

## WOJCIECH BORKOWSKI

### EWOLUCYJNA DROGA DO ZŁOŻONOŚCI

#### WSTĘP – ZŁOŻONOŚĆ REPLIKATORÓW

Słowo „ewolucja” w takim znaczeniu, jakie nadają mu biolodzy, memetycy, a także informatycy – specjaliści od Algorytmów Genetycznych (GA) i Sztucznego Życia (AL) – oznacza proces, który poprzez nielosową selekcję w obrębie populacji replikatorów kumuluje powstałe losowo korzystne zmiany i prowadzi do powstania replikatorów zaadaptowanych do środowiska. Kolejnym kluczowym terminem jest tu słowo „replikator”, pod którym może kryć się dowolny obiekt realny lub wirtualny, posiadający trzy niezbędne własności:

1) **Odziedziczalność**, czyli zdolność do tworzenia kopii zawierających tę samą lub przynajmniej zbliżoną informację, co służąca jako matryca replikator „macierzysty” (czyli do replikacji właśnie). Przy tym zbiór możliwych do zapisania informacji musi być znacznie większy od realnie istniejącej puli replikatorów.

2) **Mutowalność**, czyli podatność na sporadyczne błędy kopiowania wprowadzające do populacji nowe warianty replikatorów, przynajmniej teoretycznie zdolnych do tworzenia swoich kopii.

3) **Selekcyjność**, czyli zależność efektywności replikacji od informacji zawartej w replikatorze, zarówno bezpośrednia jak pośrednia, gdy informacja ta jedynie zapoczątkowuje wieloetapowy łańcuch przyczynowy, który ostatecznie przyczynia się do replikacji.

Z powyższego nie wynikają żadne ograniczenia co do tego, czym fizycznie może być replikator i faktycznie obiekty o takich własnościach pojawiają się w różnych obszarach rzeczywistości. Do miana tego pretendują już proste cząstki chemiczne zdolne do autokatalizy, np. produkty tzw. reakcji formozowej<sup>1</sup>. Proste cząsteczki nazywa się czasem replikatorami holistycznymi, bo choć mogą replikować, a nawet niekiedy mutować, mają niewielką pojemność informacyjną – liczba możliwych wariantów jest znacznie mniejsza od zbioru istniejących replikatorów. Prawdziwy replikator musi mieć potencjalną możliwość kodowania nietrywialnej informacji – zbiór zrealizowany musi być mniejszy od możliwego. Na poziomie chemicznym warunek ten spełnia dopiero polimer o zróżnicowanych podjednostkach, których wzajemny układ – chociażby liniowa kolejność<sup>2</sup> – może kodować informacje. Tak właśnie jest w przypadku RNA, DNA czy ich analogów<sup>3</sup>. Liczba

<sup>1</sup> Jest to reakcja autokatalityczna; w jej najprostszej postaci cząsteczka formaldehydu najpierw kondensuje z cząsteczką „cukru” dwuwęglowego - aldehydu glikolowego (2-hydroxyethanal), produkt kondensuje z kolejną cząsteczką formaldehydu do cukru czterowęglowego, który rozpada się następnie na dwie cząsteczki „cukrów” dwuwęglowych analogiczne do wejściowych, co cykl zamyka. L. E. Orgel, *Molecular Replication*. Nature 358, 203-209, 1992.

<sup>2</sup> Właściwie innych przykładów chyba nie znamy, ale wydaje się, że nie ma „ostatecznego” powodu, dla którego polimery, niosące informacje, nie mogłyby mieć dwu lub trójwymiarowej struktury pierwszorzędowej.

<sup>3</sup> Np. popularnego ostatnio wśród badaczy chemicznych początków życia TNA czyli polimeru analogicznego do RNA, którego główny szkielet zbudowany jest z cukrów czterowęglowych, a nie pentoz, dzięki czemu mógłby łatwiej powstać abiotycznie. Zobacz: A. Eschenmoser, *Chemical Etiology of Nucleic Acid Structure*. Science 25 June 1999. Albo: K. Schoning, P. Scholz, S. Guntha, X. Wu, R. Krishnamurthy, A. Eschenmoser (Nov 2000). *Chemical Etiology of Nucleic Acid Structure: The Alpha-thiofuranosyl-(3'->2') Oligonucleotide System*. Science PMID 11082060.

możliwych wariantów takich cząsteczek rośnie tak szybko, że łatwo przewyższa liczbę realnych inkarnacji, dzięki czemu kryterium rozmiaru przestrzeni informacyjnej zostaje spełnione „z nadstatkiem”<sup>4</sup>.

Raz powstałe replikatory chemiczne stały się załącznikiem niepowstrzymanego procesu, „wkrótce” też utworzyły symbiotyczne wspólnoty, które dały początek żywym komórkom, a potem całej złożoności materii ożywionej, dla której „autoodtworzenie”, a co za tym idzie ewolucja, jest właściwością podstawową i powszechną. Kiedy ewolucja „pchnęła” niektóre istoty żywe na drogę wielokomórkowości, a potem ruchowej aktywności, niezbędne stały się wyspecjalizowane układy odbierania bodźców i przetwarzania ich na adekwatne dla przetrwania organizmu reakcje. W ten sposób powstał nowy system przetwarzania informacji – układ nerwowy – i było tylko kwestią czasu, kiedy swoisty „wyścig zbrojeń” – ewolucyjna odpowiedź na presję selekcyjną, wywierana wzajemnie na siebie przez różne żywe organizmy – doprowadzi do systemów zdolnych do wymiany informacji, czyli replikowania jej. U różnych gatunków zwierząt pojawiała się zdolność do mniej lub bardziej skutecznego przekazu elementów zawartości informacyjnej ich układów nerwowych – czyli *de facto* do tworzenia replikatorów zwanych memami i jest całkiem prawdopodobne, że nie doceniamy złożoności systemów memetycznych niektórych grup systematycznych. Nawet najlepiej zbadane gatunki naczelnych zaskakują nas ciągle<sup>5</sup> swymi możliwościami, a cóż dopiero trudniejsze do badania słonie, walenie, czy głowonogi... Mają nam one, zapewne, wiele do zaprezentowania w tym względzie.

Jest jednak pewne, że pośród współcześnie żyjących zwierząt to człowiek właśnie wyróżnia się ilościowo pod względem wymiany informacji. Rozmiar i złożoność systemu memetycznego ludzkości jest tak wielki, że łatwo przychodzi nam antropocentrycznie uznać, że jest to już różnica jakościowa. Być może potwierdzają to nasze ostatnie osiągnięcia – jedynie ludzie zdolni są do sztucznego kreowania zupełnie nowych typów replikatorów, tak w świecie wirtualnym (informatyka, AL), jak również w realnym (inżynieria genetyczna, a zapewne za chwilę robotyka<sup>6</sup>).

Cały ten rozciągnięty na jakieś 4 miliardy lat ciąg zdarzeń pokazuje, że replikatory są zdolne do ciągłego zwiększania swojej złożoności. „Biologia historyczna”<sup>7</sup> odnotowuje na przestrzeni dziejów życia powstawanie coraz większej liczby genów i sekwencji regulujących ich ekspresję w obrębie genomów, wzrost bogactwa gatunkowego ekosystemów i biosfery jako całości, a także wzrost złożoności układów nerwowych dominujących taksonów zwierzęcych. Podobnie badacze kultury, czyli *de facto* memetycznej ideosfery, opisują, jak na przestrzeni dziejów wzrasta bogactwo słownikowe języków, różnorodność motywów sztuki, religii i ideologii, a także złożoność instytucji państwa i systemu biurokratyczno-prawnego<sup>8</sup>.

Zjawisko to można wyrazić liczbowo porównując zawartość informacyjną obiektów na początku procesu i potem. Rybozymowi zdolnemu do katalizowania własnej

<sup>4</sup> Dla krótkiego, zaledwie stu-elementowego łańcucha RNA zbudowanego z 4 rodzajów podjednostek liczba możliwych wariantów wynosi  $4^{100}$ , co najprawdopodobniej jest liczbą większą niż liczba atomów w całym widzialnym wszechświecie.

<sup>5</sup> O kulturze orangutanów, małp dotychczas uznawanych za aspołeczne można przeczytać w Świecie Nauki 05.2006, a także: C. P. Van Schaik, M. Ancrenaz, G. Bergen, B. Galdikas, C. D. Knott, I. Singleton, A. Suzuki, S.S. Utami, M.Y. Merrill, *Orangutan Cultures and the Evolution of Material Culture*. Science 299, s. 102-105. 2003.

<sup>6</sup> Pierwsze nieśmiałe próby już poczyniono, choć robot zdolny złożyć swoją kopię z kilku relatywnie dużych gotowych elementów obecnych „w zasięgu” jest gdzieś pomiędzy holistycznym replikatorem chemicznym a pierwszym autokatalitycznym RNA (czy TNA). I może całe szczęście ...

<sup>7</sup> Kiedyś jedyną „biologią historyczną” była paleontologia, obecnie co najmniej równą rolę odgrywają biomolekularne metody badawcze dotyczące historii samych genów i genomów.

<sup>8</sup> W dwu ostatnich przypadkach chciałoby się dodać „niestety”.

replikacji wystarczy informacja zapisana w łańcuchu ok. 100 zasad azotowych, czyli zaledwie 200 bitów, genom bakterii *E.coli* to ok. 4 miliony par zasad, zaś DNA jednej ludzkiej komórki to już ok. 6 miliardów par zasad (12 mld. bitów czyli nieco poniżej 1,5 gigabajta), ale są organizmy znacznie pod tym względem człowieka przewyższające. Podobnie najprostszy przekazywany mem może mieć zaledwie 1 bit użytecznej informacji, np. „to jest jadalne” przekazuje mama niedźwiedzica swojemu dziecku, jedząc czerwone jagody<sup>9</sup>, ale najbardziej skomplikowane mempleksy, np. zbiór wszystkich technologii potrzebnych do wysłania ludzi na księżyc, sięgają dziesiątek gigabajtów, a może nawet terabajtów...

