Życie ewoluuje w półchaosie w systemach nie w pełni losowych

Life evolves in half-chaos of not fully random systems

Andrzej Gecow
https://sites.google.com/site/andrzejgecow/home gecow@op.pl andrzejgecow@gmail.com

Streszczenie

Ważna dla modelowania sieciami złożonymi wytworów życia, techniki i kultury, sławna hipoteza Kauffmana „życie na granicy chaosu i porządku" jest tu głęboko reinterpretowana w wyniku rozszerzenia modelu o korelacje funkcji i stanów. Prezentowane tu odkrycie „półchaosu" - stanu bardziej adekwatnego do opisu życia, istotnie zmienia dotychczasowe podstawy wielu rozważań. Systemy półchaotyczne mają parametry losowych systemów chaotycznych lecz jednocześnie cechy porządku i chaosu, wcześniej uważane za wykluczające się. Jak ciecz przegrzana, w wyniku dużej zmiany (po małym zaburzeniu) zostają chaotyczne. Mała zmiana, definiowana brakiem zmian pośrednich, nie wyprowadza z półchaosu. Podstawą półchaosu jest krótki atraktor. Odkryta tu „semimodularność" - forma półchaosu, daje obraz „małe jeziorka aktywności w lodzie" zbliżony do systemów z „obszaru ciekłego" na granicy chaosu. Jest dużo więcej systemów półchaotycznych niż w „obszarze ciekłym".

Słowa kluczowe: sieci Kauffmana; sieci złożone; chaos; życie na granicy chaosu; przejście fazowe do chaosu; propagacja zaburzenia; mechanizm darwinowski.

Summary

Important for modeling of products of life, of technology and culture using complex networks, the famous Kauffman's hypothesis „life on the edge of chaos and order" is here deeply reinterpreted in effect of the model extension by functions and states correlation. The presented discovery of "half-chaos" – a state more adequate for describing life, significantly alter the existing basis of many considerations. Half-chaotic systems have the same parameters as chaotic random systems but they exhibit the characteristics of order and chaos simultaneously, previously considered to be mutually exclusive. As superheating, in effect of a large change (after a small disturbance) they become chaotic. Small change, defined by lack of immediate changes, does not lead out of half-chaos. The basis of half-chaos is a short attractor. Discovered "semimodularity" - a form of the half-chaos, gives the image "small lakes of activity in the ice", similar as for systems in Kauffman's "liquid area" on the edge of chaos. There is much more half-chaotic systems than in "liquid area".

Keywords: Kauffman networks; complex networks; chaos; life on the edge of chaos; phase transition to chaos; damage spreading, Darwinian mechanism.

Wprowadzenie

Wskazanie adekwatnych parametrów systemu złożonego, opisującego obiekty żywe, techniczne lub społeczne, jest kluczowe dla poprawnego modelowania ich procesów. Kauffman **(Kauffman 1993, 1990)** rozważał autonomiczne, dynamiczne, deterministyczne, złożone, losowe sieci Boolowskie. W większości dotychczasowych badań stosowano stałą dla wszystkich nodów liczbę **K** - wejść do nodu, jako podstawową zmienną. Najważniejszym wynikowym parametrem jest wielkość oczekiwanej **damage** - zmiany funkcjonowania w wyniku małego permanentnego zaburzenia. W sieciach losowych parametr ten tworzy dwa stany systemu – uporządkowany i chaotyczny, pomiędzy którymi jest dość szybkie przejście (w okolicy K=2, gdy sygnały są równoprawdopodobne), traktowane jako przejście fazowe. Jedynie w systemach w pobliżu tego przejścia (obszar ciekły pomiędzy stałym – uporządkowanym i gazowym - chaotycznym) zmiany funkcjonowania (damage) dostatecznie często bywają małe, a takie są konieczne do ewolucji biologicznej. Jest to główna podstawa hipotezy Kauffmana: życie na brzegu chaosu.

Wniosek ten budził jednak wątpliwości **(Gecow 2011)**, poddany więc został prezentowanej tu głębszej analizie, która wykazała, że w bardziej rozbudowanym modelu, wskazany przez Kauffmana obszar ciekły przestrzeni systemów jest dość wyjątkowy i mały. Odpowiednie systemy dla biologicznej ewolucji można wskazać także w innych obszarach. Rozważając specyficzne korelacje parametrów, które Kauffman upraszczając przyjął jako losowe, znajdujemy systemy, które jednocześnie manifestują „dojrzały chaos" i porządek w zbliżonych udziałach. Analogia do przejścia fazowego jest tu bardziej złożona – to raczej „ciecz przegrzana". Rozkład wielkości damage ma tu dwa piki – bardzo małych zmian (uporządkowanych) i bardzo dużych w pobliżu równowagi Derridy **(Derrida 1986)** (dojrzały chaos). Pomiędzy nimi jest spora przerwa – zmiany pośrednie praktycznie nie pojawiają się. Definiuje to w naturalny sposób zmianę małą, co ma duże znaczenie interpretacyjne. Jest to nieznany dotąd stan systemu, który nazwano „półchaosem". Systemy półchaotyczne posiadają parametry, które gdy zlikwidować owe korelacje dużą zmianą funkcjonowania, tworzą zwykłe, losowe systemy chaotyczne. Taka duża zmiana dobrze modeluje śmierć (eliminację) obiektu żywego, czego w Kauffmanowskim modelu nie było. Dopóki jednak ewoluują akceptując jedynie zmiany małe (dobrze modelujące zmiany ewolucyjne i rozwojowe), to nie opuszczają stanu półchaosu. Takie małe zmiany są podstawą tożsamości ewoluującego obiektu i upraszczają definicję podstawowego mechanizmu darwinowskiego.

Formą półchaosu jest odkryta w tych badaniach „semimodularność”. Daje ona obraz funkcjonowania systemu zbliżony do wskazanego przez Kauffmana dla systemów losowych obszaru ciekłego, gdzie umieszcza on życie. Istotą takich systemów są „małe jeziorka aktywności w lodzie” (oryginalnie: “unfrozen islands”) **(Kauffman 1990)**, co mimo równomiernego, losowego połączenia nodów daje efekty zbliżone do modularności. W przeciwieństwie do obszaru ciekłego, gdzie lód (nody nie zmieniające stanu) wynika z natury stanu uporządkowanego, tu jest on specyficznym stanem w systemie z natury parametrów (s,K – see Methods) chaotycznym, zadanym nielosowo (poprzez korelacje funkcji i stanów nodów). Ta forma półchaosu szczególnie dobrze nadaje się do opisu ewolucji biologicznej z uwagi na rozkład wielkości małych zmian. Ogólnie, podstawą półchaosu okazuje się krótki atraktor w semimodułach, lub w całym systemie gdy semimodułów brak.

