje miejsca wyrafinowanej relacji. To właśnie tutaj, gdzie pojedynczy element traci znaczenie na rzecz globalnej organizacji, zaczyna się obszar szczególnie drażliwy dla umysłów przywiązanych do poznawczego komfortu. Sama sekwencja genetyczna po prostu nie wystarcza, wyizolowany komponent komórkowy nie wystarcza, a statyczny obraz spod mikroskopu to zdecydowanie za mało. Kto nadal chce uprawiać nauki o życiu tak, jakby wystarczało rozebrać organizm na części, ten zachowuje się jak prawnik święcie przekonany, że potężne państwo da się wywieść z jednego przepisu, bez cienia zrozumienia dla brutalnych relacji siły.

## Topologia DNA: teoria węzłów w biologii molekularnej

Jednym z najbardziej fascynujących obszarów szóstej rewolucji biologicznej pozostaje topologia DNA. Mówimy tu o badaniu własności przestrzennych cząsteczki, które ignorują lokalne wygładzenia, skupiając się na architekturze splotów i połączeń. Topologia, czyli gałąź matematyki analizująca cechy figur niezmienne mimo ciągłych deformacji, przestaje być w biologii intelektualnym luksusem. Staje się absolutną koniecznością, wszak kwas nukleinowy nie egzystuje jako abstrakcyjny ciąg liter w podręczniku. To realna, dramatycznie skręcona struktura fizyczna, którą komórka musi nieustannie kopiować, naprawiać i przecinać. Problem nie sprowadza się zatem wyłącznie do odczytania zapisanego kodu. Równie kluczowe jest zrozumienie, jak owa przestrzenna aranżacja ogranicza lub umożliwia fundamentalne operacje biologiczne.

Właśnie dlatego tak doniosłą rolę odgrywają topoizomerazy oraz rekombinazy, czyli enzymy rozwiązujące topologiczne konflikty żywej materii. Topoizomeraza, czyli białko modyfikujące stopień splątania nici poprzez ich chwilowe przecinanie i spajanie, ratuje system przed fizycznym kolapsem. Z kolei rekombinaza bezbłędnie przestawia sekwencje materiału genetycznego, dokonując wysoce kontrolowanych operacji wymiany. Bez tych precyzyjnych mechanizmów proces dziedziczenia natychmiast ugrzązłby w bagnie fizycznej niemożności. Słynna podwójna helisa okazuje się bowiem konstrukcją genialną informacyjnie, niemniej pozostaje niezwykle kłopotliwa

mechanicznie. To, co na ilustracji przypomina elegancki spiralny motyw, w komórce staje się koszmarem przypominającym próbę rozplątania dwóch sklejonych linek. Życie nie jest więc wyłącznie sterylną informatyką, lecz brutalną geometrią oporu.

Sojusz biologii molekularnej z teorią węzłów przekształcił ten chaos w pole rygorystycznego poznania. Teoria węzłów, czyli dziedzina badająca zamknięte pętle oraz ich wzajemne splątania, pozwala badaczom odróżnić pozornie identyczne konfiguracje przestrzenne. Dzięki niej możemy zrekonstruować minimalną sekwencję operacji prowadzących od jednego stanu do drugiego, rozumiejąc rzeczywiste ruchy enzymów. Stanowi to wyrafinowany przykład sytuacji, w której matematyka porzuca rolę biernego archiwisty faktów. Staje się ona bezwzględnym narzędziem śledczym, które potrafi odtworzyć niewidzialne działania wyłącznie na podstawie ich fizycznych skutków. Biolog obserwuje ostateczny produkt, podczas gdy matematyk odtwarza ukrytą operację. Właśnie dlatego analiza enzymów pokroju resolwazy Tn3 udowodniła, że logika życia rozgrywa się w przestrzeni topologicznej.

Płyną z tego wnioski o wiele głębsze niż tylko kolejne detale do katalogu współczesnej biochemii. Uczymy się bowiem, że biologia nie jest nauką o tym, co fizycznie istnieje, lecz o tym, na co pozwala struktura układu. Używając języka prawa, stwierdzilibyśmy kategorycznie, że topologia wyznacza twardą jurysdykcję możliwych działań komórkowych. W terminologii ekonomicznej powiedzielibyśmy z kolei, że ustanawia ona bezwzględny koszt przejścia między stanami systemu. Materiał genetyczny przestaje być biernym nośnikiem treści, stając się obiektem o własnej architekturze ograniczeń. Tego faktu nie uchwyci naiwny determinizm genetyczny ani infantylna metafora „księgi życia", powtarzana przez poznawczo biernych popularyzatorów. Książki wszak nie plączą się podczas czytania. Cząsteczka DNA robi to nieustannie.

## Teoria sieci: nowa definicja przyczynowości

Z fascynującej topologii DNA musimy naturalnie przejść do teorii sieci, bowiem to właśnie ona stanowi absolutny fundament nowej biologii. Sieć, w swoim najgłębszym sensie, oznacza po prostu układ zbudowany z węzłów oraz łączących je relacji. Pozornie brzmi to jak skromna, wręcz szkolna definicja, niemniej jej ostateczne konsekwencje całkowicie wywracają nasze rozumienie zjawiska życia. W biologii takimi sieciami są geny sterujące ekspresją innych genów, neurony wymieniające sygnały, gatunki splecione w łańcuchach troficznych, a nawet ludzie przenoszący patogeny. Biologiczna rzeczywistość przestała być dzisiaj zbiorem odizolowanych od siebie rzeczy. Stała się wibrującą przestrzenią nieustannych powiązań.

Ta zmiana perspektywy ma wymiar niemal ustrojowy, zmuszając nas do bezpowrotnego porzucenia dawnych nawyków myślowych. Kiedy zaczynamy myśleć sieciowo, przestajemy naiwnie pytać wyłącznie o właściwości pojedynczego elementu, a zaczynamy badać jego pozycję, stopień centralności i ogólną odporność układu na awarie. To z kolei prowadzi do uznania faktu, którego nauki o życiu przez dekady unikały z poznawczego lenistwa, mianowicie głęboko rozproszonej i emergentnej natury biologicznej przyczynowości. Emergencja, czyli zjawisko powstawania zupełnie nowych własności całości z interakcji jej części, tłumaczy to zjawisko najlepiej. Żaden pojedynczy neuron nie posiada przecież własnych poglądów czy sumienia, a jednak odpowiednio utkana sieć neuronowa potrafi wygenerować te wszystkie zjawiska.

Właśnie dlatego słynne eksperymenty ze śluzowcem Physarum polycephalum zachowały tak potężną moc symboliczną dla współczesnej nauki. Nie stało się tak z powodu odkrycia „myślącej galarety", jak z upodobaniem krzyczały popularnonaukowe nagłówki, lecz dzięki uwidocznieniu fundamentalnej zasady biologii. Lokalna reguła, polegająca na wzmacnianiu korzystnych przepływów i bezlitosnym wygaszaniu nieopłacalnych połączeń, potrafi spontanicznie wyprodukować układ o perfekcyjnych własnościach optymalizacyjnych. Śluzowiec wszak nie projektuje swojej infrastruktury w sposób intencjonalny, lecz po prostu wyłania ją poprzez nieustanną iterację lokalnych sprzężeń zwrotnych. Ten niepozorny fakt powinien natychmiast zawstydzić naszą antropocentryczną pychę, utożsamiającą rozumność ze świadomością, oraz technokratyczną iluzję, że tylko centralne planowanie tworzy efektywne rozwiązania.

Tutaj docieramy do najgłębszej prowokacji, która brutalnie wytrąca nas z komfortu prostych, zarządczych metafor. Być może nowoczesna kultura korporacyjna, obsesyjnie wręcz przywiązana do centralnego sterowania i mnożenia wskaźników, jest poznawczo znacznie prymitywniejsza niż procesy biologiczne. Natura od milionów lat wie to, czego państwowe biurokracje uczą się z ogromnym oporem, mianowicie że odporność systemu nie wynika z jego maksymalnej centralizacji, lecz z mądrze rozproszonej zdolności adaptacyjnej. Sieć, która potrafi przetrwać katastrofalne awarie, to zawsze struktura posiadająca wbudowaną nadmiarowość, bezpieczne obejścia i lokalną autonomię. Dokładnie tę samą prawdę o przetrwaniu ukazuje nam organizacja śluzowca, architektura ludzkiego mózgu czy globalne szlaki metaboliczne. W tym najszerszym sensie biologia staje się surową nauczycielką instytucjonalnej pokory.

## Neurobiologia matematyczna: demistyfikacja umysłu

W neurobiologii matematyczny zwrot stał się nieuchronny, zmuszając nas do porzucenia poznawczej bierności na rzecz intelektualnego rygoru. Neuron jest komórką pobudliwą, czyli taką,

która przechodzi od stanu spoczynkowego do gwałtownej zmiany potencjału po przekroczeniu określonego progu. Ta definicja od razu sugeruje, że mamy do czynienia z dynamiką, a nie bierną strukturą. Model Hodgkina i Huxleya był przełomem, bo ukazał, jak zmienne przepływy jonów przez błonę generują impuls nerwowy. Uproszczone modele pobudliwości, jak układ FitzHugh-Nagumo, odsłoniły następnie ogólniejszą logikę układów progowych. Działają one niczym surowe instytucje państwowe, które filtrują szum i reagują wyłącznie na sygnały przekraczające ustawowe kryterium intensywności.

Prawdziwa potęga matematycznej abstrakcji ujawnia się dopiero wtedy, gdy opuszczamy pojedynczy neuron i wkraczamy w architekturę sieci. Tam bowiem pojawia się zjawisko, które można nazwać ścisłą ekonomią rytmu. Układ nerwowy nie funkcjonuje jak prymitywny katalog niezależnych przełączników, lecz jak sprawnie zarządzany aparat państwowy, organizujący czas, fazę i synchronizację. Centralne generatory wzorców, czyli lokalne sieci zdolne do samoczynnego wytwarzania rytmicznych sekwencji aktywności, stanowią tego wybitny przykład. Dzięki nim chodzenie czy oddychanie zachodzi bez potrzeby świadomego kontrolowania każdego skurczu. Biologia w tej skali zachowuje się jak genialny planista gospodarczy, tworząc automatyzm głęboko zorganizowany.