Należy jeszcze zaakcentować fakt skłonności systemów replikatorów do „agregacji” i tworzenia wielopoziomowej struktury. Proste replikatory, zawierające niewiele informacji, prędzej czy później napotykały warunki, w których ich pojemność informacyjna staje się ograniczeniem ewolucji. Jeśli jest jakakolwiek możliwość, by mogły one „połączyć siły” i wymknąć się z takiej pułapki przez utworzenie pojemniejszego informacyjnie replikatora, to – prędzej czy później – takie zdarzenie musi zająć. W ten sposób pojawiają się kolejne poziomy replikatorów – coraz większych i bardziej złożonych. Taką barierę napotkały kiedyś egoistyczne rybozomy, co wymusiło powstanie prostych komórek. Podobnie ograniczenie pojemności informacyjnej genomu prokariotów wymusiło powstanie komórek eukariotycznych, a ograniczenia genomu eukariotów wymusiły powstanie organizmów wielokomórkowych z ich układami nerwowymi i potencjalną przynajmniej możliwością wymiany informacji pozagenetycznej.

W dalszym ciągu zastanowimy się, jakie mechanizmy odpowiadają za to, że w toku ewolucji replikatory mogą zwiększać swoją złożoność mierzoną zawartością informacji i w jaki sposób mogą wymykać się na wyższe poziomy organizacji, gdy takie proste zwiększanie zawartości informacji staje się niemożliwe.

### MIKROEWOLUCJA *VERSUS* MAKROEWOLUCJA

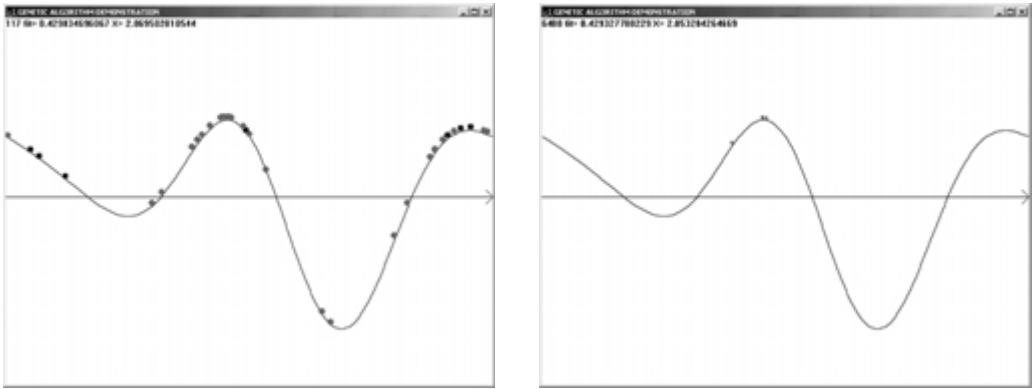
Tradycyjne wyjaśnianie mechanizmów ewolucyjnych, nazwijmy je mikroewolucyjnym, jest bardzo redukcjonistyczne – skupia się na oddziaływaniu populacji replikatorów (genów, memów) „egoistycznie borykających się ze środowiskiem” ograniczonym koncepcyjnie do jednej podstawowej w danej chwili własności. Losowe błędy kopiowania generują kolejne warianty replikatora, a środowisko weryfikuje ich jakość, usuwając lub odsuwając od replikacji te, które sprawdzają się gorzej w konkurencji z resztą populacji. Możemy w ten sposób zrozumieć, jak w mozolnym procesie selekcji lepszych rozwiązań w replikatorze zapisywane jest poprawne rozwiązanie zadania stawianego przez otoczenie, mimo braku intencjonalnego twórcy.

W tym momencie wypadałoby nawiązać do metafory „krajobrazu przystosowania”, którego szczyty zajmują najlepiej przystosowane replikatory (rys. na następnej stronie). Z podobnej koncepcji korzysta w informatyce szeroka dziedzina metod numerycznych zwana algorytmami optymalizacyjnymi, której jednym z istotnych działów są bezpośrednio czerpiące inspiracje z biologii algorytmy genetyczne i ewolucyjne.

Badaczowi poszukującemu źródeł biologicznej i memetycznej złożoności świata powinien dać jednak do myślenia fakt, że jednym z największych problemów technicznych GA jest zapobieganie „przedwczesnej zbieżności czyli homogenizacji populacji rozwiązań”<sup>10</sup>. Rzeczywiście, omawiany mechanizm znakomicie wyjaśnia, jak w warunkach

<sup>9</sup> Choć całe wspólnie obserwowane przez matkę i dziecko środowisko jest tu kontekstem, bez którego ten jeden bit nie miałby żadnego znaczenia.

<sup>10</sup> J. Arabas, *Wykłady z algorytmów ewolucyjnych*, WNT, Warszawa 2001, str. 195-241



A

B

Rysunek 1: Prosty przykład działania algorytmu genetycznego – populacja 100 rozwiązań (kropki) odnajduje maksimum funkcji (linia). A – stan po ok. 100 generacjach, część populacji reprezentuje jeszcze rozwiązania suboptymalne. B – stan po ok. 6,5 tys. generacji – cała populacja homogeniczna skupiona w jednym punkcie za wyjątkiem pojawiających się losowo, gorzej przystosowanych mutantów (dwa punkty na prawo i na lewo od szczytu)

niezmienności wyzwań środowiska ewolucja (wybierając najsprawniejsze rozwiązania) faktycznie redukuje różnorodność, nie mówi natomiast niczego o jej źródłach...

Ale też podejście to jest nie tylko redukcjonistyczne, jest nadmiernie redukcjonistyczne! Wśród tak licznych przykładów naturalnych replikatorów niemal nie ma takich, których istnienie byłoby zależne jedynie od zewnętrznego środowiska o prostych i stałych właściwościach<sup>11</sup>. Środowisko jest zmienne, a replikatory działają głównie w relacjach z innymi replikatorami, zarówno z tego samego poziomu organizacji, jak i z poziomów sąsiadujących. Wyjaśnienie mikroewolucyjne nie ma bezpośrednio nic do powiedzenia na temat obserwowalnego faktu, że wszystkie realnie istniejące systemy zawierające replikatory są nie tylko skomplikowane, ale z upływem czasu zwiększają swoją złożoność. Pojawienie się złożoności w systemach współzależnych replikatorów muszą zatem wyjaśniać jakieś inne przyczyny. Nazywa się je ogólnie „mechanizmami makroewolucyjnymi”, co nie znaczy, że muszą one być w opozycji czy sprzeczności z mechanizmami mikroewolucji<sup>12</sup>. Wynikają z nich, aczkolwiek nie w oczywisty sposób, choćby z tego powodu, że podstawowe procesy dotyczące działających tu replikatorów przebiegają w znacząco różnych skalach czasowych, co decydująco wpływa na metody ich badania, a zatem rodzaj i jakość wyciąganych wniosków.

Prosta replikacja genów, podobnie jak prosta replikacja memów, jest szybka. Bakteria jest w stanie zreplikować cały swój genom w kilkadziesiąt minut, w tym samym czasie można dowiedzieć się sporo o podstawowych poglądach rozmówcy lub wysłuchać krótkiego wykładu na konkretny temat. Proces powstawania i selekcji korzystnych mutacji jest już przynajmniej o jeden, dwa rzędy wielkości wolniejszy, tym wolniejszy, im presja selekcyjna jest słabsza, jednak wciąż jeszcze w granicach dostępnych bezpośredniej obserwacji. Opanowanie ludzkiego organizmu przez odpornego na antybiotyk mutantą bakterii musi zająć kilkadziesiąt do kilkuset godzin, a czas trwania ewentualnie wywołanej

<sup>11</sup> Nawet tak klasyczne przykłady, jak odporność drobnoustrojów na antybiotyki czy melanizm przemysłowy, dotyczą środowiska zmieniającego się w czasie i przestrzeni, czyli zjawisk w rzeczywistości znacznie bardziej dynamicznych.

<sup>12</sup> Jak chcieliby liczni przeciwnicy teorii ewolucji, którzy mając niekiedy podstawowe wykształcenie biologiczne nie mogą zaprzeczyć opartemu na niepodważalnych faktach istnieniu mikroewolucji, atakują więc nieco bardziej abstrakcyjne i dyskusyjne wyjaśnienia makroewolucyjne.

przez nowy szczep epidemii to już dziesiątki dni, a nawet lata. Podobnie utwierdzenie nowej idei czy paradygmatu badawczego w umysłach grupy badaczy zajmie przynajmniej kilka dni trwania konferencji, a jego upowszechnienie na świecie zajmie, nawet w „globalnie skomunikowanym” XXI wieku, kilka lat<sup>13</sup>.

Różnice skal czasowych pozostają w ścisłym związku z „agregacją” replikatorów i ich poziomami organizacyjnymi. Dla pierwszych autoreplikujących cząsteczek kwasów nukleinowych czas replikacji mógł być może wynosić sekundy<sup>14</sup>, zatem w ciągu kilkudziesięciu minut miałyby generacje. Cząsteczki te, zdolne do prowadzenia zaledwie jednej reakcji chemicznej, musiały jednak w końcu utworzyć większe systemy, mogące przeprowadzać niezbędne ciągi reakcji<sup>15</sup>, czyli zawierające więcej rozwiązań jednostkowych zadań stawianych przez środowisko. Czas konieczny takiemu złożonemu replikatorowi do skopiowania i rozdzielenia wzrósł przynajmniej o rząd wielkości. Kolejne „agregacje” replikatorów biologicznych – powstanie eukariotycznej komórki, a potem organizmów wielokomórkowych – przedłużyły czas trwania jednej generacji o kolejne rzędy wielkości, a tym samym w podobny sposób przedłużyły się czasy niezbędne dla skutecznej selekcji organizmów z coraz wyższych poziomów organizacji. Podobnie w przypadku systemów memetycznych: te prostsze, jak mody w ubiorze, czy popularne powiedzonka, rozprzestrzeniają się szybko, wypierając poprzedników i często równie szybko są wypierane przez następców. Te zawierające więcej informacji, jak konwenanse, paradygmaty badawcze, poglądy dietetyczne czy sposoby wychowania młodzieży, trwają latami, a złożone mempleksy – religie, ideologie polityczne, dziedziny nauki, czy wreszcie języki – mogą trwać przez całe pokolenia istnienia swoich nosicieli i bardzo powoli podlegać eliminacji<sup>16</sup>.