Wątpliwości: ujemne sprzężenia zwrotne i sieci logiczne

Są dwie ważniejsze wątpliwości jakie nasunęły się mi podczas śledzenia argumentacji Kauffmana za hipotezą życie na granicy chaosu. Obie opisałem szerzej w **(Gecow 2011)**.

Pierwsza, to sposób uwzględnienia ujemnych sprzężeń zwrotnych. Takie sprzężenia regulacyjne powszechnie uważane są za podstawę stabilności obiektów żywych, a ich koncentracja uważana jest za istotnie podwyższoną względem losowej. Tymczasem, złożone struktury tych sprzężeń dla tej statystycznej nadwyżki zostały w modelu zastąpione ich poprawnym skutkiem, a pozostały jedynie dla udziału losowego. Tak uproszczony model nie jest w stanie poprawnie oddać statystycznego obrazu awarii systemu i wnioski dotyczące mechanizmu stabilności mogą (i wydają się) istotnie odbiegać od rzeczywistości.

Ta wątpliwość była głównym powodem podjęcia badań, które początkowo miały na celu silne podniesienie udziału mechanizmów regulacyjnych (met1,2,4ab). Okazało się jednak, że prostszym, ogólniejszym i bardziej istotnym czynnikiem jest krótki atraktor (met4cd,met5,6,7), co nie zmienia znaczenia regulacji (met4a).

Drugim założeniem budzącym niepokój było ograniczenie się w badaniach statystycznych do dwóch wariantów sygnału. Siecią logiczną można opisać każdą złożoną zależność (mechanizm), ale sprowadzanie do opisu dwuwariantowego częstych przypadków, gdzie istotne sygnały przyjmują więcej wariantów niż 2, generuje sytuacje nierealne, w domyśle – do pominięcia **(Gecow 2011,fig.3)**. W analizie statystycznej nie są jednak pomijane i dają fałszywy obraz. Dodanie do opisu dwuwariantowego parametru p - prawdopodobieństwa jednego z wariantów, nie rozwiązuje tu problemu. Przyjęcie **s**≥2 równoprawdopodobnych wariantów sygnału jest alternatywną metodą urealnienia modelu. Wydaje się ona jednak częściej bardziej adekwatną. Obie metody dają odmienne wyniki **(Gecow 2011, fig.3, 5)** co istotnie zwiększa wagę poprawnego doboru opisu.

Założenia podstawowe - metody

Zastosowano więc także więcej niż 2 rónoprawdopodobne warianty sygnału **(Gecow 2011)**, ich liczbę przyjęto opisywać symbolem **s**. Proponuję utrzymać dla takich sieci nazwę „sieci Kauffmana”, przez co terminy „sieć Boolowska” i „sieć Kauffmana” przestaną być synonimami. W badaniach tych stosowano także stałe K (liczba wejść do nodu) dla wszystkich nodów sieci, natomiast liczba **k -** wyjść z nodu była dowolna dla nodów w sieci i w zależności od sposobu konstruowania sieci miała różne rozkłady związane z różnymi typami sieci. Głównie badano sieci typu „Random” Erdosa-Renyi (symbol er); scale-free (sf) i niekiedy single-scale (ss) (dla sf i ss patrz **(Gecow 2011,fig.2))**. Na rysunkach typ sieci oznaczany jest tylko drugą literą. Parametry: typ sieci oraz s,K (traktowane jak wektor) są głównymi zmiennymi w symulacjach. Większość badań wykonano dla s,K=4,3, niektóre także dla s,K=2,4, czyli dla sieci Boolowskiej. Dają one silnie chaotyczne systemy losowe – ‘współczynnik rozmnażania zmiany’**(Gecow 2011)** w=K(s-1)/s jest wyraźnie >1. Liczba nodów w sieci – **N** zwykle wynosiła 400, stosowano wyjątkowo też 800 i 4000. Stosowano obliczanie synchroniczne, **t -** liczba kroków czasowych od chwili inicjacji zaburzenia. Jako zaburzenie stosowano permanentną zmianę wartości funkcji nodu dla jego stanu wejściowego z chwili t=0. Parametr **tmx** – maksymalna liczba liczonych kroków, wybierano arbitralnie, sprawdzano jednak, czy zwiększenie tmx nie zmienia wyników (rys.4, 7, 8). Symulowano proces przekształceń systemu zaburzonego na odcinku tmx, po czym porównywano stan otrzymanego sytemu z systemem niezaburzonym. Wynik **A** to liczba nodów, których stan się różnił. Zmiana funkcjonowania - damage d=A/N. Rozkład wielkości damage w chwili tmx w postaci P(d) lub **P(A)** (rys.1) jest szczególnie ważnym wynikiem – granice pików: lewego - zmian małych (uporządkowanych), i prawego – zmian wielkich (chaotycznych) definiują „zmianę małą”, która stanowi w ewolucji kryterium akceptacji zaburzającej zmiany permanentnej, wystarczające (rys.2), by nie wyprowadzać z półchaosu (**stabilność ewolucyjna półchaosu**). Głównym wynikiem jest „stopień porządku” **q -** udział efektów małego zaburzenia (rys.3), które zmieściły się w zakresie „małej zmiany funkcjonowania” w chwili tmx. Odpowiada to zawartości piku lewego, czyli prawdopodobieństwu akceptacji zmiany w modelowanej ewolucji (brak eliminacji).

Więcej ujemnych sprzężeń zwrotnych lub modularności

W prezentowanych badaniach pierwszymi metodami korekty losowego systemu chaotycznego było przekształcenie części sprzężeń zwrotnych w strukturze losowej na sprzężenia ujemne poprzez zmianę funkcji losowej, gdy stan wejściowy nie był dotąd użyty. Były to **met1 i** podobna, silniejsza **met2** z iteracyjną zmianą także wzorca. Badano sieci s,K=2,4 i 4,3, co z **(Gecow 2011, fig.5)** sugerowało osiągnięcie chaotycznej równowagi Derridy już przed 15-tym krokiem czasu. Początkowe badania dla tmx=60 kroków dały bardzo obiecujące wyniki (rys.4a) – q wzrosło istotnie (szczególnie dla s,K=4,3), rozkład wielkości damage zawierał już dwa rozdzielone przerwą piki. Znaczna część tego efektu (szczególnie dla s,K=2,4) była wynikiem odstępstwa od losowości funkcji, co także można zaliczyć **(Kauffman 2004)** do narzędzi ewolucji. Okazało się jednak (rys.4), że uzyskana w met2 stabilność q zazwyczaj istotnie spadała z wydłużaniem tmx, praktycznie zanika już dla tmx=1000, tylko w przypadku Boolowskiej sieci sf 2,4 można by uznać tę metodę za skuteczne osiągnięcie półchaosu (nie sprawdzono stabilności ewolucyjnej).