Dlatego modelowanie chodu zwierząt miało tak potężną siłę wyjaśniającą, rozbijając nasze wyobrażenia o ruchu. Ujawniło ono, że wzorce lokomocji nie są chaotycznym zbiorem mięśniowych reakcji, lecz klasami rozwiązań sieciowych możliwych przy określonej symetrii układu. Mówiąc prościej, dane ciało nie porusza się w dowolny sposób, wszak ogranicza je konstytucja anatomiczna. Architektura sieci neuronalnej i geometria kończyn wyznaczają żelazny repertuar rytmów, niczym ramy prawne określające granice swobody obywatelskiej. Matematyka nie tylko te biologiczne rytmy odtwarza, ale potrafi precyzyjnie przewidywać ich istnienie. To wydarzenie epistemiczne najwyższej próby, bo pokazuje, że model aktywnie generuje wiedzę o tym, co nieodkryte.

Jeszcze bardziej spektakularny jest obszar matematycznego modelowania układu wzrokowego oraz zjawiska halucynacji. Halucynacja, czyli doświadczenie percepcyjne pojawiające się bez adekwatnego bodźca zewnętrznego, bywa dla potocznego rozumu dowodem chaosu lub subiektywnego dziwactwa. Tymczasem rygorystyczna analiza kory wzrokowej pokazała, że regularne formy wizji, takie jak spirale czy fraktalnopodobne ornamenty, są w pełni przewidywalne. Stanowią one nieuchronny skutek dynamiki aktywności neuronalnej w określonej architekturze map korowych, niczym kapitał krążący w zamkniętym systemie. To odkrycie uczy nas, że nawet to, co wydaje się najbardziej prywatne i psychodelicznie rozchwiane, pozostaje osadzone w bezlitosnej geometrii systemu.

W gruncie rzeczy neurobiologia matematyczna z pasją rozbija tu dwa szkodliwe przesądy zarazem, żądając od nas najwyższego intelektualnego wysiłku. Pierwszy to przesąd mechanistycznego prostactwa, wedle którego wystarczy znaleźć w mózgu lokalny „ośrodek" dla danej funkcji i problem z głowy. Drugi to przesąd romantycznej nieprzenikliwości umysłu, naiwnie zakładający, że świadomość i percepcja są zbyt osobliwe dla matematycznych równań. Otóż nie, matematyka wprawdzie nie rozwiązała jeszcze problemu świadomości, ale udowodniła, że zjawiska mentalne są nierozdzielne od fizycznej architektury sieci. Oznacza to, że psychologia i filozofia umysłu, chcąc uniknąć popadania w literacką mglistość, muszą wreszcie zacząć myśleć w kategoriach rygorystycznych układów.

## Teoria gier: ewolucyjna redefinicja rywalizacji

Z neurobiologii płynnie wkraczamy na terytorium teorii gier, gdzie biologiczny świat porzuca heroiczne mity na rzecz chłodnej kalkulacji. Szkolne formułki o przetrwaniu najsilniejszych to przejaw poznawczej bierności, która nie wytrzymuje zderzenia z intelektualnym rygorem natury. Teoria gier, wprowadzona do biologii przez Johna Maynarda Smitha i George'a Price'a, udowadnia bowiem, że sukces jednostki jest nierozerwalnie spleciony z decyzjami innych graczy. Przypomina to skomplikowany system prawny lub globalną gospodarkę, w której wartość danej cechy nigdy nie jest absolutna, lecz ściśle relacyjna. Nie istnieje zatem jedna, uniwersalnie najlepsza strategia przetrwania. Istnieją jedynie taktyki lepsze lub gorsze w konkretnej strukturze populacji i przy określonej konfiguracji rywali.

W tym kontekście kluczowa staje się stabilna strategia ewolucyjna, czyli praktyka polegająca na przyjęciu takiego wzorca zachowań, którego po opanowaniu populacji nie da się łatwo wyprzeć rzadką alternatywą. Definicja ta brzmi niczym suchy zapis z kodeksu spółek handlowych, niemniej jej implikacje są fascynujące i głęboko filozoficzne. Oznacza to wszak, że ewolucja wcale nie maszeruje ślepo ku jednemu, mitycznemu optimum. Zamiast tego natura często stabilizuje układy pluralistyczne, chwiejne, a nawet cykliczne. Doskonałym przykładem pozostaje model jaszczurek Uta stansburiana, gdzie niebiescy strażnicy, pomarańczowi agresorzy i żółci oportuniści nie budują prostej hierarchii, lecz tworzą cykl przewag przypominający grę w papier, kamień i nożyce. W takim państwie natury triumf jednego wariantu automatycznie rodzi warunki dla jego własnej, nieuchronnej porażki.

Jakże kompromitująco wypada na tym tle banalna retoryka społeczna, nieustannie powtarzająca wyświechtane frazy o ostatecznym zwycięstwie najsilniejszych. Biologia jest znacznie subtelniejsza, a przy tym bezlitośnie ironiczna wobec naszych uproszczeń, bo często sukces zależy wyłącznie od

tego, czy przeciwnik zdążył już uwierzyć we własną wygraną. Naga siła pozbawiona kontekstu staje się ogromnym kosztem, toteż agresja bez odpowiedniego układu bodźców to po prostu strategiczna ślepota. Wierność, podstęp czy oportunizm to równoprawne strategie, przy czym trwałość całej populacji zazwyczaj wymaga ich nieustannego współistnienia. Gdyby współcześni politycy czy menedżerowie faktycznie rozumieli ewolucyjną teorię gier, znacznie rzadziej wygłaszaliby tyrady o uniwersalnej recepcie na rynkową dominację. Biologia głośno śmieje się z takich doktrynerów i ma ku temu doskonałe powody.

## Chaos deterministyczny: stabilność ekosystemów

Z teorii gier wkraczamy w dynamikę populacyjną i chaos, a wywód staje się niebezpieczny dla tych, którzy lubią zasypiać przy kołysance pojęcia równowagi. Przez dekady ekologia pozostawała uwiedziona wizją przyrody jako systemu dążącego do stabilnego stanu. W tej uładzonej metaforze kryło się coś kojącego, co zwalniało nas z poznawczego wysiłku. Równowaga dobrze brzmi, sugerując istnienie naturalnego porządku. Problem w tym, że większość układów biologicznych ma ten ideał za nic. Dynamika nieliniowa uświadomiła nam bowiem, że proste równania wzrostu populacji potrafią generować zachowania skrajnie wrażliwe na warunki początkowe, mimo że są deterministyczne.

Chaos deterministyczny, czyli zjawisko polegające na tym, że układ rządzony ścisłymi prawami pozostaje nieprzewidywalny z powodu wrażliwości na minimalne różnice stanu początkowego, zmienia wszystko. To odkrycie miało dla biologii potężniejsze znaczenie niż nowatorskie techniki laboratoryjne, wymuszając rygor intelektualny. Pokazało ono, że gwałtowne wahania liczebności populacji nie muszą oznaczać zewnętrznej katastrofy, błędu badacza ani przypadkowego szumu. Mogą stanowić immanentną własność samego układu. Minimalne przesunięcie na starcie prowadzi do radykalnie odmiennych trajektorii, toteż biologia musiała porzucić iluzję kontroli.

Ten tok rozumowania prowadzi nas do paradoksu planktonu, czyli zjawiska polegającego na trwałym współistnieniu ogromnej różnorodności gatunków mimo ograniczonego zestawu zasobów. Klasyczna zasada wykluczenia konkurencyjnego głosiła, że liczba współistniejących gatunków nie może przekraczać liczby dostępnych nisz. Tymczasem plankton, z uporem godnym intelektualnego sabotażysty, nieustannie demonstrował bogactwo form, kpiąc z uproszczonych modeli. Dopiero uwzględnienie dynamiki czasowej, oscylacji i chaosu pozwoliło pojąć, że to brak stabilnego punktu równowagi umożliwia to fascynujące współistnienie. W języku teorii państwa byłaby to trafna lekcja o tym, że czasami to nie martwy spokój, lecz kontrolowana niestabilność ratuje pluralizm przed monopolem.

Powyższe rozważania nie oznaczają, że chaos stanowi wartość pozytywną, niemniej dowodzą, iż stabilność nie jest dobrem absolutnym. Wiele złożonych systemów żywych trwa w czasie wyłącznie dlatego, że odmawia zamarcia w jednej konfiguracji. Układ taki potrafi nieustannie oscylować, elastycznie reagować na bodźce, a w krytycznych momentach po prostu bifurkować. Bifurkacja, czyli proces polegający na tym, że drobna zmiana parametrów prowadzi do nagłej zmiany zachowania całego układu, opisuje zjawiska fundamentalne. Biologiczny system może długo trwać w pozornym bezruchu, po czym, po przekroczeniu niewidzialnego progu, gwałtownie wejść w nowy reżim dynamiki.

Obecność chaosu nie jest zatem kompromitacją nauki, lecz jej próbą charakteru, odzierającą nas z resztek naiwnego redukcjonizmu. Dojrzała nauka nie składa bowiem fałszywych obietnic, że uczyni świat łatwym w obsłudze; obiecuje jedynie, że nauczy nas odróżniać elegancję prostoty od wulgarnego uproszczenia. Szósta rewolucja biologiczna stanowi właśnie akt takiego głębokiego odróżnienia, zmuszając nas do porzucenia wygodnych iluzji. Przestajemy udawać, że układy żywe są czytelne i przewidywalne niczym tryby w zegarku. Zaczynamy je natomiast rozumieć jako struktury na wskroś historyczne, wielopoziomowe, nieliniowe i częściowo nieprzezroczyste.