O ile „mikroewolucję” zatem, która odbywa się w skali czasu dla naszych umysłów naturalnej i właściwej, możemy nie tylko obserwować w działaniu, ale nawet badać z użyciem metodologii eksperymentalnej<sup>17</sup>, to właściwa „makroewolucja”, ze zjawiskami o czasie trwania licznym w latach i tysiącach (ideosfera), czy milionach lub dziesiątkach milionów lat (biosfera) musi być domeną nauk historycznych, takich jak paleontologia, „paleo-geno-logia”, czy historia ludzkości w jej różnych przejawach. A te z konieczności wyciągają wnioski nie z eksperymentów tworzonych sztucznie i ściśle kontrolowanych, ale z fragmentarycznego raczej zapisu tego jedyne go prowadzonego aktualnie przez rzeczywistość. Mogą, co prawda, korzystać ze względnego podobieństwa<sup>18</sup> motywów „historycz-

<sup>13</sup> Mówię tu raczej o dotarciu informacji i jej zrozumieniu, niekoniecznie o zmianie poglądów badaczy, bo to jest już zjawisko „wypierania ideologii”, którego skala czasowa jest rzędu dziesiątek lat – przynajmniej pokolenia.

<sup>14</sup> Trudno z całą pewnością powiedzieć, jak skuteczne i szybkie były prastare mechanizmy. Dzisiejsze organizmy mogą osiągać szybkości replikacji DNA rzędu tysiąca i więcej par zasad na sekundę, ale osiągają to dzięki niezwykle wyspecjalizowanym kompleksom enzymów białkowych i „zrównolegleniu” całego procesu.

<sup>15</sup> J. Maynard-Smith, E. Szathmari, *Tajemnice przelomów w ewolucji. Od narodzin życia do początków mowy ludzkiej*, przeł. M. Madaliński, PWN, Warszawa 2000

<sup>16</sup> Także dlatego, że dany system nadal pozostaje identyfikowalny, choć zawarta w nim nieadekwatna informacja może się zmieniać niejako „podskórnie”. Pod tym względem wielkie systemy memetyczne przypominają biologiczne gatunki, które raz ukształtowane na skutek „makroewolucyjnych” procesów specjacji, zmieniają się dalej „mikroewolucyjnie” w odpowiedzi na kolejne wyzwania środowiska, ale mogą też zniknąć względnie nagle, gdy takie konieczne mikroewolucyjne adaptacje nie mieszczą się już w „predefiniowanym” schemacie.

<sup>17</sup> Czym *de facto* zajmuje się np. epidemiologia molekularna, i niektóre inne dziedziny biologii molekularnej. Niektóre badania eksperymentalne z trudem „zahaczają” o sferę zjawisk istotnych dla makroewolucji, gdy uda się zdobyć finansowanie badań zakrojone na dziesiątki lat: R.E. Lenski, 2004. *Phenotypic and Genomic Evolution During a 20,000-generation Experiment with the Bacterium Escherichia coli*. *Plant Breeding Reviews* 24:225-265.

<sup>18</sup> A właściwie „samopodobieństwa” w sensie podobnym do nadawanego temu terminowi przez dział matematyki zajmujący się fraktalami.

nych” pozwalającego na dokonywanie porównań, interpretowanie faktów i formułowanie wniosków pretendujących do miana „praw”, ale zawsze pozostają z szerokim marginesem dowolności, nie do pomyślenie w matematyce, fizyce, czy (bio-)chemii...

Aż do połowy XX wieku historyk czy paleontolog mógł przekonywać innych do słuszności swojej interpretacji, choćby wskazując na analogie do innych przeszłych zdarzeń, nie miał jednak żadnych metod, by ostatecznie udowodnić swoje racje. Siła przekonywania matematycznego dowodu lub „fizycznego” eksperymentu pozostawała poza jego zasięgiem. Dopiero tworzenie symulacji komputerowych udostępniło „historykom” możliwość „eksperymentalnego” sprawdzania ich teorii w działaniu, i choć metoda ta nie jest jeszcze tak popularna, jak na to zasługuje, notuje już wiele spektakularnych sukcesów zarówno w biologii<sup>19</sup>, jak i w naukach społecznych<sup>20</sup>. Dla wiedzy o makroewolucji, czy to ściśle biologicznej<sup>21</sup> czy memetycznej, symulacje mogą mieć prawdziwie przełomowe znaczenie.

A zatem, jakie mechanizmy makroewolucyjne powinniśmy rozpatrzyć i zweryfikować na podstawie znanych faktów i, ewentualnie, symulacji?

### **REPLIKATOR JAKO SYSTEM SIECIOWY I MECHANIZMY JEGO ZMIANY**

Kluczowe jest stwierdzenie, że nawet najprostsze replikatory są systemami. Oczywiście, każdy system możemy potraktować jako „czarną skrzynkę” o określonych funkcjach, ale jest to jedynie sposób wyrażenia braku zainteresowania jego wewnętrzną strukturą lub opisanie metodologicznej bezsilności wobec tej struktury – co jest charakterystyczne dla wyjaśniania redukcjonistycznego. Jeśli uznamy takie podejście za niewystarczające, musimy zgodzić się na przedstawienie systemu jako zbioru elementów powiązanych relacjami przynajmniej jednego typu, czyli jako sieci zależności, i na to, że właściwości systemu jako całości, emergentnie wynikają z istnienia i działania jego wewnętrznej struktury.

Nawet „trywialny” rybozym nie może być rozumiany jedynie jako sekwencja nukleotydów, czyli struktura pierwszorzędowa. Co prawda sekwencja determinuje i formę i funkcję, ale jedynie poprzez relacje wewnętrznego parowania zasad w strukturze drugorzędowej i relacje sąsiedztwa w trójwymiarowej strukturze trzeciorzędowej. Dokładnie tak samo jest w przypadku białek, gdzie sekwencja aminokwasów sama w sobie nic o funkcji nie mówi.

Genom, a właściwie sterowany przez niego cały metabolizm komórki, jest bardzo złożoną siecią zależności prostych replikatorów – genów i ich produktów. Na kolejnym poziomie wielokomórkowy organizm jest siecią interakcji komórek, w szczególności nerwowych, a wreszcie ekosystem jest siecią zależności organizmów<sup>22</sup>. W każdym z tych przypadków poszczególne elementy struktury – replikatory niższego poziomu – są do siebie ściśle dopasowane funk-

<sup>19</sup> Choćby cała rodzina modeli wyprowadzonych z modelu starzenia się T. J. P. Penna, *A Bit-string Model for Biological Aging*. Journal of Stat. Phys. 78. 1995. Niedawno: K. Luz-Burgoa i inni, *Computer Simulation of Sympatric Speciation with Penna Ageing Model*, Braz. J. Phys. v.33 n.3 Sao Paulo sep. 2003.

<sup>20</sup> A. Perfors, *Simulated Evolution of Language: a Review of the Field*; JASSS vol. 5, no. 2, 2002 (<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/2/4.html>). T. A. Kohler i inni, *Indianie Pueblo z komputera*, Świat Nauki 08.2005. T. A. Kohler, G. J. Gunnerman (red), *Dynamic of Human and Primate Societies: Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes*, Oxford University Press, 2002. <http://www.wsu.edu/~village/>

<sup>21</sup> Pierwsze próby poczyniono już w latach 70-tych! D. Raup, *Probabilistic Models in Evolutionary Paleobiology*, Amer. Scient. 65:50-57, 1977

<sup>22</sup> A o tym już właściwie przekonywać nie trzeba, chociaż typowy badacz, skupiony na małych fragmentach tych systemów, może nie dostrzegać znaczenia owej konstatacji. Natomiast kontrowersyjne pytanie, czy sam ekosystem jako całość jest replikatorem, pozostawmy tym razem na boku.

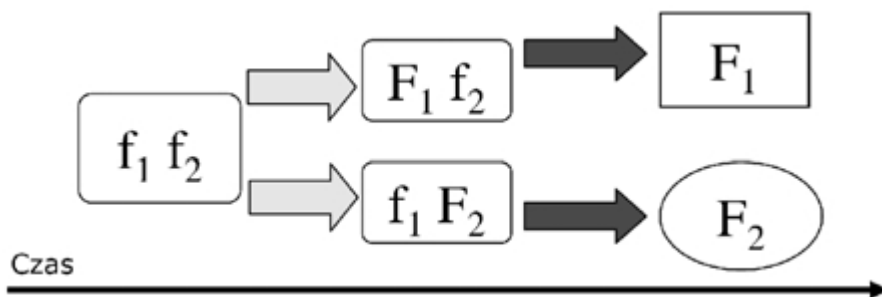
cyjnie, bo to inne elementy sieci są dla nich najważniejszym środowiskiem, do którego mechanizmy ewolucyjne je dopasowują. Co zaskakujące, jednocześnie sieci takie są jako całość dynamiczne i zachowują zarówno krótkoterminową plastyczność, jak i zdolność ewolucyjnego dostosowywania. Poszczególne replikatory składowe mogą zmieniać swoją liczebność czy aktywność, niektóre klasy („gatunki”) mogą zniknąć, mogą też pojawiać się nowe, a czasem ewolucja doprowadza do „gwałtownej” przebudowy całego systemu.