Badania te wskazały na dużą rozpiętość wyników w zależności od typu sieci – sieć sf jest bardziej uporządkowana **(Iguchi 2007)** a sieci ss i er są bardziej chaotyczne, zbliżone w reakcji, ale er ma utrudniający obserwację udział k=0 (rys.4, 3, 5). Parametry s,K = 2,4 i 4,3 dają także bardzo odmienny obraz. Symulacja pozwoliła głębiej przyjrzeć się samemu procesowi i jego uwarunkowaniom, co wskazało na zjawisko wtórnych inicjacji i wagę krótkiego atraktora. Za spadek q ze wzrostem tmx odpowiadają przypadki powtórnego pojawienia się na wejściu zaburzonego nodu stanu jego wejść, dla których jego funkcja została permanentnie zmieniona. Taka wtórna inicjacja przebiega w odmiennych warunkach niż poprzednie i także może doprowadzić do wielkiej zmiany chaotycznej. Po obrocie atraktora nowe takie przypadki już nie występują (patrz dalej met6 i rys.6a,b).

Wydawało się, że najbardziej naturalnym sposobem uzyskania krótkich atraktorów jest modularność, więc w następnej kolejności wstępnie sprawdzono, co ona daje w aspekcie stabilności (**met3**). Tu okazało się, że dostatecznie małych spontanicznych atraktorów można oczekiwać jedynie w tak małych modułach, że rozważanie stanu chaosu traci w nich sens. Modularność także dała podniesienie q (rys.4c), szczególnie, gdy zastosowano jednocześnie met2 zwiększające udział ujemnych sprzężeń zwrotnych, nie sprawdzano jednak stabilności ewolucyjnej. W rozkładzie wielkości damage nie obserwowano typowej dla półchaosu radykalnej przerwy między pikami, jedynie wyraźne minimum. Zwiększenie q w eksperymencie met3+met2 z s,K=2,4 prawie w całości wynikało z nielosowości funkcji. Obie te metody i związane z nimi czynniki (jak nielosowość funkcji) należą do najważniejszych metod uzyskania przez ewolucję biologiczną pożądanej stabilności, ale w obu istotnym czynnikiem pozostaje krótki atraktor.

Brak oczekiwanego radykalnego efektu mechanizmów regulacyjnych w met2 upatrywano w starcie z sieci losowej. Wprowadzono więc silną regulację w systemie z radykalnie krótkim atraktorem – punktowym (**met4a**). Tym razem efekt był zaskakująco silny (rys.5), zmniejszono więc regulację do minimalnej (**met4b**, patrz też **met5b** rys.5d), a następnie całkiem z niej zrezygnowano (**met4c,d** i dalsze), co wykazało, że atraktor punktowy jest wystarczający do uzyskania półchaosu. Wynik met4a pokazuje, jak silny może być efekt regulacji w systemie półchaotycznym - pik prawy prawie znika, czyli prawdopodobieństwo wejścia w chaos w wyniku niedużej awarii systemu (wewnętrzne przyczyny) jest małe. Daje to złudny obraz porządku **(Shmulevich 2005, Serra 2007)**. Pozostają przyczyny zewnętrzne, których model sieci autonomicznej z założenia nie bierze pod uwagę. Adaptacja jest jednak do środowiska, które może się zmieniać i rzeczywistą ewolucję należy badać systemami otwartymi jak w **(Gecow 2009).**

System z atraktorem punktowym jest półchaotyczny

Badanie systemów o parametrach s,K= 4,3 i 2,4, czyli silnie chaotycznych, gdyby były losowe, ale z zadanym atraktorem punktowym jako skrajnie krótkim (**met4c,d**), dało jednoznaczne wyniki – takie systemy nie są ani uporządkowane, ani chaotyczne. Oba warianty reakcji na małą zmianę inicjującą (uporządkowany – mała zmiana funkcjonowania i chaotyczny – wielka zmiana w pobliżu równowagi Derridy – rys.1) pojawiają się w zbliżonych udziałach (rys.3). Taki stan nazwany został półchaosem. W tym stanie wynikowe zmiany funkcjonowania mogą być albo bardzo małe, albo bardzo duże (eksplozje do chaosu rys.7), ale praktycznie nie występują zmiany pośrednie (rys.1, 5, 7, 8). Definiuje to w naturalny sposób zmianę małą. Pozostaje problem długości i warunku ewolucji systemu półchaotycznego.

Uzyskanie atraktora punktowego jest proste, wystarczy po losowym wygenerowaniu sieci i stanów przyjąć, że dla aktualnego stanu wejść nodu jego funkcja daje aktualny stan, a dla pozostałych stanów wejściowych funkcje wygenerować losowo. Atraktor punkowy to w języku Kauffmana całkiem zamrożony system – jest tylko „lód”, a przewaga lodu to spontaniczna własność systemów uporządkowanych. Zaburzając małą zmianą system półchaotyczny z atraktorem punktowym można spodziewać się powstania „małego jeziorka aktywności w lodzie”, co jest istotą obszaru „ciekłego” systemów losowych, w którym Kauffman umieszcza życie. Jednak taki system przestaje mieć atraktor punktowy. Okazuje się, że znakomita większość (zwykle ponad 99 %) „małych zmian funkcjonowania” daje także atraktory punktowe. Ewolucja może więc być długa, jednak taki jej model jest dość skrajny i mało atrakcyjny.

Sprawdzono więc dla modeli b i c z met4, jak długa może być ewolucja, jeżeli będą akumulowane zmiany małe, ale nie dające atraktora punktowego (**met5**). Otrzymano, że pozwala to na dowolnie długie utrzymanie stanu półchaosu, który stabilizuje swoje parametry (rys.2). Taką stabilność ewolucyjną półchaosu włączono do jego definicji. System nadal posiada znaczną przewagę lodu (rys.2c), a w nim zwykle jest kilka „małych jeziorek aktywności" tworzących „semimoduły". Wśród zastosowanych metod pozwalających sprawdzić obecność i własności semimodułów (patrz też rys.8c,d), najskuteczniejsza polegała na śledzeniu okresów nodów. Zbiór nodów o tym samym okresie w procesie zakończonym kumulacją traktowany był jako klaster lokalny odpowiadający semimodułowi. Średnio jednocześnie występowało około 2 klastry lokalne (rys.2e).W ewolucji, nieraz po wielu w międzyczasie skumulowanych zmianach, pojawiały się klastry lokalne bardzo zbliżone pod względem składu nodów – zbiór takich klastrów lokalnych traktowano jako klaster globalny. Metody identyfikacji klastrów globalnych są bardzo złożone ze względu na bogactwo różnych okoliczności, w tym łączenie się i rozpadanie klastrów globalnych podczas ewolucji. Można jednak stwierdzić, że są to ogólnie twory dość stabilne, choć często znikają (zamarzają) i pojawiają się ponownie, często w innym towarzystwie pozostałych klastrów globalnych, nierzadko zmieniając okres. Ich średnią liczbę na komplet inicjacji przedstawia rys.2d. Należy podkreślić, że struktura połączeń badanych sieci była niezmienna i losowa, choć ta losowość miała różne formuły definiujące typ sieci. W przeciwieństwie do modularności, semimodularność nie polega na różnej gęstości połączeń wewnętrznych i zewnętrznych, a jest efektem funkcjonowania zdefiniowanego przez funkcje i stany nodów w danej strukturze. Mimo doboru funkcji dla uzyskania początkowego stanu atraktora punktowego, funkcje i stany nodów miały w pełni losowe charakterystyki.