## Astrobiologia: od chemii do organizacji życia

Najbardziej drażliwe pytanie współczesnej debaty naukowej brzmi z pozoru naiwnie, lecz w istocie wyznacza absolutną granicę naszego poznania: czym właściwie jest życie? Nie pytamy tutaj o to, jakie formy życia już znamy z własnego podwórka, ani jakie konkretnie organizmy wrzucamy do szufladki z napisem „ożywione”, lecz o samą istotę tego zjawiska w skali kosmicznej. Astrobiologia, czyli dziedzina badająca pochodzenie i ewolucję życia we Wszechświecie, wciąż operuje ostrożną, klasyczną definicją roboczą, według której życie to samopodtrzymujący się układ chemiczny zdolny do darwinowskiej ewolucji. Nawet jednak wewnątrz tego hermetycznego środowiska badawczego widać wyraźnie, że ów konstrukt traktowany jest raczej jako wygodne narzędzie operacyjne niż ostateczne słowo ontologii. Równolegle pęcznieją bowiem podejścia kładące nacisk na autonomię, otwartość ewolucyjną, zdolność do nieustannego wytwarzania nowości oraz na fascynujący problem życia takiego, jakie mogłoby istnieć, a nie tylko takiego, jakie przypadkiem wyewoluowało na naszej planecie.

Rozróżnienie między definicją operacyjną a definicją filozoficznie satysfakcjonującą stanowi tutaj fundament intelektualnego rygoru. Nauka instytucjonalna, zwłaszcza w momentach, gdy planuje wielomiliardowe misje kosmiczne i konstruuje precyzyjne instrumenty, po prostu musi posiadać twarde kryteria do działania. Inżynierowie muszą wiedzieć, co dokładnie uznamy za sygnał życia,

jak kalibrować aparaturę i w jaki sposób odróżniać ślad metaboliczny od zwykłej anomalii geochemicznej. Ale nasz rozum teoretyczny nie może zatrzymać się na samej inżynieryjnej użyteczności, musi bowiem zapytać, czy ta chemiczna definicja nie jest przypadkiem rozpaczliwie ziemiocentryczna. I właśnie w tym miejscu szósta rewolucja biologiczna wykonuje swój najodważniejszy gest, sugerując, że życie nie powinno być definiowane przez konkretny zestaw molekuł, lecz przez klasę organizacji zdolnej do samopodtrzymania, reprodukcji z dziedziczną zmiennością i otwartej ewolucji. To już nie jest po prostu chemia z lekko podniesionym czołem. To jest pełnoprawna ontologia procesów.

W tym kontekście powraca pozornie banalny, szkolny przykład płomienia, który doskonale obnaża nasze poznawcze lenistwo. Płomień posiada przecież wyraźną strukturę, zużywa paliwo, pobiera energię z otoczenia, rośnie, dynamicznie reaguje na zmiany i potrafi bez problemu inicjować kolejne płomienie. Gdybyśmy trzymali się wyłącznie nieostrożnej, mechanicznej listy cech, musielibyśmy z pełną powagą stwierdzić, że ogień jest niepokojąco bliski życia. A jednak doskonale wiemy, że nim nie jest, i to wcale nie dlatego, że tak nam podpowiada mglista intuicja, lecz dlatego, że płomień nie posiada otwartej historii selekcyjnej. Nie dysponuje żadnym aparatem dziedziczenia, który produkowałby trwałą zmienność poddawalną kumulatywnemu doborowi naturalnemu. Płomień trwa w jednej, zamkniętej klasie procesu, nie wchodząc w historyczną ekonomię nowości, a jego teraźniejszość nie jest owocem ewolucyjnego archiwum prób i błędów. Ten prosty przykład brutalnie rozsadza leniwe definicje i zmusza nas do uznania, że sam metabolizm bez ewolucyjnej genealogii to zdecydowanie za mało.

Musimy zatem z całą stanowczością rozróżnić replikację od reprodukcji, bo w tej subtelnej różnicy kryje się cała tajemnica ożywionej materii. Replikacja oznacza po prostu wykonanie wiernej kopii, mechaniczną powtarzalność, która nie prowadzi do niczego nowego. Reprodukcja w głębokim sensie biologicznym oznacza natomiast wykonanie kopii z wbudowaną możliwością błędu, czyli różnicy, która w starciu ze środowiskiem może okazać się dziedzicznie skuteczna lub całkowicie zgubna. Bez tej fundamentalnej różnicy nie ma mowy o żadnej selekcji, bez selekcji nie istnieje otwarta adaptacja, a bez otwartej adaptacji grzęźniemy w jałowym świecie powtórzeń, który z życiem nie ma nic wspólnego. To właśnie dlatego tak niezwykle aktualne pozostają klasyczne intuicje von Neumanna o podwójnej roli opisu, a współczesne badania nad sztucznym życiem wciąż wracają do pytania o minimalne warunki konieczne do tego, by układ wszedł w historię ewolucyjnej twórczości. W najnowszych przeglądach tej dyscypliny powraca dokładnie ta sama, odważna myśl: badamy życie takie, jakie mogłoby być, a nie tylko to, które znamy, szukając definicji całkowicie niezależnych od jednego, ziemskiego substratu.

Wszystko to prowadzi nas do sporu znacznie poważniejszego, niż większość ortodoksyjnych biologów woli przyznać w świetle jupiterów. Ten konflikt nie dotyczy już wyłącznie niszowych rozważań o życiu syntetycznym czy cyfrowym, lecz uderza w sam status biologii jako uniwersalnej nauki ogólnej. Jeśli bowiem życie jest zjawiskiem ściśle związanym z określoną architekturą organizacji, a nie z jedną, uświęconą tradycją chemią węgla, to biologia przestaje być zaledwie nauką o organizmach ziemskich, stając się potężną nauką o możliwych ustrojach żywych. Brzmi to dla wielu uszu zbyt szeroko, niemal bezwstydnie ambitnie, ale jest to jedyne intelektualnie uczciwe postawienie sprawy. Tak jak ekonomia nie jest nauką o jednej konkretnej walucie, lecz o uniwersalnych formach koordynacji rzadkości dóbr, a prawo nie jest nauką o jednym lokalnym kodeksie, lecz o fundamentalnej architekturze normatywnej państwa, tak dojrzała biologia nie może być redukowana do prowincjonalnego katalogu rozwiązań chemicznych wypracowanych na tej jednej, małej planecie.

Astrobiologia staje się w tym ujęciu polem szczególnej, rygorystycznej próby dla naszych teoretycznych ambicji. Amerykańska agencja kosmiczna definiuje ją szeroko jako badanie pochodzenia, ewolucji i rozmieszczenia życia we Wszechświecie, a najnowsze misje międzyplanetarne formułują swoje cele w zupełnie nowym paradygmacie. Sonda Europa Clipper, zaprojektowana do zbadania lodowego księżyca Jowisza, nie leci tam po to, by szukać dosłownych kopii ziemskiej biosfery, lecz by precyzyjnie scharakteryzować środowiska potencjalnie sprzyjające jakimkolwiek formom życia. To przesunięcie języka i celów jest niezwykle wymowne, wręcz rewolucyjne w swoim chłodnym pragmatyzmie. Nie szukamy już naiwnie „drugiej Ziemi" z zielonymi lasami i błękitnym niebem. Szukamy surowych środowisk, w których mają prawo zajść procesy złożonej organizacji, stabilizacji termodynamicznej, chemicznej pracy i wreszcie – ewolucyjnej selekcji.

Właśnie dlatego tak krytyczne pozostaje bezwzględne rozróżnienie między uniwersaliami a zaściankowościami życia, bez którego skazujemy się na poznawczą ślepotę. Uniwersalia to te głębokie cechy, które mogą pojawiać się we Wszechświecie wielokrotnie, ponieważ stanowią optymalną odpowiedź na ogólne problemy organizacyjne materii. Zaściankowości z kolei to te wszystkie urocze, lokalne rozwiązania, które są wyłącznie skutkami ślepego, historycznego przypadku na naszej planecie. Dla życia ziemskiego taką zaściankowością mogą być konkretne molekularne implementacje, specyficzne drogi metaboliczne, architektura anatomiczna, a nawet sam zestaw zasad genetycznych, które akurat tutaj okazały się zwycięskie w loterii ewolucyjnej. Uniwersaliami natomiast będą zawsze: modularność, zdolność do utrzymywania granicy z otoczeniem, pobieranie energii, magazynowanie informacji oraz sprzężenie między aparatem zapisu a aparatem wykonawczym. Tylko takie rygorystyczne rozróżnienie chroni naukę przed prowincjonalizmem, bo inaczej będziemy szukać w kosmosie albo człowieka w szarym

kombinezonie, albo bakteryjnej kalki z ziemskiego błota. A to byłaby już po prostu poznawcza małostkowość, nieudolnie przebrana za naukowy rygor.

W tym świetle pojęcie „strefy zamieszkiwalnej" zasługuje na natychmiastowe i bezlitosne intelektualne zdemitologizowanie. Owszem, ten koncept nadal bywa użyteczny jako pierwsze, zgrubne przybliżenie w podręcznikach, ale współczesna egzogeonauka coraz wyraźniej podkreśla, że habitowalność nie zależy wyłącznie od trywialnej odległości od macierzystej gwiazdy. O tym, czy planeta może podtrzymać życie, decydują potężne siły: dynamika jej płynnego wnętrza, skomplikowany obieg lotnych związków, gęstość atmosfery, tarcza osłony magnetycznej, typ tektoniki płyt oraz długoterminowe sprzężenia klimatyczne. Najnowsze, zaawansowane przeglądy geofizyki egzoplanet idą dokładnie w tę stronę, zdecydowanie przesuwając akcent poza habitowalność rozumianą jako prosta strefa „nie za gorąco, nie za zimno". Zmierzamy ku badaniu całych, złożonych reżimów geologiczno-geofizycznych, które są zdolne do aktywnego stabilizowania środowiska przez miliardy lat.

To z kolei sprawia, że dawna, popularna hipoteza rzadkiej Ziemi przestaje wyglądać jak chłodny, naukowy realizm, a coraz częściej przypomina po prostu dobrze ubraną wersję kosmicznego konserwatyzmu. Oczywiście, Ziemia jest dla nas jedynym empirycznie potwierdzonym przykładem działającej biosfery, co do tego nie ma najmniejszych wątpliwości. Ale z tego trywialnego faktu wcale nie wynika, że nasza planeta jest rozwiązaniem jedynym, a tym bardziej – że jest rozwiązaniem optymalnym. Współczesne modele super-Ziemi i masywnych, skalistych egzoplanet sugerują coś zgoła odwrotnego: większa masa planety może znacznie ułatwiać utrzymywanie długotrwałej aktywności geologicznej wnętrza, wspierać stabilizację oceanów, a nawet sprzyjać generowaniu potężnych pól magnetycznych chroniących atmosferę przed wiatrem gwiezdnym. To naturalnie nie jest dowód na to, że życie tętni w każdej galaktyce, lecz wystarczający powód, byśmy wreszcie przestali zachowywać się tak, jakby Ziemia posiadała absolutny monopol na biologiczną sensowność.