Rysunek 2: Schematyczne przedstawienie struktury przykładowego rybozomu

Część tych zmian możemy traktować jako adaptacyjne lub „mikroewolucyjne” – gdy drobne korekty istniejącej informacji dopasowują system do drobnych zmian w środowisku. Przykładem są zmiany aktywności enzymów: na poziomie ilościowym przez regulację ekspresji, czy jakościowym przez mutacje. Inny przykład to adaptacja tkanek organizmu, jak choćby przyrost mięśni podczas treningu, czy wahania liczebności poszczególnych gatunków w ekosystemach.

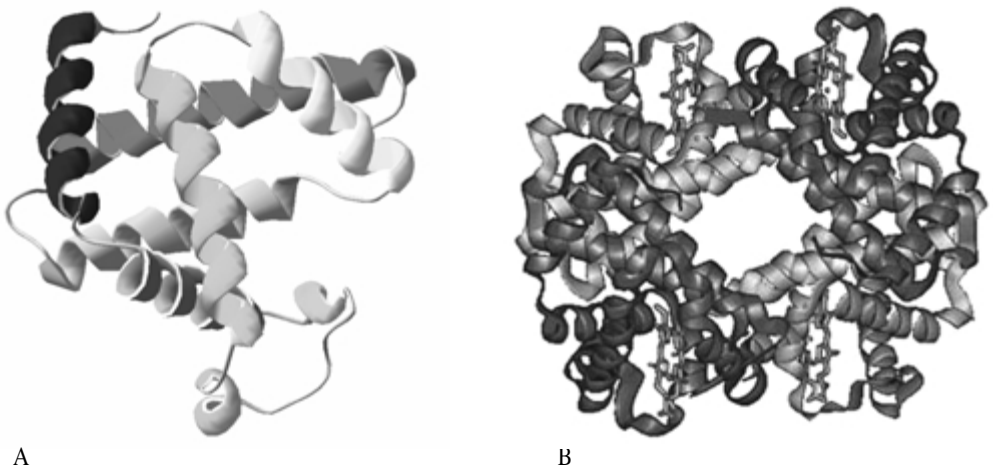
Żeby jednak system mógł uzyskiwać nową funkcjonalność potrzebne jest coś więcej. Nowe wersje replikatorów muszą nie tylko powstawać i być przez selekcję odrzucane lub zatwierdzone kosztem wersji pierwotnej, ale muszą też mieć chociaż czasami szansę pozostawania obok wersji macierzystej. Mechanizm taki można streścić hasłem: „duplikuj i różnicuj”, bo kolejna kopia elementu w systemie zostaje przynajmniej częściowo uwolniona od presji selekcyjnej i może przystosować się do pełnienia nowej funkcji, która może, ale nie koniecznie musi, być wyspecjalizowaną wersją funkcji pełnionej poprzednio.



Rysunek 3: Mechanizm „duplikuj i różnicuj”. Początkowy replikator może pełnić zarówno funkcję  $f_1$  jak i  $f_2$ . Duplikacja uwalnia każdą z wersji replikatora od presji selekcyjnej pod względem jednej z funkcji. Na skutek ewolucji jedna wersja zaczyna lepiej pełnić funkcję  $F_1$  a druga funkcję  $F_2$ ; z czasem każda specjalizuje się w swojej funkcji tracąc możliwość pełnienia drugiej.

Najlepiej zbadanym i rozpoznany teoretycznie przykładem jest główny mechanizm ewolucji genomów, tzw. „duplikacja genów”. Dzięki błędom w procesach duplikacji i rekombinacji DNA powstają kopie jego odcinków – niekiedy krótkie, zdolne do zakodowania zaledwie jednej domeny białka, niekiedy długości całego genu białkowego, a niekiedy długości porównywalnej z ramieniem chromosomu. W szczególnych przypadkach, głównie u roślin, duplikacji może ulec cały komplet chromosomów. W dobie coraz większej znajomości sekwencji genomów można znaleźć dowolną ilość przykładów<sup>23</sup>, ale jednym z pierwszych poznanych była sekwencja ewolucji białek przenoszących tlen u kręgowców.

Pierwotne strunowce były drobnymi zwierzętami wodnymi, żyjącymi prawdopodobnie blisko dna i miały zapewne tylko jeden typ białka hemowego wiążącego tlen. Gdy stężenie rozpuszczonego w wodzie tlenu było wysokie, białko wiązało go, a gdy na skutek działania bakterii lub wzrostu temperatury stężenie tlenu lokalnie spadało, zapasy związane z białkiem były uwalniane i pozwalały zwierzęciu przeżyć. Jednak mechanizm taki nie sprawdza się, gdy zwierzę jest większe, bo stężenie tlenu jest bardzo zróżnicowane w obrębie samego organizmu – względnie duże w skrzelach, znacznie mniejsze w naczyniach włosowatych, a najmniejsze w tkankach. Żeby dobrze spełniać swoją funkcję białko przenoszące tlen we krwi musi go wiązać przy stężeniach występujących w skrzelach, a oddawać w stężeniach typowych dla naczyń włosowatych. Przeciwnie, białko gromadzące rezerwy tlenu w tkankach musi go wiązać przy takim niskim stężeniu, a oddawać, gdy stężenie jeszcze spadnie. Większe zwierzę musi zatem posiadać co najmniej dwa różne takie białka – hemoglobinę we krwi i mioglobinę w mięśniach. I tak faktycznie jest, oba te białka przystosowane są do innych granicznych stężeń tlenu i dobrze spełniają swoje funkcje, a ich sekwencje u wszystkich kręgowców są do siebie wciąż podobne, choć duplikacja ta zaszła już setki milionów lat temu.



Rysunek 4: Polipeptyd mioglobiny (a) i tetramer hemoglobiny (b). Nie pokazano grup bocznych aminokwasów, a tylko konformację łańcuchów peptydowych (tzw. model wstęgowy). Źródło: <http://pl.wikipedia.org>

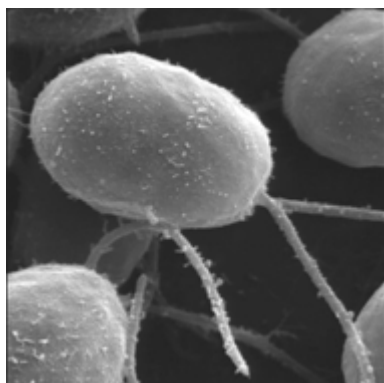
Jednak kręgowce lądowe mają kolejny kłopot: co prawda stężenie tlenu w płucach jest znacznie większe niż w skrzelach, ale krew embrionu zamkniętego w jajku, albo w brzuchu matki, styka się ze stężeniem znacznie niższym. Dlatego kręgowce lądowe, szcze-

<sup>23</sup> Np. w dostępnej publicznie bazie <http://www.embl-ebi.ac.uk/interpro/>

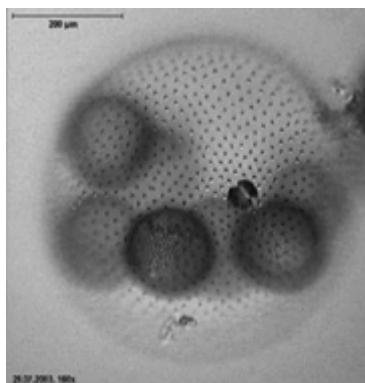


gólnie ssaki, na skutek kolejnych duplikacji mają więcej genów hemoglobin, których produkty, dla lepszej regulacji, mogą łączyć się parami w charakterystyczne tetramery. W ludzkim embrionie działają geny produkujące hemoglobiny efektywnie odbierające w łożysku tlen przyniesiony z krwią matki; dorastający płód zaczyna produkować jednostki hemoglobin bardziej odpowiednich dla środowiska, w którym znajdzie się po urodzeniu, a w ok. 3 miesiące po porodzie<sup>24</sup> skład hemoglobin odpowiada już obserwowanemu u dorosłych.

Mechanizm „duplikuj-różnicuj” przyczynił się też, na wyższym poziomie, do powstania organizmów wielokomórkowych. Dopóki komórki po podziale oddalały się od siebie, żeby wieść samodzielny żywot, musiały spełniać wszystkie niezbędne do przeżycia funkcje. Utworzenie „związku” genetycznie jednolitych komórek pozwoliło niektórym z nich wyspecjalizować się w pełnieniu pewnych funkcji na rzecz reszty – całej kolonii, mimo że mogło się to wiązać z modyfikacjami budowy i upośledzeniem innych funkcji. W ten sposób powstawały tkanki i zbudowane z nich wielokomórkowe organizmy. Proces ten w skali ewolucyjnej zaszedł co najmniej kilkakrotnie w niezależnych liniach organizmów, doprowadzając do powstania glonów „makroskopowych” – brunatnic i krasnorostów, zielonych roślin lądowych i, oczywiście, wielokomórkowych zwierząt. Można też znaleźć „niedokończone” przykłady tego procesu. Na przykład różne rodzaje uwicionych zielonych glonów z rzędu *Volvocales* reprezentują jego różne stadia: *Chlamydomonas* żyje jako pojedyncza komórka, *Eudorina* i *Pandorina* tworzą kilkudziesięciokomórkowe kolonie (o liczbie komórek będących małymi potęgami 2), a sam *Volvox*, czyli toczek, tworzy kolonie zbudowane z 1024 lub więcej komórek, w których widać już początki zróżnicowania. Kulista kolonia ma biegun wegetatywny i biegun generatywny – i tylko komórki tego drugiego biorą udział w procesach rozmnażania.