Symulacje met4 i met5 startowały z systemu o atraktorze punktowym. W met4 badano sieci sf i er o liczbie nodów N=400 i 4000, na odcinku tmx=200 i 2000 (bez wariantu N=4000, tmx=2000). Badany był jeden komplet inicjacji – dla s=2 (met4d) każdy nod miał możliwość 1 inicjacji, dla s=4 pozostałych wartości funkcji było 3. Dla każdego z 3 wariantów (N,tmx) uzyskano 48,000 przypadków. Różnice w wynikach tych wariantów były nieistotne (rys.1, 5), do dalszych badań w met5 przyjęto N=400, tmx=1000.

W met5 ograniczono się do s,K=4,3, ale badania te były znacznie bardziej złożone. Aby proces kumulacji był długi badano wiele kompletów inicjacji, czyli wielokrotnie powtarzano tę samą zmianę funkcji jako inicjację, ale oddzielone to było wieloma kumulacjami. Po wstępnym zebraniu kumulacji jednym kompletem inicjacji (**J** na rys.2, 6, 7), następowało 20 kompletów (M), z których jedynie 1,7,13,19 i 20-ty dopuszczały wszystkie inicjacje, co pozwalało w nich na pomiar q i innych obserwowanych wielkości. W pozostałych blokowane były zmiany wsteczne. Najważniejsze parametry świadczące o nie przybliżaniu się do chaosu – q i średni czas pięciu najpóźniejszych „eksplozji do chaosu" (rys.2a,b), stabilizują się już od kompletu M7, mimo wymuszonego utrzymywania nieco podwyższonej długości atraktora globalnego (nie mniejszy od 7, a w M20 nie mógł maleć). Podczas procesu kumulacji atraktor zwykle spontanicznie maleje i bywało, że warunek na wielkość atraktora blokował dalszą ewolucję. Takie procesy były przerywane, jednak w głównej serii badano po 100 sieci, które osiągnęły M20.

Okazało się, że istotnym czynnikiem jest wielkość przesunięcia (w zakresie 2-50) początku procesu (miejsca inicjacji) po każdej kumulacji. Przyjęto przesunięcie 50 kroków. Badania były znacznie szersze i głębsze, ich pełny opis można znaleźć w (**Gecow 2016**). Dodatkowe próby skierowania ewolucji bardziej w kierunku granic chaosu nie dały zauważalnego zbliżenia – warunek akceptacji małej zmiany jest wystarczający na dowolnie długą ewolucję - daje stabilność ewolucyjną półchaosu.

Kontrolowane utworzenie systemu półchaotycznego

Atraktor punktowy, jako skrajnie krótki, dał poszukiwany półchaos. Skrajność jest jednak specyficzna, a w ewolucji (met5) półchaos utrzymywany był nawet gdy nie znaleziono atraktora w zakresie tmx (rys.8c). Należało sprawdzić, czy sam warunek krótkiego atraktora, ale wyraźnie większego niż 1, wystarcza. W tym celu wykonano symulacje **met6** zadając w systemie losowym atraktor globalny (całej sieci) =21. Od t=21 dla nieużywanych dotąd stanów wejściowych nodów zmieniano wartość funkcji na taką, jak 20 kroków wstecz. Okazało się, że otrzymano ewolucyjnie stabilny półchaos nawet o znacznym q (rys.3) dla tych samych parametrów i reguł symulacji ewolucji co w met5. Podstawową uzyskaną różnicą jest kształt piku lewego (małych zmian) na rozkładzie wielkości damage – praktyczne są tu jedynie zmiany o wielkości A=0, natomiast A=1 i A=2 występują w śladowych ilościach (rys.1). Znaczy to, że praktycznie nie ma tu zmian funkcjonowania i mimo akceptacji zmian permanentnych w funkcjach nodów, nic się nie zmienia. Taki proces nie nadaje się do modelowania adaptacyjnej ewolucji biologicznej, tylko do ewolucji neutralnej. Stwierdzono całkowity brak semimodułów. W półchaosie opartym na semimodularności, jak w met5, pik małych damage zawiera znaczące ilości zmian w zakresie A=1 do 4, a zmiany większe także zdarzają się zauważalnie często (rys.1). Semimodularność w met5 wyjaśnia uzyskaną stabilność dla większych atraktorów globalnych - są one złożeniem małych atraktorów lokalnych (w semimodułach) ale tę tezę także należało lepiej sprawdzić.

Aby stwierdzić wystarczalność stanu semimodularnego do uzyskania stabilnego półchaosu, spróbowano utworzyć go kontrolowanie, bez startowania z atraktora punktowego (**met7**). Badano sieci sf, ss i er, s,K=4,3. Wpierw generowano losowo (zależnie od typu) sieć N nodów i ich stany. Dalej analizując połączenia nodów tworzono zbiór semimodułów i każdy nod zostawał przypisany do jakiegoś semimodułu lub do rozdzielającego je lodu. Nod tworzył nowy semimoduł, gdy żaden jego link (wejściowy i wyjściowy) nie łączył z nodem należącym do określonego już semimodułu. Gdy połączony był z nodami już należącymi tylko do jednego semimodułu, to przypisywano go do tego semimodułu. Gdy połączony był z nodami już należącymi do kilku semimodułów, lub gdy wyczerpany został limit semimodułów (=10) albo wielkości danego semimodułu (=100 nodów dla N=800, 25 dla badań ewolucji), to nod był przypisywany do lodu.

Dalej obliczana była trajektoria odpowiednio dobierając funkcje. Dla aktualnego stanu wejściowego, jeżeli nie był on dotąd zdefiniowany, nody lodu dostawały wartość funkcji równą 0 a nody należące do semimodułów –wartość losową.

Stosowano wiele dodatkowych warunków i korekt, których pełen opis zawiera dokumentacja **(Gecow 2016)**, ich szczegóły nie są tu istotne. Początkowo w każdym semimodule wymuszano krótki atraktor i przy tym założeniu wykonano podstawowe badania: (b) - stanu semimodularności (serie z N=800 i tmx=2000 bez ewolucji z grubsza odpowiadające met4), oraz (eb) - ewolucję jak w met5 i met6 (serie z N=400 i tmx=1000). Na końcu sprawdzono konieczność tego założenia i nieoczekiwanie okazało się ono zbędne, powtórzono więc oba najważniejsze badania bez wymuszania (a i ea – jako logicznie prostsze).