Jeszcze bardziej kompromitujący dla naszych starych, ziemskich intuicji okazuje się fascynujący los lodowych księżyców w zewnętrznym Układzie Słonecznym. Europa pozostaje dziś jednym z absolutnie najważniejszych celów współczesnej astrobiologii właśnie dlatego, że pod jej spękaną, lodową skorupą najpewniej przelewa się globalny, słony ocean. Podobnie Tytan z jego metanowymi jeziorami i Enceladus z gejzerami wyrzucającymi materię organiczną w przestrzeń, zmuszają naukę do myślenia daleko poza banalnym równaniem „ciepła powierzchnia plus płynna woda na wierzchu". Habitowalność może być przecież głęboko ukryta, pośrednia, oparta na zupełnie innych rozpuszczalnikach niż woda, a napędzana nie światłem gwiazdy, lecz grawitacyjnym ogrzewaniem pływowym lub subtelnymi gradientami chemicznymi na ciemnym styku wody, lodu i skały.

Warto przy tym wyraźnie zaznaczyć, że wbrew obawom sceptyków, współczesna astrobiologia staje się epistemologicznie coraz bardziej surowa, a nie coraz bardziej fantastyczna. NASA metodycznie buduje dziś potężne zasoby wiedzy o detekcji życia i całkowicie otwarcie podkreśla, jak absurdalnie wysoka musi być poprzeczka interpretacyjna, zanim jakikolwiek sygnał z kosmosu zostanie oficjalnie nazwany życiem. Sama koncepcja „podium test", czyli rygorystycznego pytania o to, jakie dokładnie dane wystarczyłyby badaczowi, aby stanąć przed kamerami i z pełną odpowiedzialnością ogłosić odkrycie obcej biosfery, pokazuje dojrzałość tej dyscypliny. Prawdziwa nauka nie zakochuje się we własnych, tanich sensacjach i medialnych nagłówkach. Ona uczy się instytucjonalnego sceptycyzmu, wiedząc, że każdy błąd będzie kosztował ją utratę wiarygodności.

Tym bardziej pouczający i interesujący jest głośny przypadek egzoplanety K2-18 b, wokół której niedawno rozgorzała gorąca debata po doniesieniach o możliwych biosygnaturach w jej atmosferze. Byłoby skrajnie intelektualnie nieuczciwe przedstawiać te sygnały jako ostateczny dowód na istnienie obcego życia, bo nim po prostu nie są. Jest to jednak najsilniejszy jak dotąd sygnał wymagający żmudnej weryfikacji, mocno obciążony możliwością alternatywnych wyjaśnień abiotycznych i całkowicie zależny od wyników kolejnych obserwacji teleskopowych. Ale właśnie dlatego cała ta sprawa jest tak fascynująca z punktu widzenia metodologii. Pokazuje ona czarno na białym, że astrobiologia ostatecznie weszła w fazę, w której przestała być tylko romantyczną spekulacją wspieraną marzeniem o kontakcie. Zaczęła być twardą dyscypliną, która realnie konfrontuje skomplikowane modele chemiczne, widma odległych atmosfer i odważne hipotezy z bezlitosną rzeczywistością kosmosu.

## Życie: dynamiczny ustrój relacji

Wszystko to prowadzi nas do wniosku znacznie potężniejszego, niż życzyliby sobie tego zachowawczy komentatorzy. Życie nie jest magiczną substancją ani prostą regułką z podręcznika, lecz złożoną kategorią organizacyjną, historyczną i termodynamiczną. Termodynamika okazuje się tu kluczowa, ponieważ ożywiona materia nie trwa wbrew prawom fizyki, lecz bezwzględnie eksploatuje przepływy energii. Utrzymuje ona swój lokalny porządek niczym sprawnie zarządzane państwo, które eksportuje własną entropię poza swoje granice. Historia i organizacja są równie niezbędne, bo życie, niczym system prawny, gromadzi precedensy wcześniejszych selekcji. Otwartość ewolucyjna sprawia wreszcie, że ten układ nie jest tępym automatem powtórzeń, lecz żywą genealogią ciągłej nowości.

W tym miejscu szósta rewolucja biologiczna odzyskuje swój pełny, niezwykle ciężki wymiar filozoficzny. Nie twierdzi ona jedynie, że matematyka łaskawie pomaga dzisiejszej biologii, bo takie

sformułowanie byłoby intelektualnie karłowate. Ta rewolucja udowadnia, że dopiero dzięki teorii systemów, dynamice nieliniowej i logice informacji możemy uchwycić istotę życia. Nie badamy już wyizolowanego genomu czy samotnego białka, lecz całą architekturę relacji, rynkowych wręcz przepływów i twardych ograniczeń. Życie okazuje się w tym świetle nie cudownym wyjątkiem od praw wszechświata, ale jednym z najbardziej wyrafinowanych sposobów ich ekonomicznej organizacji.

Dlatego wszelki konformizm poznawczy staje się w obliczu tych faktów po prostu intelektualnie żałosny. To wcale nie radykalizm stanowi dzisiaj największe zagrożenie dla rozwoju nauki. Prawdziwym niebezpieczeństwem jest asekuranctwo udające mądrość, redukcjonizm przebierający się za rygor oraz lokalny nawyk myślenia udający uniwersalizm. Kto nadal naiwnie sądzi, że definicja życia musi być niewolniczo przywiązana do szkolnego podręcznika chemii, ten broni jedynie jej prowincjonalnego stadium. Prawdziwa nauka dojrzała, a jak każde w pełni suwerenne państwo ducha, nigdy nie klęka przed intelektualną biernością.

Szósta rewolucja biologiczna nie jest zatem wyłącznie prostą zmianą technicznego instrumentarium, polegającą na tym, że biolog zamiast zeszytu otwiera środowisko obliczeniowe, a obok mikroskopu stawia serwer. Taki opis byłby boleśnie trywialny, przypominający raczej raport księgowego niż rzetelną analizę. Stawka jest nieporównywalnie większa, ponieważ na naszych oczach zmienia się sama jednostka sensu w naukach o życiu. Dawniej podstawowym obiektem poznania była konkretna rzecz, potem mechanizm, a jeszcze później sucha informacja genetyczna. Dziś staje się nim dynamiczny układ relacyjny, zdolny do samopodtrzymania i generowania innowacji. To potężny przewrót epistemiczny, w którym biologia systemowa łączy modele mechanistyczne z uczeniem maszynowym, bezwzględnie zachowując ich przyczynowy sens i wiarygodność.

## System koordynacji: polityka biologicznej całości

To przesunięcie paradygmatu niesie ze sobą konsekwencje wykraczające daleko poza mury laboratoriów, uderzając w same fundamenty naszej kultury rozumu. Jeżeli bowiem uznamy, że życie jest przede wszystkim zjawiskiem organizacyjnym, a nie tylko zbiorem materialnych drobin, to nasze dotychczasowe kategorie polityczne, prawne, ekonomiczne i antropologiczne wymagają natychmiastowej rewizji. Zbyt długo nowoczesność myślała według naiwnej metafizyki magazynu, w której całość była po prostu sumą zgromadzonych w niej części. Państwo pojmowano jako mechaniczny zbiór instytucji, gospodarkę jako prosty rejestr transakcji, społeczeństwo jako luźną gromadę jednostek, a organizm biologiczny jako worek pełen narządów. Tymczasem dojrzałe

systemy, niezależnie od tego, czy mają charakter biologiczny czy społeczny, istnieją i trwają nie dlatego, że posiadają określoną listę składników, lecz dlatego, że potrafią aktywnie utrzymywać rygorystyczne reguły koordynacji między nimi. W naukach biologicznych ten dynamiczny stan nazwalibyśmy homeostazą, precyzyjną regulacją i odpornością na perturbacje. W ekonomii mówimy w tym kontekście o złożonej koordynacji rynkowej, potężnych efektach sieciowych i optymalizacji kosztów transakcyjnych. W naukach prawnych z kolei opisujemy to zjawisko poprzez instytucjonalizację norm oraz mechanizmy ich skutecznej egzekwowalności. Szósta rewolucja biologiczna staje się zatem czymś znacznie potężniejszym niż tylko kolejnym rozdziałem w historii nauk o życiu. Jest ona fundamentalnym argumentem wymierzonym przeciwko redukcjonizmowi jako dominującemu stylowi myślenia w całej zachodniej nauce.

Dlatego właśnie należy bronić tej intelektualnej rewolucji z całą stanowczością, odrzucając lękliwą minoderię rzekomego złotego środka. Konformistyczny umysł akademicki, przerażony radykalizmem nowych koncepcji, lubi dziś powtarzać, że potrzebna jest równowaga między redukcjonizmem a holizmem, między surowymi danymi a abstrakcyjną teorią czy wreszcie między eksperymentem a modelem. Brzmi to niezwykle rozsądnie, wręcz kojąco, ale w rzeczywistości bywa całkowicie puste poznawczo i służy jedynie zachowaniu status quo. Nie każda symetria stanowisk jest cnotą, a czasem owa wychwalana równowaga jest tylko eleganckim słowem na zwykłe intelektualne tchórzostwo. W obecnym, wysoce zaawansowanym stadium rozwoju nauki to właśnie modelowanie systemowe, topologia, teoria sieci, dynamika nieliniowa i ujęcia mechanistyczne poszerzone o wielkie zbiory danych stały się bezwzględnym warunkiem postępu, a nie tylko jego opcjonalnym dodatkiem. Surowe dane pozbawione rygorystycznej teorii nie są żadną obiektywną neutralnością, lecz jedynie informacyjnym nadmiarem pozbawionym jakiejkolwiek hierarchii znaczeń. Algorytm, który nie opiera się na zrozumieniu mechanizmu, nie jest jeszcze pełnoprawną wiedzą, a jedynie predykcją – czasem wprawdzie użyteczną, ale nadal epistemicznie niedomkniętą i ślepą na przyczyny. Najnowsze opracowania z zakresu zaawansowanego modelowania biologicznego mówią o tym problemie całkowicie otwarcie, mocno akcentując kwestię identyfikowalności parametrów, wiarygodności tworzonych modeli oraz absolutnej konieczności interpretowalnego połączenia metod maszynowego uczenia się z głęboką dynamiką mechanistyczną.