A



B

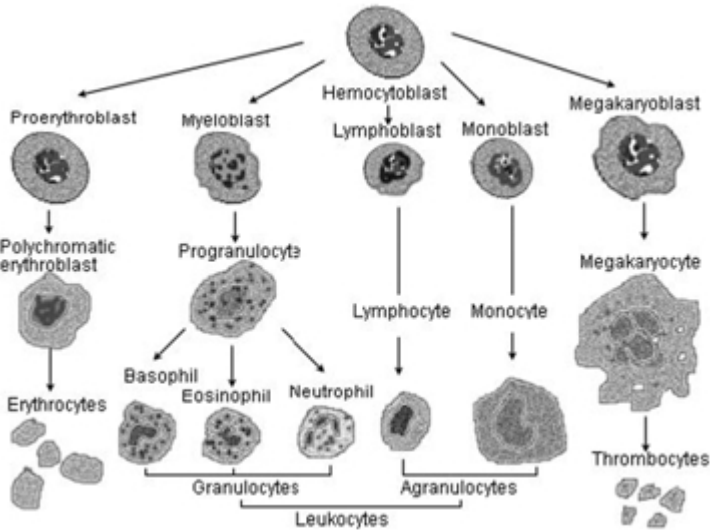
Rysunek 5: A. *Chlamydomonas* czyli zawłotnia. Żyjący samotnie gatunek glonu z rzędu toczkowców (*Volvocales*). Zdjęcie z mikroskopu skaningowego, powiększenie 1000x. B. Kolonia *Volvox*. We wnętrzu widać kolonie potomne. Zdjęcie z mikroskopu optycznego, powiększenie 160x. Źródła: <http://pl.wikipedia.org/wiki/Toczkowce>, <http://en.wikipedia.org/wiki/Volvox>

Grzyby, choć w większości wielokomórkowe, a niektóre całkiem makroskopowe<sup>25</sup>, nigdy nie utworzyły prawdziwych tkanek. Przyczyny nie są jasne, być może znaczenie ma

<sup>24</sup> Jest to typowy czas „pracy” erytrocytu, czyli u trzylatki niemowlęcia znikają ostatnie erytrocyty wyprodukowane w fazie płodowej

<sup>25</sup> Grzybnia największego zbadanego osobnika opieńki *Armillaria ostoyae* odkryta w Oregonie zajmowała obszar 9,65 km<sup>2</sup>. B.A Ferguson, T.A. Dreisbach, C.G. Parks, G.M. Filip and C.L. Schmitt, *Coarse-scale Population Structure of Pathogenic Armillaria Species in a Mixed-conifer Forest in the Blue Mountains of Northeast Oregon*. Can. J. For. Res. Volume 33, 2003.

tu niepełna komórkowość... W ścianach „komórek” grzybów otwory są tak duże, że może się przez nie przecisnąć jądro komórkowe, czyli może ono opuścić uformowaną przez siebie komórkę!



Rysunek 6: Uproszczony schemat różnicowanie komórek krwi ssaka, poczynając od częściowo zróżnicowanego już hemocytoblastu. Źródło: [http://en.wikipedia.org/wiki/Pluripotential\\_hematopoietic\\_stem\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Pluripotential_hematopoietic_stem_cell)

Na poziomie pojedynczego organizmu mechanizm „duplikuj-różnicuj” jest rekapitulowany w procesie różnicowania się komórek poszczególnych tkanek. Tzw. komórki macierzyste (stem cells) mogą dzielić się „niesymetrycznie”, odtwarzając komórkę macierzystą i komórkę, której przeznaczeniem jest stworzenie komórek konkretnej tkanki. Zazwyczaj w kolejnych podziałach komórki pochodne stają się coraz bardziej podobne do komórek tkanki docelowej, przechodząc przez fazy przypominające mniej wyspecjalizowane tkanki. Ilość komórek tkanki powstałych z jednej komórki macierzystej zależy od liczby tych podziałów i tego, czy komórki danej tkanki zachowują przynajmniej fakultatywną zdolność do dalszego dzielenia się, czy też nie. Już 10 podziałów daje potencjalnie ponad 1000 komórek potomnych, więc komórki macierzyste wcale nie muszą być liczne<sup>26</sup>.

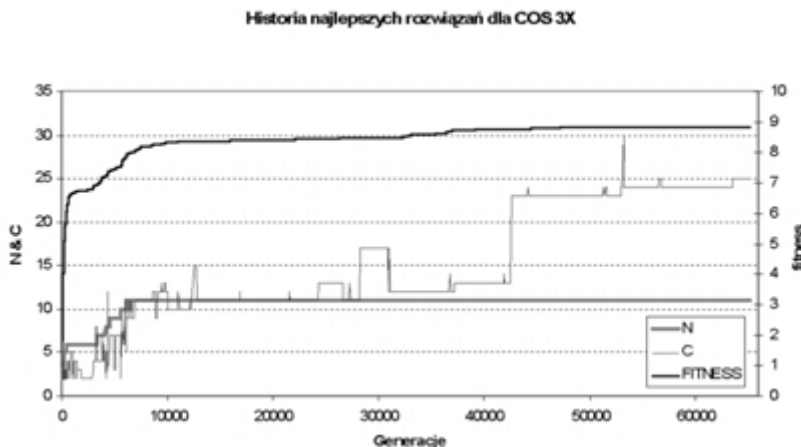
Znaczenie mechanizmu „duplikuj-różnicuj” na poziomie układu nerwowego nie jest do końca jasne. Oczywiście, powstanie tkanki nerwowej w ewolucji i jej różnicowanie w ontogenezie odbywa się w podobny sposób, jak w przypadku innych tkanek. Jednak tkanka nerwowa jest specyficzną – jej komórki nie są, jak w innych tkankach, całkowicie wymienne, bo są węzłami sieci informacyjnej, w której każdy węzeł ma unikalny zestaw połączeń. W architekturze tych węzłów i połączeń zapisana jest wiedza o świecie zewnętrznym zdobyta zarówno dzięki doświadczeniom pojedynczego organizmu, jak i ewolucyjnie, poprzez selekcję tych układów nerwowych, których architektura lepiej odpowiada właściwościom przetwarzanych sygnałów. Teoretycznie jest możliwe, że nowe obszary mózgu wyspecjalizowane w przetwarzaniu sygnałów specyficznego rodzaju powstają właśnie w drodze mechanizmu duplikacji i różnico-

<sup>26</sup> Co zresztą wiedzą biologów próbujący je „ekstrahować” z dorosłych tkanek.

wania-specjalizacji funkcjonalności. Jednak sprawdzenie tego jest z pewnością dużym wyzwaniem, szczególnie w mózgach kręgowców - wielkich, często zawierających astronomyczną liczbę komórek, a do tego bardzo plastycznych<sup>27</sup>. Być może łatwiejsze do zbadania byłyby bezkręgowce; u nicieni liczba komórek ciała, a zatem i neuronów<sup>28</sup> jest ściśle określona przez program genetyczny, ale także mózgi owadów<sup>29</sup> zawierają względnie niewiele komórek nerwowych. Z braku danych rzeczywistych posłużymy się w tym miejscu wynikami symulacji.

### EWOLUCJA SIECI NEURONOWYCH

Weźmy model symulacyjny sieci neuronowej. Zarówno liczba neuronów jak parametry ich wewnętrznej dynamiki oraz liczba i właściwości połączeń mogą być dowolnie definiowane za pomocą cyfrowego „kodu genetycznego”. Algorytm ewolucyjny<sup>30</sup> ma za zadanie skonstruować sieć, która na wyróżnionym neuronie wyjściowym wyprowadza sygnał o zadanej z góry charakterystyce. Może to być funkcja sinusoidalna albo „piłokształtna”, albo zarejestrowany z natury sygnał np. EKG, a nawet kilkaset dźwięków znanego utworu muzycznego. Sieć nie otrzymuje żadnego sygnału wejściowego, dopasowanie ewolucyjne odbywa się wyłącznie metodą losowych prób i selekcjonowania tych sieci, których sygnał wyjściowy najbardziej przypomina zadany. Początkowa populacja zawiera wyłącznie sieci 3 neuronowe z 3 zaledwie połączeniami, ale „kod genetyczny” dopuszcza sporadyczne duplikacje zarówno węzłów, jak i połączeń oraz „mikroewolucyjne” dopasowywanie parametrów dla tak powstałych elementów. Jeśli rozwiązanie z taką powiększoną liczbą elementów działa lepiej, wygrywa w konkurencji z innymi i powoli opanowuje populację,



Rysunek 7: Historia ewolucji sieci neuronowej, której „zadaniem” jest generowanie sygnału jak najbardziej podobnego do trzech kolejnych okresów funkcji cosinus. Dostosowanie najlepszego rozwiązania (fitness) w populacji rośnie szybko w pierwszych kilkuset generacjach, równoległe ze wzrostem liczby jego neuronów (N). W dalszym ciągu dostosowanie wzrasta już wolniej, a modyfikacje sieci neuronowej polegają na zmianie liczby połączeń (C) oraz parametrów neuronów i synaps (co na wykresie już nie jest pokazane).

<sup>27</sup> Nawet u ludzi utrata niemal połowy normalnej liczby komórek może być skompensowana, jeśli zajdzie na odpowiednio wczesnym etapie rozwoju osobnika, o czym spektakularnie świadczą przypadki całkiem dobrze funkcjonujących osób z wodogłowieciem wykrytym dopiero po latach od urodzenia!

<sup>28</sup> Np. *Caenorhabditis elegans* – jeden z ważniejszych „organizmów modelowych” ma dokładnie 302 neurony.

<sup>29</sup> Cały układ nerwowy pszczoły to 7 tysięcy neuronów

<sup>30</sup> Działający na 10 do 50 komputerach uniwersyteckiego klastra obliczeniowego w Boca Raton na Florydzie

o ile wcześniej nie pojawi się jeszcze lepsze rozwiązanie i tak dalej, aż do momentu, gdy ograniczenia techniczne modelu, choćby dokładność kodowania siły połączeń między neuronami, uniemożliwią dalsze udoskonalenia<sup>31</sup>.

Typowy przebieg (rysunek na poprzedniej stronie) można obserwować we wszystkich przeprowadzonych eksperymentach. Sieć jest rozbudowywana o nowe neurony, dopóty, dopóki nie osiągnie „przyzwoitego” dostosowania do wymaganego sygnału, potem ewolucja toleruje tylko dodawanie nowych połączeń i ich „tuningowanie”. W miarę upływu czasu i wzrostu dostosowania udane modyfikacje są coraz rzadsze, aż w końcu mogą ustać całkowicie.