Badania (J) stanu semimodularności z N=800 głównie polegały na sprawdzeniu q i rozkładów wielkości damage. W wersji b żądano by atraktor globalny był większy od 200 gdy lokalny nie mógł przekroczyć 100 - wynik był zgodny z testowaną wizją tłumaczącą dopuszczalność sporych atraktorów globalnych. W obu wersjach sprawdzono, że to nie statystyczne własności nielosowo dobranych funkcji są odpowiedzialne za podwyższenie stabilności, czyli: jak zachowuje się taki system po akceptacji jednej zmiany dużej (X), losowej zmianie stanów nodów (S), przesunięciu funkcji na inne nody (T) i po losowym wygenerowaniu nowych funkcji (F). W eksperymentach X,S,T funkcje zachowały swoje statystyki. We wszystkich tych eksperymentach otrzymano chaos (jak X na rys.3, 7b), ale różnił się on systematycznie minimalnie od pełnej wersji chaosu F (rys.6).

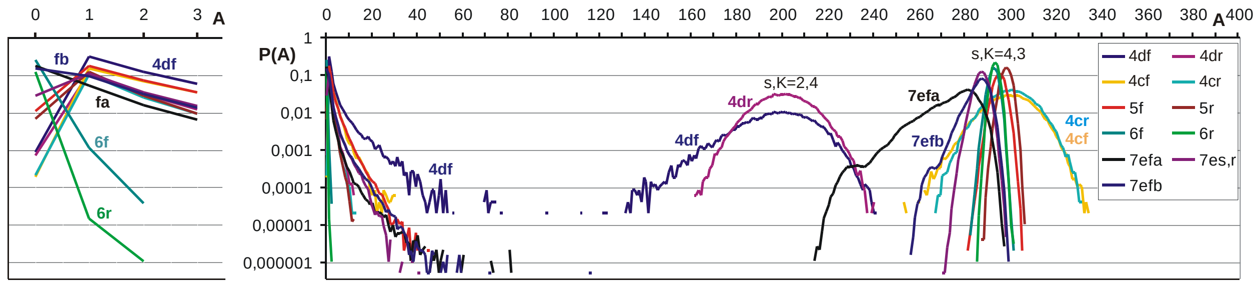
W porównaniu z met5 szczególnie dla sieci sf oba piki rozkładu wielkości damage uległy drobnym zmianom (rys.1). Także w rozkładach rozmiaru lodu i rozmiaru klastrów lokalnych powstało rozmycie co spowodowało wyraźne zmniejszenie średniego lodu i zwiększenie średnich rozmiarów klastrów lokalnych (rys.2c). Świadczy to o uzyskaniu nieco innego stanu semimodularności. Podobnie jak w met5 i met6 parametry systemu stabilizują się od M7, a mała zmiana jako warunek akceptacji wystarcza do dowolnie długiego utrzymania półchaosu w wersji semimodularności.

Podsumowanie

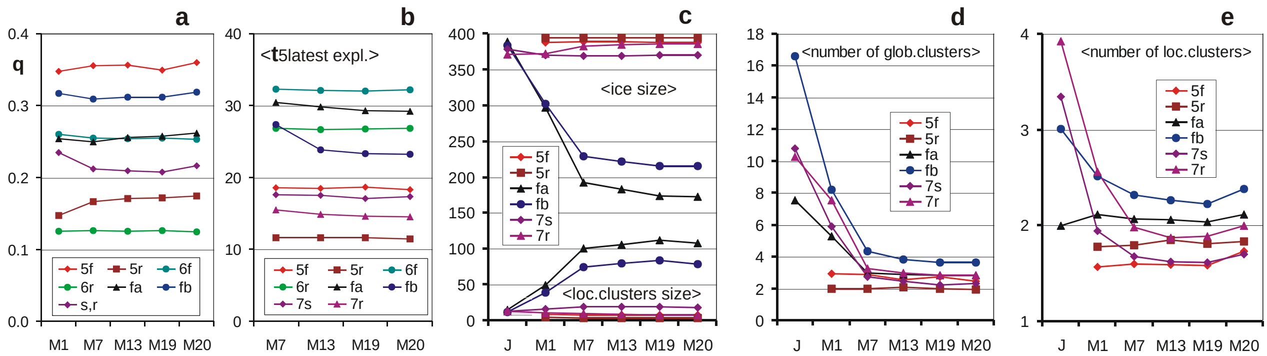
Hipoteza „życie na granicy chaosu” wskazała istotny czynnik w modelowaniu ewolucji biologicznej, procesów w organizacjach społecznych i tworach technicznych, jednak oparta była na zbyt prostym modelu. Dała ona obraz rozkładu wielkości damage o jednym piku – tylko małych zmian, oraz sugerowała silny wpływ naturalnych własności systemu uporządkowanego znanych pod hasłem „porządek za darmo” **(Kauffman 1996)**. Taki obraz nie bardzo odpowiadał obserwowanej delikatności obiektów żywych, nie eksponował struktur regulacyjnych, nie zawierał też modelu śmierci koniecznej do darwinowskiej eliminacji. Konieczność małego s=2 i K w okolicy K=2 także wydawała się nie pasować do obserwacji **(Luque 2004, Aldana 2003, Sole 2000)**.

Pogłębienie modelu, dopuszczenie złożonych nielosowości parametrów wcześniej przyjętych jako losowe, pozwoliło odkryć stan półchaosu - znaleźć obszary odpowiednie dla ewolucji (dające dostateczny udział małych zmian), także w zakresie systemów chaotycznych z natury swoich parametrów. Zwolniło też z ostrych ograniczeń, które były dotąd typową podstawą wielu rozważań **(Nghe 2015, Serra 2007, Aldana 2003, Kauffman 1996) -** nie tylko K może być >2 ale i s także. W stanie półchaosu występuje także pik wielkich zmian, które dobrze modelują śmierć i eliminację – po wielkiej zmianie bezpowrotnie system staje się zwyczajnie chaotyczny, jednak mała zmiana, która otrzymuje tu naturalną definicję, zachowuje półchaos i tożsamość systemu, więc ewolucja może toczyć się dalej. Półchaos, wraz z zadaną zmiennością inicjującą, uzupełniony powielaniem wynikającym z żądania długiej ewolucji, oferuje pełny podstawowy mechanizm darwinowski. Regulacyjne sprzężenia zwrotne istotnie zwiększają stabilność, także klasyczna modularność i zwężenie funkcji, co było zauważane, ale głównym i nowym warunkiem jest krótki atraktor. Przejmują one rolę wyjaśniającą doświadczeń **(Shmulevich 2005, Serra 2004)** od „porządku za darmo”, który w półchaosie stracił znaczenie. Uzyskana głębsza interpretacja hipotezy Kauffmana daje więc obraz znacznie bardziej zgodny z obserwacją i wskazuje systemy bardziej adekwatne do modelowania ewolucji biologicznej. Istotnie zmienia to dotychczasowe podstawy wielu rozważań i prawdopodobnie ich wnioski. Jednocześnie opis systemów z obszaru „ciekłego” **(Kauffman 1990)**, w którym Kauffman widział obiekty żywe – „małe jeziorka aktywności w lodzie” pozostaje aktualny dla podstawowej i najbardziej odpowiedniej dla ewolucji formy półchaosu – semimodularności odkrytej w tych badaniach.