To nieuchronnie prowadzi nas do jeszcze jednego, niezwykle ostrego sporu, tym razem dotyczącego samej polityki uprawiania nauki i zarządzania wiedzą. Przez całe dekady można było żywić wygodną iluzję, że wąska specjalizacja badawcza sama z siebie, w sposób niemal magiczny, generuje ogólny postęp ludzkości. Dziś jednak widzimy z przerażającą ostrością, że specjalizacja pozbawiona nadrzędnego języka integracji zaczyna produkować niebezpieczną, poznawczą feudalizację uniwersytetów. Jedni naukowcy w skupieniu badają geny, drudzy analizują sieci

metaboliczne, trzeci tną na skrawki tkanki, czwarci rozwijają techniki obrazowania, piąci wpatrują się w widma atmosfer odległych egzoplanet, a szóści trenują kolejne modele uczenia maszynowego. Jeśli jednak w tym gąszczu dyscyplin nie istnieje żadna metaarchitektura pojęciowa, w ramach której te odizolowane poziomy rzeczywistości mogą zostać logicznie uzgodnione, nauka zaczyna przypominać rozbitą federację feudalnych księstewek, z których każde bije własną monetę i stanowi własne prawo. Szósta rewolucja biologiczna jest w swojej istocie gwałtownym buntem przeciwko tej szkodliwej parcelacji ludzkiego poznania. Mówi ona wyraźnie, że oszałamiająca złożoność zjawiska życia wymaga od nas nie tylko perfekcyjnej specjalizacji w detalach, lecz również odzyskania suwerenności integracyjnej na poziomie całości. Matematyka wyższa, fizyka statystyczna i ogólna teoria systemów stają się w tym nowym paradygmacie czymś na kształt wspólnego, uniwersalnego języka konstytucyjnego dla wszystkich nauk o życiu.

W tym miejscu czas wrócić do niezwykle istotnego wątku Fundacji Dobre Państwo, na której stronie znajdzie się stanowisko fundamentalne dla zrozumienia tego szerokiego tematu. Opublikowany tam tekst, traktujący o dynamice nieliniowej i strukturach fraktalnych, mocno akcentuje, że teoria bifurkacji, geometria fraktalna i właśnie dynamika nieliniowa całkowicie redefiniują nasze podejście do biologii, ekonomii i polityki wszędzie tam, gdzie proste sumowanie części sromotnie zawodzi. To nie jest oczywiście artykuł stricte biologiczny w klasycznym rozumieniu tego słowa, ale jego głęboka intuicja trafia w samo serce omawianej tu wielkiej przemiany paradygmatycznej. Życie w swojej istocie nie jest procesem liniowym, społeczeństwo ludzkie nie jest układem liniowym, a cały nasz złożony świat po prostu nie daje się sprowadzić do prymitywnych metod rachunkowych, które były odpowiednie dla układów prostych. To niezwykle ważny sygnał intelektualny, ponieważ pokazuje on uderzającą zgodność między filozofią złożoności, tak wyraźnie obecną na stronie Fundacji, a śmiałą tezą o matematycznym i systemowym przeobrażeniu całej współczesnej biologii. Pokazuje to również, że narzędzia pojęciowe wykuwane w tyglach nauk ścisłych mają bezpośrednie przełożenie na to, jak rozumiemy i jak powinniśmy projektować nasze instytucje społeczne.

Na tym fascynującym tle fundamentalne pytanie „czym właściwie jest życie” przestaje być domeną czysto biologiczną, a staje się głębokim pytaniem o ostateczne granice naszej racjonalności klasyfikacyjnej. Słynna, robocza definicja sformułowana przez NASA, wedle której życie jest samopodtrzymującym się układem chemicznym zdolnym do darwinowskiej ewolucji, pozostaje wprawdzie operacyjnie użyteczna, ale równocześnie sama agencja przyznaje, że to definicja wywiedziona wyłącznie z jednego znanego nam przypadku. Z tego właśnie powodu współczesne, zaawansowane badania nad detekcją życia, tworzeniem sztucznego życia w laboratoriach oraz astrobiologią systematycznie przesuwają oś dyskusji w stronę znacznie bardziej ogólnych cech organizacyjnych. Wymienia się tu przede wszystkim autonomię układu, jego zdolność do

aktywnego utrzymywania granic termodynamicznych, efektywnego przetwarzania energii, produkowania dziedzicznej zmienności oraz zachowania otwartości ewolucyjnej. To niezwykle istotna korekta kursu poznawczego: nowoczesnej biologii absolutnie nie wystarcza już tylko lokalny opis tego, co przypadkowo zastała na naszej planecie. Potrzebuje ona uniwersalnego języka, zdolnego opisać to, co mogłoby liczyć się jako pełnoprawne życie także w zupełnie innych, ekstremalnych warunkach poza Ziemią.

Tutaj właśnie objawia się w pełnej krasie prawdziwe, głębokie znaczenie astrobiologii jako rygorystycznej dyscypliny naukowej. Nie jest ona, jak chcieliby niektórzy krytycy, jedynie naukową odmianą popkulturowej tęsknoty za kosmiczną egzotyką, lecz potężnym laboratorium pojęciowym, w którym bezlitośnie testujemy nasze własne definicje życia. Sonda Europa Clipper nie leci w mroczne ostępy Jowisza po to, aby sfotografować jakiegoś małego obywatela obcego imperium, lecz po to, aby precyzyjnie ustalić, czy księżyc Europa w ogóle posiada warunki fizykochemiczne mogące wspierać zjawisko życia. Oficjalny cel tej historycznej misji został sformułowany w chłodnych kategoriach oceny miejsc pod powierzchnią lodowej skorupy, które mogłyby sprzyjać procesom życiowym, a nie w naiwnych kategoriach odnalezienia tam gotowej biosfery. To jest różnica absolutnie fundamentalna, oznaczająca ostateczne przejście od dziecinnej mitologii wizualnego podobieństwa do dojrzałej analizy uniwersalnych warunków organizacyjnych materii. Europa pozostaje wprawdzie jednym z najbardziej obiecujących światów oceanicznych w Układzie Słonecznym, choć jednocześnie najnowsze badania trzeźwo przypominają, że jej potencjał habitacyjny wcale nie jest oczywisty i może być drastycznie ograniczany przez zbyt słabą aktywność dna oceanicznego. To jest właśnie oblicze dojrzałej nauki: nie ma tu miejsca ani na medialną egzaltację, ani na destrukcyjny cynizm, jest tylko bezwzględny rygor warunkowy.

Podobny, żelazny rygor metodologiczny dotyczy obecnie niezwykle gorącej debaty o biosygnaturach egzoplanetarnych, rozpalającej wyobraźnię astronomów. Niedawne zamieszanie medialne wokół planety K2-18b absolutnie nie daje nam jeszcze prawa do triumfalnego ogłoszenia, że oto życie pozaziemskie zostało ostatecznie wykryte. Ale z drugiej strony, nie wolno nam także reagować na te doniesienia znudzonym wzruszeniem ramion, jakby w kosmosie nie wydarzyło się nic istotnego poznawczo. To jest klasyczny przypadek graniczny, w którym nowoczesna astronomia obserwacyjna, skomplikowana chemia atmosfer obcych światów i rygorystyczna metodologia wykrywania życia spotykają się w jednym punkcie najwyższego napięcia intelektualnego. Gdy w danych pojawiają się słabe sygnały związków potencjalnie biologicznych, takich jak DMS czy DMDS, odpowiedzialna nauka pyta nie tylko z ekscytacją „czy to jest życie?”. Pyta ona przede wszystkim: „jakie znane nam, niebiologiczne procesy geochemiczne mogą dać identyczny efekt?”, „jak bardzo pewny jest nasz model atmosfery?” oraz „jakie konkretnie dalsze obserwacje mogą ostatecznie rozstrzygnąć ten spór?”. To właśnie ten surowy reżim sceptycznego dochodzenia, a nie

pogoń za nagłówkami, stanowi dziś o prawdziwej dojrzałości astrobiologii. Liczy się tu nie tania sensacja, lecz żmudna procedura; nie krzykliwy tytuł, lecz starannie zbudowana hierarchia wyjaśnień.

Szósta rewolucja biologiczna ma jednak również swój niezwykle istotny, choć rzadziej omawiany, wymiar prawny i ściśle instytucjonalny. Każda dojrzała dyscyplina naukowa potrzebuje bowiem do prawidłowego funkcjonowania nie tylko genialnych odkryć, lecz także twardych procedur walidacji, wyśrubowanych standardów dowodowych, jasnych progów uznania faktu za udowodniony oraz rygorystycznych reguł odpowiedzialności interpretacyjnej. Astrobiologia, zwłaszcza w swoim newralgicznym obszarze wykrywania życia, robi dziś dokładnie to: z mozołem buduje publicznie dostępne zasoby danych, tworzy solidne ramy interpretacyjne i wykuwa narzędzia do obiektywnej oceny siły zebranego dowodu. To proces o kapitalnym znaczeniu, ponieważ skutecznie chroni on naukę przed dwiema groźnymi patologiami jednocześnie. Z jednej strony broni przed naiwną łatwowiernością, która skłonna jest widzieć przejawy życia w absolutnie każdej anomalii chemicznej, a z drugiej chroni przed paraliżującym konserwatyzmem, który podnosi poprzeczkę sceptycyzmu tak absurdalnie wysoko, że praktycznie uniemożliwia uznanie czegokolwiek za przełomowy sygnał. Rozsądek naukowy nie jest tutaj po prostu leniwym środkiem między naiwnością a cynizmem. Jest on precyzyjnie, świadomie zaprojektowaną instytucją epistemiczną.