Oczywiście, sieci neuronowe w naturze mają do pokonania znacznie trudniejsze wyzwania. Do tego środowisko jest zmienne, a stawiane przez nie zadania często dotyczą innych sieci – działa mechanizm „czerwonej królowej”, który powoduje, że rozbudowa układu nerwowego nigdy nie ustaje. Proste układy nerwowe przypominają urządzenia elektroniczne zaprojektowane do konkretnego zadania. Znakomicie realizują swoje funkcje, ale zupełnie nie nadają się do innych... Radio jest bardzo kiepskim kalkulatorem, a kalkulator zupełnie nie sprawdza się jako odtwarzacz płyt DVD, pszczoła jest wyspecjalizowanym urządzeniem latającym do zbierania pyłku i nektaru, ale już polować nie umie, w przeciwieństwie do swoich kuzynów – os i szerszeni. Niewiele też wskórałby z nią nawet najznakomitszy treser dzikich zwierząt<sup>32</sup>. Mózgi wyższych kręgowców przypominają raczej komputery osobiste, które choć mają elementy wyspecjalizowane, jak klawiatura czy karta dźwiękowa, główne działania wykonują za pomocą pamięci i procesora, a te nie zostały zaprojektowane do żadnej konkretnej funkcji poza zapamiętywaniem i wykonywaniem prymitywnych obliczeń. Aktualna funkcja jest dopiero zdefiniowana przez wykonywany program, który, tak jak dane, też jest zawartością pamięci. Dla zwierzęcia oznacza to tyle, że odtąd jego zachowanie nie jest zdeterminowane w całości przez geny, ale także przez osobnicze doświadczenie i, w mniejszym lub większym stopniu, przez informacje przekazane przez inne organizmy, niekoniecznie tego samego gatunku<sup>33</sup>. Geny decydują o ogólnych właściwościach „procesora”, o jego architekturze, szybkości, pojemności i rodzaju urządzeń peryferyjnych, ale konkretny wykonywany program jest już dziełem innych replikatorów. Dzięki temu ewolucja mogła przejść na nowy poziom złożoności i, co wyjątkowe, przyspieszyć, bowiem memy ewoluują znacznie szybciej od genów. Ich modyfikacje, rekombinacje, czy duplikacje mogą odbywać się w obrębie jednego mózgu i to wielokrotnie w krótkim czasie. Dopiero w miarę udane efekty tych procesów ewentualnie rozprzestrzeniają się i to też szybciej niż geny; poziomo, pomiędzy już żyjącymi mózgami, nie czekając na nowe pokolenia. W pojedynczym umyśle powstają neologizmy – nowe słowa lub nowe znaczenia dla starych słów, często zaczynające swój „życie” jako literackie przenośnie, które z czasem przyjmują się powszechnie, a potem lub równocześnie mogą się zacząć różnić nie tylko znaczeniem, ale i formą gramatyczną<sup>34</sup>. Do-

<sup>31</sup> Albo skończy się czas przeznaczony na wykonywanie tego zadania. Na zwykle mocno obciążonym klastrze, operator uruchamiający dane zadanie obliczeniowe musi deklarować, ile czasu obliczeniowego na nie przeznacza. Dzięki temu możliwe jest planowanie kolejności wykonania zadań różnych użytkowników, tzw. kolejki. Ale takie, zależne jedynie od czynników zewnętrznych, zakończenie zadania dla ewoluujących sieci jest odpowiednikiem „niezawinionego” kataklizmu – ich świat przestaje istnieć, a jedynym śladem pozostaje zapisana na dysku historia jego ewolucji.

<sup>32</sup> Etolodzy zaskakują nas czasem doniesieniami o niezwykłych jak na właściciela tak małego mózgu osiągnięciach intelektualnych pszczół czy mrówek. Ciągłe jednak są to funkcje, które są tym organizmom przydatne w ich naturalnym środowisku.

<sup>33</sup> Dobrym przykładem takiej prostej, ale istotnej międzygatunkowej komunikacji są mieszane stada zebra i antylopy gnu wspólnie przemierzające równiny Afryki i wspólnie stawiające czoło ich niebezpieczeństwom. Oczywiście o tyle o ile pozwalają im samolubne genu i anonimowość członków stada.

<sup>34</sup> Np. sposobem tworzenia liczby mnogiej lub odmiany przez przypadki

brym przykładem jest słowo „agent”, które w znaczeniu człowieka wykonującego jakąś pracę (niekoniecznie szpiega, ale choćby agenta ubezpieczeniowego) odmienia się analogicznie do nazw innych zawodów, czy ról społecznych. Jeden „agent”, ale „dwaj agenci”. Niekiedy jednak słowo to może oznaczać autonomiczny program komputerowy i wtedy można się już spotkać z formą „dwa agenty”, podkreślającą nieosobowy charakter tych twórców. Taką duplikacją są też wariacje na temat znanych utworów muzycznych, czy to zapożyczenia i trawestacje fragmentów melodii, czy nowe lub zmienione teksty do powszechnie znanych piosenek. Przykłady duplikacji znajdują się też w systemach prawnych, gdy ogólne reguły (np. podatkowe) obrastają z czasem różnymi wariantami i wyjątkami...

### SPECJACJE - MAKROEWOLUCJA I MAKROMEMETYKA

Z nazwanych inkarnacji mechanizmu duplikacji–różnicowania najwyżej w hierarchii systemów stoi specjacja. Jest to tworzenie się nowych gatunków biologicznych przez duplikację populacji gatunku macierzystego, czy to w przestrzeni (specjacja allopatryczna), czy to poprzez arbitralną izolację genetyczną poprzedzającą wybór alternatywnych nisz ekologicznych (specjacja sympatryczna). Analogiczne do specjacji procesy memetyczne nie mają jeszcze wspólnej nazwy. Lingwiści powiedzą o „oddzieleniu się języka od wspólnego pnia”, podobnie historycy nauki zauważą „wyodrębnienie się danej dziedziny” np. psychologii z filozofii<sup>35</sup>. W przypadku podziału jakiegoś zawodu powiemy być może o „specjalizacji”, jak w przypadku zawodu wiejskiego kowala, który obecnie zamienił się w „kowalstwo artystyczne”, podczas gdy „podkuwaniem i pielęgnacją kopyt końskich” zajmują się inni specjaliści, używający podków wyprodukowanych seryjnie przez przemysł metalowy.

Tę ostatnią duplikację poprzedziły inne – we wczesnym średniowieczu wyspecjalizowanie się wyrabiających broń białą płatnerzy, a z początkiem odrodzenia oddzielenie się zawodu „ślusarza”. Zarówno w przypadku gatunków biologicznych, jak i ich analogów memetycznych, istotą procesów jest pojawienie się izolacji informacyjnej. Osobniki różnych gatunków jeśli nawet mogą się krzyżować, to dają potomstwo nieplodne albo niedopasowane do żadnej z istniejących nisz zajętych przez rodzicielskie gatunki<sup>36</sup>. Przedstawiciele różnych zawodów przestają wymieniać między sobą informacje – czy to świadomie, kierując się „solidarnością cechową”, czy też ze względu na różnice w specjalistycznej terminologii i osobistej historii wykształcenia.

Zajmijmy się bliżej powstawaniem gatunków i powstawaniem zawodów, bo procesy te wykazują więcej analogii. Pierwsze w danym środowisku gatunki (czy to ewolucyjnie, czy w ramach sukcesji<sup>37</sup>), jak i pierwsze ludzkie zawody, zadowolają się eksploatacją dostępnych już, zastanych zasobów: wody, światła i ewentualnie podłoża<sup>38</sup> w przypadku roślin, albo zastanych roślin i zwierząt w przypadku łowców i zbieraczy. Jednak obecność jednych gatunków i zawodów otwiera ewolucyjną drogę kolejnym. Pionierskie rośliny – porosty czy mchy – zostają zastąpione bardziej efektywnymi, zakorzenionymi w glebie, a te z kolei, tam gdzie to możliwe, wyparte przez formy drzewiaste. Pierwotni łowcy i zbiera-

<sup>35</sup> Za datę ukonstytuowania się psychologii jako samodzielnej nauki empirycznej uważa się utworzenie w 1879 pierwszego laboratorium psychologicznego na Uniwersytecie Lipskim przez Wilhelma Wundta. Wcześniej zajmowali się nią filozofowie, od Platona poczynając, na Johnie Stuarcie Millu kończąc (<http://pl.wikipedia.org/wiki/Psychologia>).

<sup>36</sup> Pierwszy mechanizm jest bardziej popularny u zwierząt, przykłady drugiego znamy głównie ze świata roślin.

<sup>37</sup> Zasadzanie obszaru nowo udostępnionego przez naturę albo porzuconego przez człowieka.