Rysunki



Rys.1. Główny wynik - rozkład wielkości damage uzyskany w met4cd, 5, 6 i 7e dla N=400.
Zastosowano skale log z uwagi na duże różnice wartości i znaczenie przerwy pomiędzy pikami – lewym (małych zmian - uporządkowanych) i prawym (zmian chaotycznych w pobliżu równowagi Derridy, różnej dla s=2 i 4). Zawartość lewego piku, tj. q – stopień porządku, udział zmian uporządkowanych podsumowany na rys.3 i rys.5d, jest podstawowym efektem prezentowanych badań, pozwala wprowadzić półchaos. Stanowcza przerwa pomiędzy pikami w naturalny sposób definiuje małą zmianę, która wystarcza do utrzymania półchaosu w ewolucji (patrz też rys.5, 7 i rys.8). Dla celów modelowania ewolucji biologicznej znaczenie ma kształt lewego piku, którego najważniejsze, początkowe wartości pokazano dokładniej z lewej. Widać tu istotną jakościową odrębność wyników z met6, w której brak jest semimodularności i brak większych zmian w zakresie lewego piku. Oznaczenia rozpoczyna symbol metody, dalej następuje druga litera typu sieci. Sieć Boolowską (s=2), badana jest tu tylko w met4d. W met5,6 i 7 (eksperymentach z ewolucją - oprócz met4) prezentowane tu (i w rys.2) wyniki dotyczą modelu met4c. Są one zsumowane z pełnych kompletów inicjacji M7, 13, 19 i 20 - czyli w zakresie, gdzie były pełne i już ustabilizowane (bez blokowania cofania zmian i wstępnych **J** i M1, patrz rys.2). Wyniki dla sieci ss i er praktycznie pokrywają się (7es,r). Sieć sf daje wyraźnie różne wyniki dla modelu z wymuszonymi małymi atraktorami semimodułów (fb) i bez tego wymuszenia (fa), a oba różnią się lewym stokiem prawego piku od pozostałych, co jest jednym z kilku efektów jakiegoś dodatkowego mechanizmu (patrz też rys.2c).



Rys.2. Zmienność podstawowych parametrów podczas ewolucji w met5, 6 i 7.
Podobieństwo wyników dla tych trzech metod świadczy o podobieństwie uzyskanego półchaosu, w tym głównie jego stabilności ewolucyjnej , mimo różnic w jego sposobie uzyskania.

a – Stabilność parametru q (stopnia uporządkowania systemu, zawartości lewego piku na rys.1) świadczy o braku przybliżania się do chaosu podczas ewolucji – akceptowania permanentnych zmian funkcji nodów dających małe zmiany funkcjonowania (w zakresie lewego piku, dodatkowo wykluczono atraktory globalne mniejsze niż 7, a w M20 także mniejsze od już uzyskanego).

b – Średni czas pięciu najpóźniejszych eksplozji do chaosu (patrz też rys.6a,b) nie rośnie mimo ww. warunku na atraktory. W sieciach chaotycznych takie eksplozje (patrz rys.7) zdarzają się praktycznie do wyczerpania procesów jeszcze „niewybuchłych”.

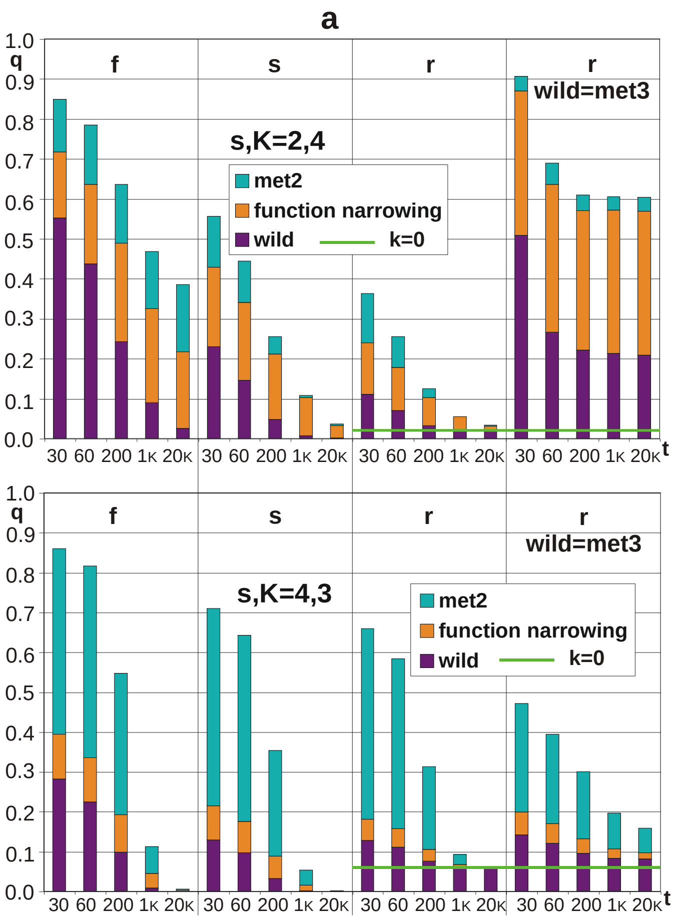
c – Średni rozmiar lodu i klastrów lokalnych. Ma to sens dla semimodularności, więc nie dla met6, gdzie prawie zawsze występuje jeden klaster lokalny obejmujący całą sieć (N=400). W met7e sieć sf wyraźnie ma specyficzne odstępstwo, większe dla modelu bez wymuszania małych atraktorów w semimodułach (fa), ale i ono stabilizuje się. Mechanizm tego odstępstwa nie został wyjaśniony (patrz też rys.1, szersze rozpoznanie w **(Gecow 2016)**).

d – Średnia liczba klastrów globalnych. W met7e też stabilizuje się od M7. W początkowym komplecie inicjacji (**J**) jeszcze bez kumulacji bywa nawet większa od liczby wygenerowanych semimodułów, co świadczy, że w ramach jednego semimodułu może powstać kilka tak zdefiniowanych klastrów, oraz o metodzie ich identyfikacji, która jest bardzo złożona i oparta na wielu przybliżeniach.