Z tego wszystkiego wynika jasny wniosek, że szósta rewolucja biologiczna jest w gruncie rzeczy wielką rewolucją przeciwko wszelkim formom poznawczego prowincjonalizmu. Występuje ona ostro przeciw prowincjonalizmowi chemicznemu, który z uporem maniaka utożsamia zjawisko życia wyłącznie z jednym, opartym na węglu materiałem. Buntuje się przeciw prowincjonalizmowi skali, który w swojej ślepocie nie rozumie, że procesy zachodzące lokalnie i globalne zjawiska planetarne wzajemnie się warunkują. Walczy przeciw prowincjonalizmowi dyscyplinarnemu, który sztucznie dzieli spójną wiedzę o świecie na odizolowane księstwa pozbawione wspólnego języka. Występuje przeciw prowincjonalizmowi metodologicznemu, który bezmyślnie fetyszyzuje same dane albo samą teorię, zamiast głęboko rozumieć ich nierozerwalne sprzężenie. I wreszcie, co być może najważniejsze, jest to bunt przeciwko prowincjonalizmowi kulturowemu, który z nieznośną arogancją wciąż chce widzieć w człowieku ostateczną miarę wszystkiego, podczas gdy biologia systemowa i astrobiologia pokazują dobitnie, że człowiek jest zaledwie jedną z wielu możliwych implementacji uniwersalnych reguł organizacji.

Trzeba to wreszcie powiedzieć głośno, używając języka nieco bardziej brutalnego i odartego z akademickich eufemizmów. Stara, klasyczna biologia lubiła zachowywać się jak skrupulatny urząd ewidencji ludności: jej głównym celem było liczyć okazy, klasyfikować gatunki, identyfikować białka i przypisywać je do odpowiednich szufladek. Nowa biologia, zrodzona z ducha szóstej rewolucji,

coraz częściej przypomina natomiast potężny sąd konstytucyjny złożoności. Bada ona fundamentalne warunki możliwości zaistnienia systemów, wnikliwie analizuje ostre konflikty między różnymi poziomami organizacji oraz autorytatywnie rozstrzyga, które własności układu są tylko lokalnym przypadkiem, a które należą do uniwersalnego ładu ogólnego. To właśnie dlatego kategorie pojęciowe takie jak emergencja, nieliniowość, topologia przestrzenna, sieciowość, wieloskalowość czy otwartość ewolucyjna nie są dziś tylko modnymi ozdobnikami w grantowych wnioskach. Są one absolutnie koniecznymi, twardymi kategoriami porządkującymi naszą wiedzę o rzeczywistości. Kto w dzisiejszych czasach je lekceważy, ten wcale nie stoi po stronie naukowego rygoru, lecz po stronie żałosnego anachronizmu.

W konsekwencji tych wszystkich przemian, także sama nasza koncepcja racjonalności wymaga głębokiego przewartościowania. W minionym stuleciu nauka uchodziła najczęściej za wielki triumf bezlitosnej redukcji, precyzyjnej izolacji pojedynczych zmiennych i sterylnego eksperymentu kontrolowanego. Wszystko to oczywiście pozostaje bezcennym dorobkiem ludzkości, którego nie wolno nam odrzucić. Ale XXI wiek dopisuje do tego dziedzictwa drugą, znacznie trudniejszą połowę lekcji. Dziś rozumieć świat znaczy także umieć sprawnie modelować jego oszałamiającą złożoność, trafnie przewidywać nagłe przejścia fazowe, bezbłędnie identyfikować ukryte punkty wrażliwości w rozległych sieciach, rozpoznawać emergentne skutki działania lokalnych reguł oraz odważnie projektować hipotezy dla światów, których jeszcze nie obserwowaliśmy. To jest rozum znacznie silniejszy, a nie słabszy od swojego poprzednika. Jest on nieporównywalnie bardziej ambitny, ponieważ nie zadowala się już tylko prosektoryjnym rozbiorem rzeczywistości na najdrobniejsze części składowe. Chce on jeszcze wiedzieć, w jaki dokładnie sposób i dlaczego z tych martwych części powstaje nagle pulsujący porządek, który następnie staje się zdolny do samodzielnego trwania, adaptacyjnej zmiany i samoprzekształcenia.

Ostateczny, syntetyczny wniosek z tych rozważań brzmi więc następująco. Pięć dawnych, wielkich rewolucji biologicznych systematycznie odsłaniało przed nami kolejne, coraz głębsze warstwy fenomenu życia. Wynalezienie mikroskopu ujawniło nam tętniący mikroświat, o którym wcześniej nie mieliśmy pojęcia. Rygorystyczna taksonomia uporządkowała oszałamiającą mnogość form w logiczne drzewa pokrewieństwa. Teoria ewolucji nadała życiu głęboki, historyczny czas i dynamikę zmian. Genetyka klasyczna nadała mu dyskretność i mechanizm dziedziczenia cech. Odkrycie struktury DNA nadało mu wreszcie uniwersalny język molekularnego kodu. Szósta rewolucja biologiczna czyni jednak coś jeszcze potężniejszego: pokazuje nam z całą mocą, że nad tym wszystkim istnieje znacznie wyższy poziom rozumienia, na którym życie jawi się przede wszystkim jako dynamiczny ustrój relacji, a nie tylko prosta suma materialnych komponentów. Zjawiska takie jak fitotaksja, skomplikowana morfogeneza, geometria wielowymiarowa wirusowych kapsydów, zawiła topologia nici DNA, złożone sieci metaboliczne, neurobiologia matematyczna, ewolucyjna

teoria gier, chaos deterministyczny i wreszcie astrobiologia nie są już tylko oddzielnymi ciekawostkami. Są one spójnymi rozdziałami jednej i tej samej opowieści o tym, że życie to wcale nie magiczna substancja, lecz szczególny reżim organizacji materii, zdolnej do wykonywania pracy, gromadzenia pamięci i generowania nowości.

Tutaj tkwi najbardziej płodna, intelektualna prowokacja całego tego naukowego przedsięwzięcia. Jeżeli bowiem przyjmiemy, że życie jest w swojej najgłębszej istocie przede wszystkim formą organizacji, to sztuczna granica między biologią, zaawansowaną informatyką, fizyką statystyczną, ekonomią instytucji i ogólną teorią systemów nie będzie się już tylko powoli zwężać, lecz zacznie się całkowicie rozpuszczać. To w żadnym wypadku nie jest kapitulacja biologii przed naukami ścisłymi, jak obawiają się niektórzy tradycjonaliści. To jest jej ostateczne, triumfalne dojrzewanie. Biologia przestaje być wreszcie prowincjonalną nauką o tym, co tylko ziemskie i żywe w klasycznym sensie, a staje się potężną nauką o formach organizacji, które potrafią wytwarzać stabilną trwałość bez popadania w martwy bezruch, budować porządek bez uciekania się do trywialnej prostoty i generować nowość bez staczania się w absolutny chaos. Innymi słowy, biologia po wiekach poszukiwań wreszcie zaczyna w pełni rozumieć swój własny przedmiot badań. A kiedy tak potężna gałąź nauki zaczyna rozumieć swój przedmiot tak głęboko, cała reszta ludzkiej cywilizacji powinna się lepiej ubrać, usiąść prosto i zacząć bardzo uważnie słuchać.

## Szósta rewolucja: bunt przeciw feudalizmowi nauki

Pozostaje nam zatem do wykonania ruch ostatni, ten absolutnie najważniejszy, ponieważ domyka on nie tylko sam argument biologiczny, lecz także jego dalekosiężne konsekwencje cywilizacyjne. Musimy mianowicie uznać, i to bez uciekania się do wygodnych półśrodków, że szósta rewolucja biologiczna jest w swej istocie potężną rebelią przeciwko intelektualnemu feudalizmowi. Występuje ona przeciwko anachronicznemu podziałowi wiedzy na małe, odizolowane księstwa, w których biolog rozmawia wyłącznie z biologiem, matematyk z matematykiem, a informatyk z informatykiem. Filozof zaś, jeśli w ogóle pojawia się w tym krajobrazie, najczęściej produkuje gęstą mgłę zamiast ostrych jak brzytwa pojęć. Tymczasem współczesna nauka o życiu coraz jawniej i dobitniej dowodzi, że granice między tymi domenami nie są wcale liniami wyrysowanymi przez naturę, lecz zaledwie sztucznymi granicami administracyjnymi dawnej organizacji wiedzy. Najnowsze teksty z obszaru biologii systemowej, czyli dziedziny badającej złożone interakcje wewnątrz układów biologicznych, mówią wprost, że przyszłość należy do modelowania hybrydowego. Łączy ono klasyczne modele mechanistyczne z nowoczesnymi metodami uczącymi się, przy bezwzględnym zachowaniu interpretowalności i przyczynowego sensu, bowiem sama obfitość danych nie wystarcza do głębokiego rozumienia organizmów i trawiących je chorób.

Właśnie w tym punkcie biologia spotyka się z ekonomią, prawem i antropologią i nie jest to bynajmniej tania analogia salonowa, lecz realne, głębokie podobieństwo strukturalne. System żywy, zupełnie tak samo jak dojrzała i skomplikowana gospodarka, nie jest po prostu zbiorem luźno rzuconych składników, lecz wysoce precyzyjnym układem koordynacji. Podobnie jak porządek prawny, system ten nie działa wyłącznie dlatego, że istnieją w nim jakieś abstrakcyjne normy, lecz dlatego, że normy te są twardo osadzone w procedurach, egzekwowalności, sprzężeniach zwrotnych i zdolności do błyskawicznego reagowania na zakłócenia. Podobnie wreszcie jak kultura, życie nie jest tylko biernym magazynem treści, lecz dynamicznym sposobem ich transmisji, bezlitosnej selekcji, mutacji i ciągłej reprodukcji. W tym niezwykle szerokim sensie życie ujawnia się przed nami jako najbardziej wyrafinowana znana nam forma instytucjonalizacji materii. Materia żywa nie istnieje po prostu, trwając w bezwładzie, lecz aktywnie organizuje własne trwanie, surowo zarządza granicą między wnętrzem a otoczeniem i utrzymuje rygorystyczne reżimy przepływu energii. Akumuluje przy tym skutki przeszłych selekcji i pozostaje zdolna do radykalnej zmiany bez utraty swojej fundamentalnej tożsamości, co stanowi definicję znacznie bardziej wymagającą niż szkolne listy cech, ale przez to nieporównywalnie bardziej uczciwą wobec rzeczywistości.