<sup>38</sup> Podłoża, głównie w przypadku roślin lądowych lub przybrzeżnych. Przy czym dla roślin pionierskich, jak porosty czy mszaki, może to być po prostu goła skała. Prawdziwa gleba powstaje zwykle w interakcji z istotami żywymi w miarę postępującej ekologicznej sukcesji.

cze zostają zepchnięci na nieurodzajne obrzeża świata zajętego przez hodowców i rolników. O ile środowisko pozwala tym pierwszym osadnikom na produkcję chociaż minimalnej nadwyżki dóbr, w systemie mogą przetrwać ich „eksploatatorzy” – roślinożercy, a potem drapieżniki i pasożyty w świecie zwierząt, czy wojownicy, władcy, kapłani i prawnicy w świecie ludzi. Mogą się też pojawić specjalizacje symbiotyczne, dokonujące czegoś na rzecz głównych gatunków i czerpiące z tego korzyści dla siebie: bakterie i grzyby korzeniowe, owady roznoszące nasiona albo zapyłające kwiaty; „rzemieślnicy” wyrabiający potrzebne narzędzia, czy „szamani” gromadzący użyteczną dla innych wiedzę o ziołach, minerałach i siłach natury<sup>39</sup>. Dopóki tylko energia dostępna w systemie na to pozwala, jego komplikacja będzie narastać z czasem, sieć zależności będzie się rozbudowywać i wzbogacać. Często pojawią się kolejne piętra, np. drapieżniki żywiące się drapieżnikami, jak orki, albo też skrót – jak ogromne wieloryby, odżywiające się małutkim kryłem zamiast mniejszymi wielorybami oraz pętla – gdyż symbiozy możemy rozumieć jako relacje wzajemnej eksploatacji. Zdarzają się wreszcie gwiazdy – gatunki dostarczające pokarmu liczny innym, jak trawy, albo przeciwnie, korzystające z wielu różnych źródeł pokarmu, jak niedźwiedź czy człowiek. Kolejne gatunki lub zawody będą tworzyć nisze dla następnych, mało wyspecjalizowane będą wypierane przez lepszych specjalistów, niekiedy zewnętrzne lub generowane wewnętrznie wahania doprowadzą do „niezawinionego” zniknięcia tego czy innego elementu, co pociągnie za sobą wymieranie związanych z nim specjalistów i „przebranżowienie” innych zależnych elementów. W dostatecznie bogatych systemach może też znaleźć się miejsce dla form na tyle rzadkich, że nie mających wielkiego wpływu na działanie całości, ale mimo to trwających – przysłowiowych „rajskich ptaków”, czy ludzkich artystów...

Przy tym tylko niektóre gatunki/zawody powstają dzięki przełomowym wynalazkom w rodzaju oddychania tlenowego czy uprawy roli; większość to przejaw specjalizacji do skuteczniejszego pełnienia już znanych funkcji. Mysz w sprzyjających warunkach może się objeść po uszy larwami pszczoł, ale nie znaczy to, że jest „owadożerna”. Niemal każdy człowiek potrafi ulepić miskę z gliny, albo wnieść szałas, ale oczywiście w rozwiniętej cywilizacji „zawodowiec” zrobi to znacznie lepiej i jeszcze odpowiednio nazwie (np. „Miśnieńska porcelana” albo „Osiedlem Szczęśliwy Brzeg”)

Z procesem tym, poza okresami mniej więcej stałego tempa wymiany gatunków (stazy), nieodmiennie związane są wybuchy „aktywności gatunkotwórczej”. Niekiedy zdobyta przez gatunek adaptacja, będąc odpowiedzią na konkretne wyzwanie środowiska, okazuje się znacznie bardziej przyszłościowa. Mówimy wtedy o aromorfozie, czyli właśnie przełomowym ewolucyjnym wynalazku. Zwykle otwiera on przed posiadaczem nowe obszary świata do zdobycia, albo znacznie efektywniejsze sposoby przetrwania w obszarach, wydawałoby się, już na dobre zagospodarowanych. Gatunek zachowuje się tak, jakby zdjęto z niego część brzemienia presji selekcyjnej i w krótkim czasie produkuje serię gatunków potomnych, przystosowanych do różnych nisz, czyli zapoczątkowuje tzw. radiację adaptatywną<sup>40</sup>.

W zamierzczłych czasach radiacje takie dotyczyły oddychających tlenowo bakterii, potem zdolnych do fagocytozy eukariontów, potem zapewne pierwszych wielokórkowców, przez pewien czas większych od czegokolwiek innego w ich świecie, co by

<sup>39</sup> Czy ich ewolucyjni następcy – technicy i inżynierowie oraz lekarze i naukowcy.

<sup>40</sup> Choć jest też prawdą, że radiacja może się zdarzyć też wtedy, gdy nagle gatunek dostanie „w prezencie” niemal pusty świat do zdobycia. Tak było w przypadku ssaków na przełomie kredy i kenozoiku, a w mniejszej skali, gdy małpiatki i gryzonie dotarły na dryfujących pniach z Afryki do izolowanej i pozbawionej znaczącej konkurencji Ameryki Południowej.

im mogło zagrozić. Wynalazek uchyłka jelita, w którym gromadziło się połknięte powietrze, pozwolił pewnym rybam żyć w śródlądowych, okresowo wysychających zbiornikach, a w połączeniu z pozwalającymi pełzać po dnie płetwami na trzonkach okazał się „podręcznym zestawem czworonogiego pioniera lądów”. I tak dalej... Historia każdej większej grupy taksonomicznej zaczyna się od jakiegoś przełomowego wynalazku – z rzadka na skalę tytaniczną, zmieniającą całą biosferę, zwykle tylko na skalę lokalną – kontynentu, wyspy czy jeziora...

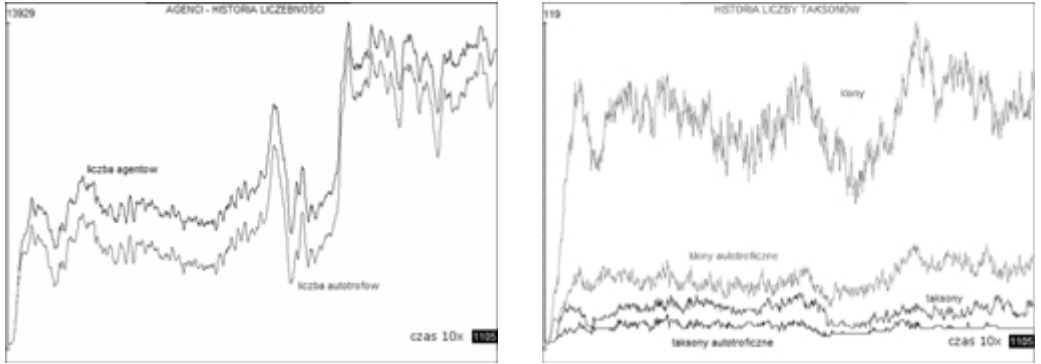
A ludzka specjalizacja zawodowa? Nie trzeba daleko szukać. Ostatni wiek obfitował w tego rodzaju wydarzenia. Np. w ostatnich czasach mogliśmy obserwować radiację adaptatywną zawodów związanych z elektrycznością. Nagle, w drugiej połowie XIX wieku, pojawili się specjaliści od telegrafów i telefonów, potem oświetlenia, potem prawdziwi elektrycy od „telegrafu bez drutu”, a wkrótce radia, radaru i telewizji. Mały odłam zajął się konstruowaniem urządzeń elektronicznych do łamania szyfrów „państw Osi” i liczenia trajektorii pocisków, ale wkrótce wojna się skończyła, minęło parę lat i na arenę wkroczyła informatyka. Od momentu upowszechnienia się komputerów osobistych ta ostatnia przeżyła kolejną błyskawiczną radiację. Dziś już niemal nie mówi się „informatyk” – są „hardwarowcy”, „sieciowcy”, „bazodanowcy”, „webmasterzy” itd.

Czy można stworzyć model symulacyjny tego procesu? Oczywiście, i to na wiele sposobów. W opisanym poniżej rozbudowanym automacie komórkowym kluczowym pojęciem jest energia, która musi być przekazywana lokalnie pomiędzy zamieszkującymi poszczególne komórki agentami, żeby ci mogli przeżyć i rozmnożyć się. Właściwości agentów są zdefiniowane przez bitowe maski ataku i obrony, które umiejscawiają agentów w sieci ekologicznej. Ustawione na 1 bity w maskach ataku decydują, co może stać się ofiarą danego agenta, ustawione na 0 bity maski ochrony decydują, przed kim i w jakim stopniu agent jest chroniony. Agenci wchodzą w tym silniejszą interakcję eksploatacyjną, im więcej tych samych bitów mają ustawionych w maskach ataku i obrony. Relacja ta jest kierunkowa, ale mogą istnieć „gatunki” agentów, które eksploatują się wzajemnie. Mogą też istnieć gatunki atakujące niemal wszystko i gatunki wyspecjalizowane w atakowaniu posiadaczy konkretnych masek ochrony. Mogą istnieć gatunki zupełnie nie chronione i chronione niemal całkowicie (choćby wyzerowanie wszystkich bitów jest „zabronione”, bo powstanie takiego gatunku właściwie kończy symulację, tak jak powstanie człowieka skończy – prędzej czy później – naturalną ewolucję biosfery). Ustawianie lub zerowanie bitów masek wpływa na koszt wytworzenia potomka: jest on tym droższy, im bardziej onipotenty pokarmowo i bardziej chroniony. Specjalne znaczenie ma maska ataku o ustawionych wszystkich bitach – tacy agenci nie atakują nikogo, za to, jak rośliny, otrzymują energię od systemu.

Ewolucja startuje od pojedynczego pozbawionego ochrony autotrofa, mogą jednak pojawiać się agenci o losowo zmodyfikowanych maskach, co jest odpowiednikiem próby specjacji – wejścia w inną niszę. Żeby jednak próba taka się powiodła, nowy agent musi być w stanie zdobywać energię w środowisku, czyli musi wpasować się w zastany lokalnie „ekosystem”.

W modelu możemy powtarzalnie zaobserwować zjawiska znane z rzeczywistości biologicznej i społecznej, jak kolonizacje nowych obszarów, wypieranie form mniej efektywnych przez skuteczniejsze, tworzenie złożonej sieci eksploatacji ograniczonej dostępnością zasobów/energii. To wyścig zbrojeń polegający na specjalizacji w metodach ochrony, pociągający za sobą specjalizację w metodach ataku. To także „aromorfozy”, polega-

jące na tak wysokiej specjalizacji ochronnej, że zaczyna brakować i miejsca i energii dla eksploatatorów<sup>41</sup>. Zdarzają się też generowane przez ewolucję fluktuacje, gdy „świat” jest opanowany przez jeden typ silnie chronionego autotrofa, a wszystkie drapieżniki muszą się specjalizować w ataku na dominującą postać ofiary. Jeśli pojawi się autotrof chroniony w inny sposób, a jest tylko kwestią czasu, kiedy to się stanie, opanuje on środowisko, a przynajmniej jego część, zanim wyewoluują odpowiedni eksploatatorzy.