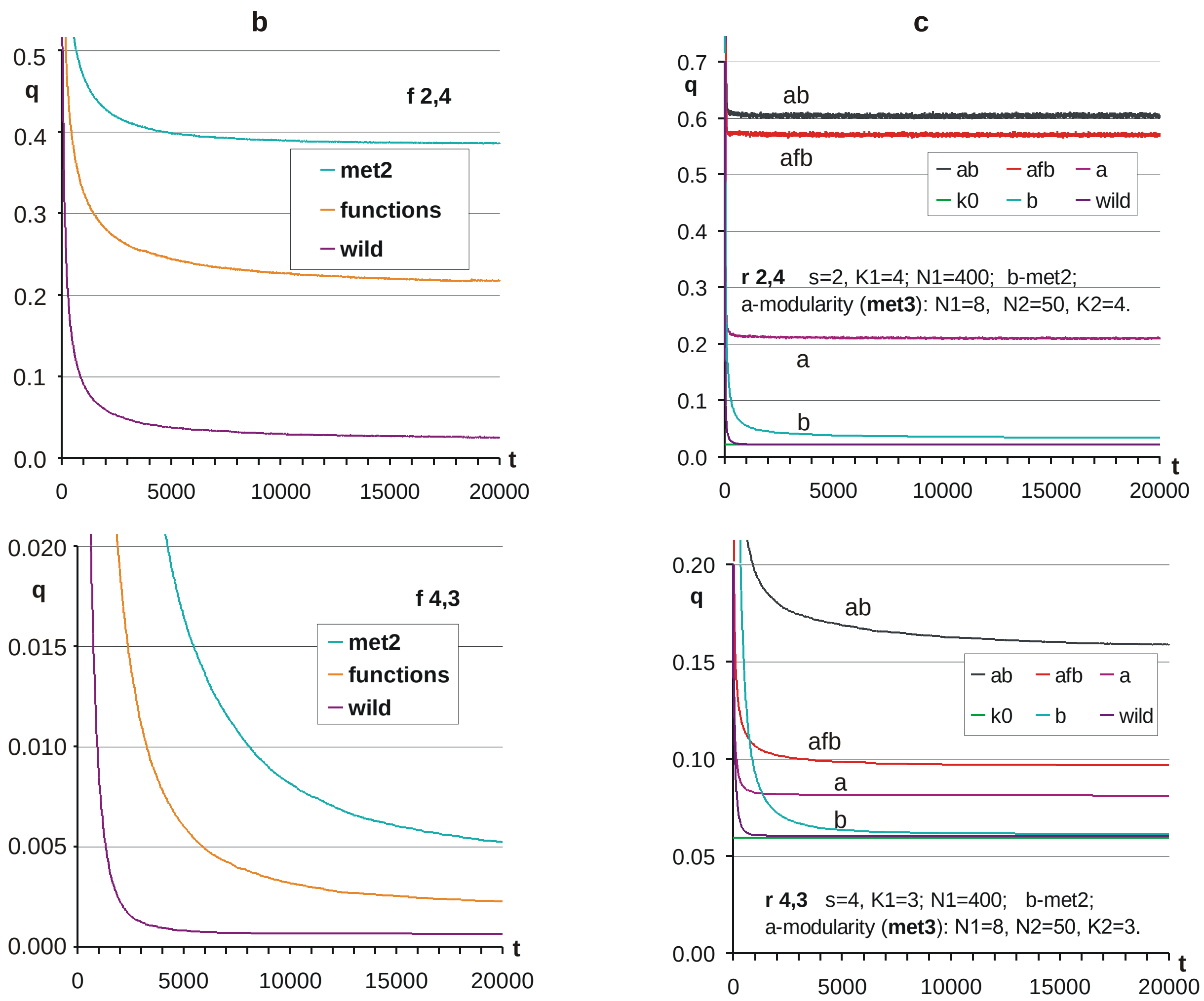
e – Średnia liczba klastrów lokalnych jest dobrze zdefiniowana. Widać tu początkową niewielką odmienność sieci fa.

Rys.3. Półchaos - frakcje przypadków uporządkowanych (q) i chaotycznych (1-q) w met4cd, 5, 6 i 7.
W ramach q wyodrębniono porządek wynikający z braku wyjść (k=0) w niektórych nodach sieci er.
Wszystkie przedstawione tu wyniki dotyczą jedynie skutków ograniczenia atraktora albo tylko globalnego (met6) albo atraktorów lokalnych poprzez semimodularność. Podobne zestawienie dla innych metod podwyższenia q (zwiększenie udziału regulacji i modularność) przedstawia rys.5d.
Dla met4 i met7bJ wyniki dotyczą sieci bezpośrednio po wygenerowaniu półchaosu, dla met7bX – po sprawdzeniu kompletu **J,** dodatkowo zaakceptowano jedną zmianę chaotyczną, co dało typowy chaos. X daje taki sam obraz jak w eksperymentach S,T,F, (patrz też rys.6, 7). Jak widać, w przypadku chaosu porządek q jest zbyt mały, by był widoczny na takim przedstawieniu, w półchaosie jest on jednak znaczny i widoczny. W przypadku pozostałych metod 5, 6 i 7e wynik pochodzi ze zsumowania wyników w M7, M13, M19 i M20, jak na rys.1, czyli z zakresu ustabilizowanego w ewolucji (patrz rys.2). Oprócz met4d (s,K=2,4) w pozostałych przypadkach s,K=4,3.