Szczególnie mocno warto uderzyć w jeden z ostatnich bastionów poznawczej tandety, czyli w powszechne, a zarazem błędne przekonanie, że radykalny interdyscyplinaryzm oznacza rozmycie naukowego rygoru. Prawda jest bowiem dokładnie odwrotna, gdyż to nader często specjalizm, zwłaszcza ten źle i bezrefleksyjnie uprawiany, produkuje miękkie, leniwe myślenie. Skutecznie chroni on badacza przed konfrontacją z pytaniami, których jego własny, wąski warsztat po prostu nie umie unieść. Szósta rewolucja biologiczna drastycznie zaostrza wymagania wobec ludzkiego umysłu, zmuszając do myślenia w jednym czasie o geometrii, dynamice, topologii, ewolucji, informacji, energetyce oraz o instytucjonalnych warunkach uznawania dowodów. Wymaga zatem od nas nie mniejszej ścisłości, lecz ścisłości absolutnie bezprecedensowej i wielowymiarowej. Kto w obliczu tych wyzwań mówi, że to już „za szeroko” i zbyt skomplikowanie, ten najczęściej wcale nie broni czystości nauki, lecz wyłącznie własnej strefy kompetencyjnego komfortu. Nauka wszak nie ma najmniejszego obowiązku być wygodna dla swoich urzędników, ma natomiast jeden nadrzędny obowiązek: być adekwatna wobec otaczającego nas świata.

Ta bezwzględna adekwatność staje się dzisiaj szczególnie widoczna w astrobiologii, która dawno przestała być jedynie egzotycznym działem poszukiwań kosmicznych, stając się rygorystycznym laboratorium definicji samego życia. Amerykańska agencja NASA nadal posługuje się roboczą definicją życia jako samopodtrzymującego się układu chemicznego zdolnego do darwinowskiej ewolucji. Równocześnie jednak sama agencja z naciskiem podkreśla, że definicja ta wyrasta z jedynego znanego nam przypadku, czyli z prowincjonalnego życia ziemskiego. Z tego właśnie, głęboko filozoficznego powodu, współczesne badania nad detekcją życia rozwijają całe,

skomplikowane ramy metodologiczne. Służą one nie tylko prostemu wykrywaniu sygnałów, lecz także precyzyjnemu porządkowaniu poziomów niepewności, budowaniu wielostopniowych drabin dowodowych i ostrożnemu odróżnianiu biosygnatur od zwykłych procesów abiotycznych. To w żadnym razie nie jest dowód słabości naszej definicji, lecz ostateczny dowód dojrzałości dyscypliny, która doskonale wie, że najniebezpieczniejsza w nauce bywa wcale nie ignorancja, lecz przedwczesna pewność.

Księżyc Jowisza, Europa, będący jednym z głównych symboli tej nowej fazy naukowego myślenia, jest w tym sensie figurą niemal idealną i niezwykle pouczającą. Oficjalny program badawczy Europa Clipper wcale nie obiecuje triumfalnego znalezienia życia, lecz jedynie rzetelną ocenę habitowalności, to znaczy zdolności tamtejszego środowiska do wspierania jakichkolwiek procesów życiowych. NASA słusznie podkreśla fundamentalne znaczenie ciekłej wody, obecności odpowiednich związków chemicznych oraz dostępnych źródeł energii, a obserwacje pola magnetycznego Europy nadal wspierają hipotezę globalnego oceanu pod lodową skorupą. Zarazem jednak najnowsze, chłodne badania pokazują, że potencjał habitacyjny Europy może być znacznie bardziej problematyczny, zwłaszcza jeśli aktywność dna oceanicznego jest tam dziś słabsza, niż przez dekady optymistycznie zakładano. To jest właśnie czyste piękno nauki najwyższej próby, która nie mitologizuje celu swoich badań, nie goni za tanią sensacją, tylko systematycznie podnosi jakość zadawanego pytania. Europa pozostaje kandydatem wybitnym nie dlatego, że spełnia nasze naiwne marzenia o kosmicznych sąsiadach, lecz dlatego, że zmusza nas do absolutnej precyzji pojęć.

Dokładnie w tym samym, rygorystycznym duchu należy czytać i interpretować debatę o możliwych biosygnaturach na egzoplanetach pokroju K2-18 b. Sam fakt, że atmosfera tak niewyobrażalnie odległego świata może dostarczyć nam widmowych przesłanek do poważnej rozmowy o procesach potencjalnie biologicznych, jest już wydarzeniem bezsprzecznie epokowym. Ale owa epokowość w niczym nie zwalnia nas z metodologicznej dyscypliny i chłodnego osądu. Doniesienia z 2025 roku o możliwych śladach DMS i DMDS, czyli związków siarki często kojarzonych z aktywnością biologiczną, nie stanowią bynajmniej ogłoszenia odkrycia życia. Są one jedynie sygnałem wymagającym żmudnej, wieloletniej weryfikacji i bezlitosnego testowania wszelkich wyjaśnień niebiologicznych. Reakcja intelektualnie odpowiedzialna nie brzmi więc ani histerycznie „mamy obcych”, ani cynicznie „to nic nie znaczy”, lecz stwierdza, że weszliśmy w strefę, gdzie pytanie o życie staje się problemem rozstrzygalnym warunkowo. To nie jest język taniego widowiska dla mas, lecz język dojrzałej cywilizacji, która w bólach nauczyła się odróżniać medialną sensację od twardego dowodu.

W tym miejscu ujawnia się z całą mocą znaczenie polityczne, a wręcz ustrojowe tej biologicznej rewolucji; żyjemy wszak w epoce tonącej w danych i cierpiącej na niedobór sensownych modeli. Dotyczy to w równej mierze nauki, globalnej gospodarki, administracji państwowej, mediów i całej, coraz bardziej chaotycznej debaty publicznej. Szósta rewolucja biologiczna jawi się w tym pejzażu jako twarda, bezkompromisowa szkoła rozumu, która mówi jasno, że nie wystarczy tylko mierzyć, trzeba jeszcze wiedzieć, co znaczy zależność. Nie wystarczy bezmyślnie klasyfikować zjawisk, trzeba rozumieć, co jest głębokim uniwersalium, a co jedynie zaściankowością lokalnego przypadku, tak samo jak nie wystarczy wykrywać korelacji bez identyfikacji mechanizmów. I wreszcie, nie wystarczy marzyć o innowacji, trzeba umieć bezbłędnie odróżnić złożoność płodną, generującą nową jakość, od złożoności jałowej, będącej tylko szumem. To jest surowa lekcja, którą równie dobrze mogliby, a wręcz powinni przyswoić sobie regulatorzy rynków finansowych, architekci państwa i zarządy korporacji, dla których biologia okazuje się najsurowszą nauczycielką racjonalności.

Nieprzypadkowo także na stronie Fundacji Dobre Państwo pojawia się tak silny akcent na dynamikę nieliniową, fraktale i teorię bifurkacji, czyli naukę o nagłych, skokowych zmianach w systemach. To stanowisko, traktujące te zjawiska jako narzędzia rozumienia świata społecznego i politycznego, jest głęboko zbieżne z głównym nurtem argumentu rozwiniętego w niniejszym tekście. Proste, mechaniczne sumowanie części zawodzi z kretesem tam, gdzie system wytwarza własności emergentne, czyli takie, których nie da się sprowadzić do cech pojedynczych elementów. Zawodzi tam, gdzie układ ma swoje punkty krytyczne, gdzie występują wieloskalowe sprzężenia zwrotne i gdzie z pozoru błahe zakłócenie może uruchomić lawinową zmianę jakościową całego układu. Fundacja niezwykle słusznie sygnalizuje, że nieliniowość nie jest matematycznym dziwactwem, lecz absolutnym warunkiem dojrzałego myślenia, udowadniając, że filozofia złożoności to język niezbędny do orientacji w realnym świecie.

W takim właśnie, bezlitosnym świetle wszystkie wątki tej pracy zaczynają układać się w jedną, surową i niezwykle mocną tezę. Pięć dawnych rewolucji biologicznych wcale nie było serią zamkniętych, historycznych epizodów, lecz kolejnymi, bolesnymi etapami rozbrajania naszej ludzkiej naiwności. Wynalezienie mikroskopu zniszczyło naiwność skali, taksonomia ukróciła nieuporządkowane mnożenie bytów, a teoria ewolucji pogrzebała esencjalizm gatunkowy. Z kolei genetyka i odkrycie struktury DNA zniszczyły naiwność wobec mechanizmów i materialnych nośników dziedziczenia, otwierając drogę do głębszego zrozumienia biologii. Szósta rewolucja idzie jednak najdalej, niszcząc naiwność ostatnią, polegającą na aroganckim przekonaniu, że jeśli znamy wszystkie części składowe, to znamy już całą istotę rzeczy. Nie, wcale nie znamy, bo w rzeczywistości dysponujemy dopiero surowym materiałem, z którego trzeba ulepić właściwe pytanie.

Dlatego finał tej rozprawy musi być maksymalnie wyostrzony, a nie dyplomatycznie łagodzony w imię akademickiego spokoju. Życie nie jest ani łagodną, poetycką tajemnicą, ani prostym programem chemicznym, który można odpalić w probówce, ani tym bardziej estetyczną dekoracją pustego kosmosu. Jest ono najpoważniejszym znanym nam, twardym dowodem na to, że martwa materia może wejść w taki reżim organizacji, w którym samo trwanie staje się aktywną zdolnością. W którym zmiana staje się zapisaną pamięcią, a ślepy przypadek staje się celową historią selekcji, co stanowi definicję całkowicie pozbawioną sentymentalizmu, ale obarczoną ogromnym ciężarem filozoficznym. Oznacza ona bowiem ni mniej, ni więcej, że żywe nie jest tym, co tylko biernie istnieje, lecz tym, co potrafi suwerennie ustanowić własne warunki dalszego istnienia, przetwarzając energię i informację w zorganizowaną kontynuację.