A

B

Rysunek 8: Typowa historia w modelu koewolucji wielu gatunków. Ok. 11000 kroków Monte-Carlo, rejestracja co 10 kroków. A) liczebności agentów autotroficznych i wszystkich razem. B) liczba klonów oraz „taksonów” (dużych klonów) auto- i heterotroficznych.

Dla takiego nowego autotrofa dobrym „pomysłem” może być nawet niemal całkowita rezygnacja z ochrony i przeznaczenie zaoszczędzonej energii na szybsze rozmnażanie. Gdy ewolucja eksploatatorów zareaguje na jego obecność, ma już liczną populację, a więc duże szanse by dać początek nowym formom o lepszych maskach ochrony, które znowu są preferowane.

Najlepszym rozwiązaniem jest jednak posiadanie maski ochrony z ustawionym na 1 tylko bitem o najmniejszej wadze. Maski taka jest bardzo kosztowna, ale tylko bardzo kosztowny specjalista może wtedy eksploatować populację. Taka ostateczna aromorfoza zdarza się prędzej czy później w każdym przebiegu symulacji (na rysunku 9 powyżej ok. 7000 kroku), dając w efekcie rewolucyjną przebudowę ekosystemu. Początkowo gwałtownie rośnie liczebność przedstawicieli jednego taksonu – wynalazcy kosztem niemal wszystkich innych „gatunków”. Potem następuje szybka radiacja potomków wynalazcy, z których część zajmuje miejsce wytępionych starych heterotrofów. Wkrótce system jest jeszcze bardziej złożony niż był, chociaż gatunki są mniej liczne (jest więcej klonów, ale mniej „taksonów”, czyli dużych klonów) bo więcej przestrzeni zajmują formy dominujące.

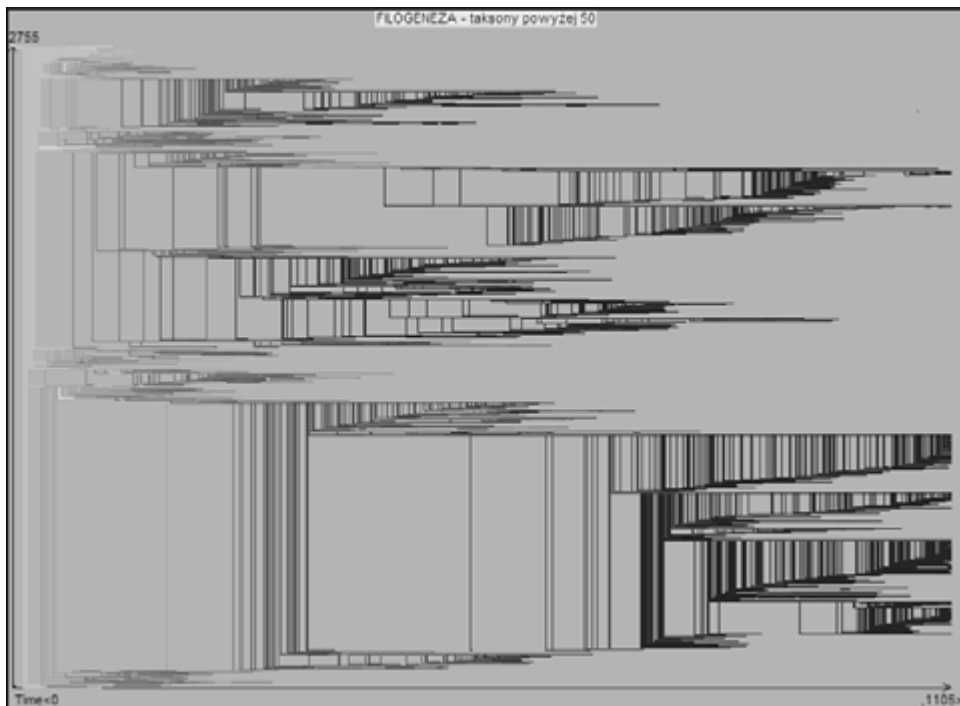
Rozmiar przestrzeni modelu i długość masek stanowią tu ograniczenia, nie pozwalające na dalsze rozbudowywanie złożoności. Przypomina to sytuację świata organicznego w paleozoiku, gdy po każdym wymieraniu odbudowywała się mniej więcej podobna liczba taksonów<sup>42</sup>, albo sytuację ludzkich kultur na przestrzeni tysięcy lat do ok. 1500 r. ne. Najpierw musiało minąć kilkadziesiąt tysięcy lat, zanim ze swobodnie wędrujących plemion powstało pierwsze państwo, potem przez kilka tysięcy lat powsta-

<sup>41</sup> Nazwane *scrub* od Australijskich zarośli krzewiastych, tak kolczastych, że stanowiących kiepski pokarm i niewygodne środowisko życia.

<sup>42</sup> J. Sepkowsky, *Extinctions of Life*. Los Alamos Science Fellows Colloquium 1988



wały, tworzyły niekiedy imperia, wielkie budowle i wielki dzieła sztuki, po czym upadały lub rozpadały się, ich miejsce zajmowały kolejne, wcale nie lepsze czy skuteczniejsze, a większość dorobku przegranych szła w niepamięć.



Rysunek 9: Drzewo filogenetyczne w modelu dla 2755 znaczących taksonów i ich przodków. Czas na osi poziomej. Linie poziome to trwanie poszczególnych taksonów, linie pionowe to momenty specjacji. Przedstawione są tylko te linie, które wciąż istnieją, albo w jakimś momencie przekroczyły liczebność 50 agentów oraz ich przodkowie. Widać, że po kryzysie pozostało ledwie 6 dominujących linii, choć każda złożona z jednego głównego i trwałego taksonu oraz kilku towarzyszących jego potomków, wymieniających się w mniej więcej stałym tempie.

Czy obecna kultura ludzka, tak jak biosfera mezozoiku i kenozoiku, znalazła się na eksponentalnej krzywej wzrostowej, która każdy kryzys przekształca we wzrost złożoności, a każdą informację wchłania i przetwarza? Być może, ale ten bardzo aktualny temat wymaga już innej opowieści...

#### EWOLUCYJNA DROGA DO ZŁOŻONOŚCI – Streszczenie

Replikatory to obiekty prezentujące trzy podstawowe własności: dziedziczność, podatność na mutacje, czyli zmienność oraz podatność na selekcje lepiej przystosowanych członków danego zbioru replikatorów, czyli „populacji”. Te trzy właściwości są wystarczające, by obiekty takie podlegały procesowi ewolucji.

Właściwie nie ma ograniczeń na fizyczną naturę replikatorów i miejsce, gdzie proces ewolucji może zachodzić. Można ją obserwować od poziomu molekuł (przedbiologiczna ewolucja mole-

kularna) poprzez ewolucję genów i ich nosiciele – „maszyn genowych” (organizmów lub innych jednostek selekcji wyższego niż geny rzędu) aż po gatunki i wyższe taksony (tzw. makroewolucję) oraz ściśle z nimi związane ewolucyjne zmiany w ekosystemach. W analogiczny sposób ewoluuje też większość produktów ludzkiego umysłu, od zwykłych plotek po wielkie systemy religijne, a także, oczywiście, wirtualne „światy komputerowe”.

Większość ewoluujących systemów ma zdolność adaptacji do zmiennych warunków otoczenia, ale ta zdolność opiera się na ich złożoności, a złożoność zazwyczaj wzrasta w trakcie ewolucji. O ile zdolność do adaptacji daje się dobrze objaśnić w oparciu o teorię doboru naturalnego, o tyle przyczyny takiego naturalnego wzrostu złożoności w ewoluujących systemach wciąż nie są do końca jasne.

W tekście opisano, jak – używając sieciowej i wielopoziomowej interpretacji pojęcia replikatora, porównując i interpretując przykłady z różnych ewoluujących systemów naturalnych oraz symulacji komputerowych ewolucji sztucznych sieci neuronowych i wielogatunkowej koewolucji – można postrzegać to trudne zagadnienie. W szczególności zwrócono uwagę na znaczenie zdarzeń „duplikacji i specjalizacji” oraz tzw. „kluczowych innowacji”, które wspólnie napędzają proces wzrostu i reorganizacji sieci współzależnych replikatorów – czy to będą geny, czy osobniki różnych gatunków biologicznych czy jednostki sieci symboli, znaczeń, idei wypełniające „ideosferę” ludzkiego społeczeństwa.

#### EVOLUTIONARY PATH TO COMPLEXITY – Summary

Replicators are objects, which have three important properties: heredity, mutability and selectivity of better adopted members, i.e. “population”. Those three properties are sufficient to allow them to take part in evolutionary processes. There is almost no restriction for the physical nature of replicators and localization of the evolution process, which can be observed from the level of molecules (prebiotic, chemical evolution), through evolution of genes and organisms (microevolution), to the scale of species and larger taxa (macroevolution) and “evolution” of ecosystems. Moreover, most of the products of human mind, starting from rumors and ending with religion systems and completely virtual “computer worlds”, evolve in such a manner.

Most of the evolving systems are adaptive, which is the result of their complexity growing during evolution. Whereas the ability of adaptation can be explained by a natural selection theory, the reason why such complexity increases is still not clear enough.

Using a network and multilevel view on replicators, I compared and interpreted examples taken from many real evolving systems as well as results of computer simulation of evolving dynamic neural networks and multispecies coevolution. Especially I concentrated on the role of “duplication-specialization” events and on the importance of key innovations, which together drive the replicator networks growth and reorganization, regardless of the fact whether they are genes, individuals, or nodes of the network of symbols, meanings and ideas, which fill the “ideosphere” of any human society.