A skoro sprawy mają się w ten sposób, to szósta rewolucja biologiczna jest także, a może przede wszystkim, wielką rewolucją przeciw intelektualnej bylejakości. Występuje ona przeciwko fetyszowi zwodniczej prostoty, przeciwko kultowi surowych danych pozbawionych teorii i przeciwko dogmatowi jednej, słusznej skali opisu. Buntuje się przeciwko chemicznemu prowincjonalizmowi w definiowaniu życia, przeciwko dyscyplinarnej pysze akademików i przeciwko centrowemu uspokajaniu sporów tam, gdzie ostry spór jest zjawiskiem twórczym. Rozsądek nie polega dzisiaj na tym, by w imię fałszywego kompromisu każdej tezie przydzielić dokładnie połowę racji, lecz na tym, by umieć rozpoznać moment, w którym rzeczywistość przestała być centrowa. A biologia współczesna – od fitotaksji po astrobiologię, od topologii DNA po teorię chaosu i sztuczne sieci neuronowe – przestała być centrowa i przewidywalna już bardzo dawno temu.

Szósta rewolucja biologiczna uczy nas ostatecznie, że życie nie jest po prostu kolejną rzeczą do skatalogowania i opisania, lecz potężnym porządkiem do głębokiego zrozumienia. Wymaga to odrzucenia starych nawyków poznawczych i przyjęcia perspektywy, w której to powiązania definiują elementy, a nie odwrotnie. Kto tę fundamentalną prawdę zrozumie, ten zacznie zupełnie inaczej myśleć nie tylko o pojedynczej komórce, złożonym organizmie i całej biosferze. Zacznie inaczej myśleć również o strukturze państwa, o mechanizmach rynku, o rozwoju technologii, o architekturze instytucji i wreszcie o naturze samego ludzkiego rozumu. Kto zaś tego nie ogarnie, będzie nadal z uporem księgowego liczył izolowane części, podczas gdy świat od dawna działa już na zupełnie innym, wyższym poziomie skomplikowanych relacji.

> Czy zatem człowiek, próbując zrozumieć życie jako czystą organizację, nie staje się powoli własnym algorytmem? Być może w poszukiwaniu uniwersalnych praw biologii nieodwracalnie tracimy z oczu to, co w naturze pozostaje nieobliczalne. Czy biologia

> stanie się ostatecznym lustrem, w którym nasza cywilizacja wreszcie przejrzy się jako system skazany na nieustanną redefinicję swoich granic?

## Inspiracje

**[1]** **"The mathematics of life"** Ian Stewart

*2011 | Basic Books*

**Ian Stewart** jest brytyjskim matematykiem i emerytowanym profesorem matematyki na Uniwersytecie w Warwick. Członek Royal Society, znany ze swoich badań nad dynamiką nieliniową, formowaniem się wzorców i biomatematyką, a także z szeroko zakrojonej działalności popularyzatorskiej w dziedzinie matematyki, w tym z licznych książek, w tym „Czy Bóg gra w kości?" i serii „Nauka o Świecie Dysku". Otrzymał liczne nagrody za wkład w popularyzację nauki.

***Ian Stewart*** *is a British mathematician and Emeritus Professor of Mathematics at the University of Warwick. A Fellow of the Royal Society, he is renowned for his research in nonlinear dynamics, pattern formation, and biomathematics, as well as his extensive work in popularizing mathematics through numerous books, including 'Does God Play Dice?' and 'The Science of Discworld' series. He has received numerous awards for his contributions to the public understanding of science.*

*University of Warwick*

## Literatura uzupełniająca

### Książki

#### Autorzy przywoływani w artykule:



**[1]** **"The Collapse of Chaos: Discovering Simplicity in a Complex World"**

Ian Stewart, Jack Cohen

1994 | Viking Adult



**[2]** **"Singularities and Groups in Bifurcation Theory"**

Martin Golubitsky, Ian Stewart, David Schaeffer

2013 | Springer Science & Business Media | ISBN: 9781461250340



[3] **"Does God Play Dice? The New Mathematics of Chaos"**

Ian Stewart

1997 | ePenguin

## Literatura pokrewna (Google Scholar):



[4] **"Species Plantarum"**

Carl Linnaeus

2018 | Palala Press | ISBN: 9781378351192



[5] **"The Malay Archipelago: The Land of the Orang-utan, and the Bird of Paradise"**

Alfred Russel Wallace

2010 | Macmillan and Co. | ISBN: 9781906780319



[6] **"The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics"**

Roger Penrose

2016 | Oxford University Press | ISBN: 9780192550071

[7] **"O powstawaniu gatunków drogą doboru naturalnego, czyli o utrzymaniu się doskonalszych ras w walce o byt"**

Karol Darwin

1859 | John Murray

[8] **"O pochodzeniu człowieka i doborze w odniesieniu do płci"**

Karol Darwin

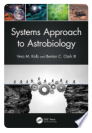
1871 | John Murray



[9] **"Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness"**

Roger Penrose

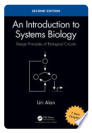
1994 | Oxford University Press



[10] **"Systems Approach to Astrobiology"**

Vera M. Kolb, Benton C. Clark

2023 | CRC Press | ISBN: 9781000868821



[11] **"An Introduction to Systems Biology: Design Principles of Biological Circuits"**

Uri Alon

2019 | CRC Press | ISBN: 9781000008166

## Artykuły naukowe

### Autorzy przywoływani:

[1] **"Emergence in biological systems: from molecules to ecosystems"**

Denis Noble

2018 | Interface Focus

Google Scholar

[2] **"Mathematical models of excitation and propagation in nerve"**

Richard FitzHugh

1969 | Biological Engineering

Google Scholar

[3] **"Assembly theory bridges the gap between physics and biology to explain evolution and complexity"**

Sara I. Walker, et al.

2023 | Nature

Google Scholar

[4] **"Emerging trends in systems biology: multi-omics integration and beyond"**

Wang N., Zhang G.C., Li M.M.

2024 | Computational Molecular Biology

Google Scholar

[5] **"Systems biology: definitions and perspectives"**

Hiroaki Kitano

2002 | Science

Google Scholar

[6] **"On the Tendency of Species to form Varieties; and on the Perpetuation of Varieties and Species by Natural Means of Selection"**

Charles Darwin, Alfred Russel Wallace

1858 | Journal of the Proceedings of the Linnean Society of London

Google Scholar

[7] **"On the Law Which Has Regulated the Introduction of New Species"**

Alfred Russel Wallace

1855 | Annals and Magazine of Natural History

Google Scholar

[8] **"Systems biology, emergence and antireductionism"**

Srdjan Kesić

2016 | Saudi Journal of Biological Sciences

Google Scholar

[9] **"Versuche über Pflanzen-Hybriden (Experiments on Plant Hybridization)"**

Gregor Mendel

1866 | Verhandlungen des naturforschenden Vereins Brünn

Google Scholar

[10] **"Emergence in biological systems: from molecules to networks"**

Denis Noble

2018 | Interface Focus

Google Scholar

[11] **"The Chemical Basis of Morphogenesis"**

Alan M. Turing

1952 | Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences

Google Scholar

[12] **"Variable DNA topology is an epigenetic generator of physiological heterogeneity in bacterial populations"**

Dorman, C. J.

2019 | Molecular Microbiology

Google Scholar

[13] **"Gravitational collapse and space-time singularities"**

Roger Penrose

1965 | Physical Review Letters

Google Scholar

**[14] "Consciousness in the universe: A review of the 'Orch OR' theory"**

Stuart Hameroff, Roger Penrose

2014 | Physics of Life Reviews

Google Scholar

**[15] "A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve"**

Alan Lloyd Hodgkin, Andrew Fielding Huxley

1952 | The Journal of Physiology

Google Scholar

**[16] "The components of membrane conductance in the giant axon of Loligo"**

Alan Lloyd Hodgkin, Andrew Fielding Huxley

1952 | The Journal of Physiology

Google Scholar

**[17] "Assembly theory explains and quantifies selection and evolution"**

Sara Imari Walker, Lee Cronin, et al.

2023 | Nature

Google Scholar

**[18] "Muscle contraction and cell motility: their molecular basis"**

Andrew F. Huxley

1969 | Science

Google Scholar

**[19] "Genome-wide modeling of DNA replication in space and time confirms the emergence of replication specific patterns in vivo in eukaryotes"**

Dario D'Asaro, Jean-Michel Arbona, Vinciane Piveteau, Aurèle Piazza, Cédric Vaillant, Daniel Jost

2025 | Genome Biology

Google Scholar

**[20] "Impulses and Physiological States in Theoretical Models of Nerve Membrane"**

Richard FitzHugh

1961 | Biophysical Journal

Google Scholar

**[21] "An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon"**

Jin-ichi Nagumo, Suguru Arimoto, Shuji Yoshizawa

1962 | Proceedings of the IRE

Google Scholar

**[22] "A learning method for system identification"**

Jin-ichi Nagumo, Atsuhiko Noda

1967 | IEEE Transactions on Automatic Control

Google Scholar

**[23] "Emergence in complex systems: A review"**

M. Mitchell

2021 | Journal of Complex Systems

Google Scholar

**[24] "The logic of animal conflict"**

John Maynard Smith, George R. Price

1973 | Nature

Google Scholar

**[25] "Selection and covariance"**

George Price

1970 | Nature

Google Scholar

**[26] "The General and Logical Theory of Automata"**

John von Neumann

1951 | Cerebral Mechanisms in Behavior: The Hixon Symposium

Google Scholar

**[27] "Evolution and emergence: higher order information structure in protein interactomes across the tree of life"**

Brennan Klein, Erik Hoel, Anshuman Swain, Ross Griebenow, Michael Levin

2021 | Integrative Biology

Google Scholar

## Artykuły pokrewne (Google Scholar):


**[28] "Homeostasis, singularities, and networks"**

Martin Golubitsky, Ian Stewart

2016 | Journal of Mathematical Biology

Google Scholar

**[29] "Recent advances in symmetric and network dynamics"**

Martin Golubitsky, Ian Stewart

2015 | Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science

Google Scholar

**[30] "Symmetry and network architecture in neuronal circuits: Complicity of form and function"**

Ian Stewart

2022 | International Journal of Bifurcation and Chaos

Google Scholar



Tekst opracowany z udziałem sztucznej inteligencji.
Redakcja i kontrola merytoryczna: Fundacja Dobre Państwo.

APA ONE Publishing System



Fundacja Dobre Państwo © 2026



Article ID: e61c8985-0681-4c48-864c-c6f069861f47