Dodatek

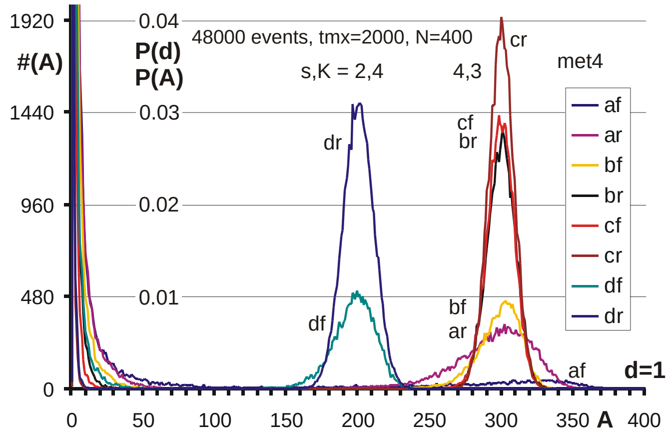


Rys.4. Frakcja uporządkowana (q) w funkcji czasu (t) po podniesieniu udziału ujemnych sprzężeń zwrotnych (met2) i w klasycznej modularności (met3).
Górny rząd - s,K=2,4 (sieć Boolowska),
dolny – s,K=4,3.
a – Dla wybranych chwil t udziały mechanizmów: wild – bez ingerencji met2; function narrowing jako ubocznego skutku metody i samego zwiększenia udziału ujemnych sprzężeń zwrotnych poprzez met2. Dla sieci er zaznaczono poziom q wynikający z udziału k=0 (nodów bez wyjść). W prawej kolumnie jako wild użyty jest system modularny uzyskany w met3, bliżej opisany w (**c**) jako krzywa a. Typ sieci sf,ss,er opisany jest drugą literą (jak na wszystkich rysunkach) odpowiednio – f,s,r. Jak widać, wyniki dla parametrów symulacji s,K=2,4 i 4,3 oraz typów sieci różnią się istotnie. Dla s,K=2,4 zwężenie funkcji ma największe znaczenie dla zwiększenia q, a dla s,K=4,3 znaczenie sprzężeń zwrotnych okazuje się zasadnicze. Dla małych t efekt zwiększenia q jest wyraźny. Z tych danych można podejrzewać osiągnięcie półchaosu dla sf 2,4 - w wyniku zwężenia funkcji i podniesienia udziału sprzężeń regulacyjnych, oraz dla złożenia modularności met3 z met2 z użyciem sieci er - dla 2,4 głównie w wyniku zwężenia funkcji, ale dla 4,3 w wyniku met2. W pozostałych 5-ciu przedstawianych przypadkach efekt praktycznie zanika już dla tmx=1000, użycie go przez obiekty żywe wymagałoby bardzo szybkiego rozmnażania w porównaniu z przekształceniami budowy i metabolizmem, co wydaje się nieosiągalne. Nie zbadano tu stabilności ewolucyjnej, którą włączono do definicji półchaosu w wyniku dalszych badań ograniczających podstawowe czynniki do krótkiego atraktora rys.1, 2, 3. Stopień wejścia w plateau lepiej można ocenić na wykresach **b** i **c**. Sieć ss daje wyniki zbliżone do sieci er, ale bez mylącego efektu k=0.



Na **b** widać że sf 4,3 nie osiąga plateau nawet dla t=20000, gdzie q jest już znikome, ale sf 2,4 ma już prawie ustabilizowany poziom q przy t=5000 i jest to poziom wysoki (porównaj rys.5d).
Na **c** przede wszystkim pokazany jest skutek modularności (met3) i złożenia jej z met2, dodano jednak wynik met2 dla sieci er, jak na b, pomijając jednak udział zwężenia funkcji dostatecznie przedstawiony na a. Widać, że system wild dla sieci er bardzo szybko schodzi do poziomu q wynikającego jedynie z k=0. Także krzywa b – wynik samej met2 szybko przybliża się do tego poziomu, co widać też na a. Modularność (krzywa a) daje wyraźne stabilne podniesienie q, a wspomożenie tego przez met2 (krzywa ab) podnosi q radykalnie, choć dla s,K=4,3 wydaje się wchodzić w plateau dopiero powyżej t=20000, a dla s,K=2,4 prawie cały duży i stabilny efekt met2 wynika z samego zwężenia funkcji.
Podczas badań met3 okazało się, że dostatecznie małych spontanicznych atraktorów można oczekiwać jedynie w bardzo małych modułach (np.: N1=8), tak małych, że rozważanie stanu chaosu traci w nich sens. Rozważanie chaosu w sieci modułów (N2=50 w przeprowadzonych eksperymentach) zostało odłożone.

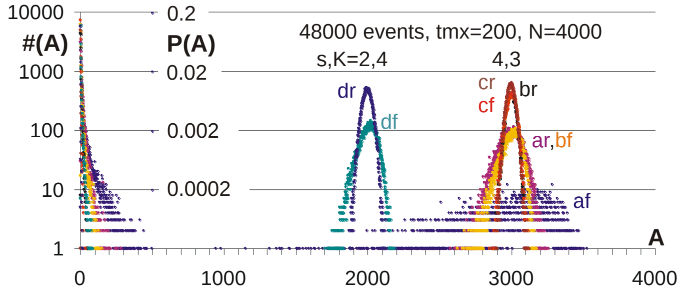
a



b

peak	af	ar	bf	br	cf	cr	df	dr
Left	43270	29258	32889	16851	15234	6922	31017	8345
Right	4730	18742	15111	31149	32766	41078	16983	39655

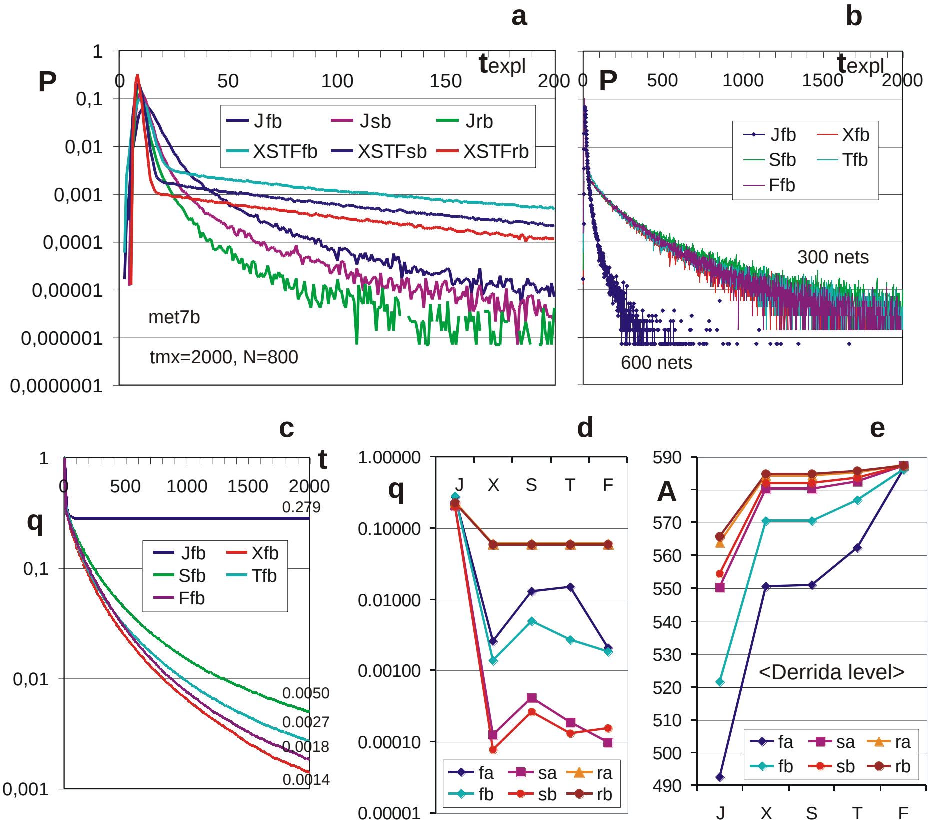
c



d

Rys.5. Zwiększenie regulacji czy inny czynnik – point attractor. Podstawowy wynik met4.
W met4, usuwając domniemaną przyczynę słabego wyniku met2, wychodzi się z systemu nie losowego, o skrajnie krótkim atraktorze – atraktorze punktowym: początkowo wszystkie stany mają wartość 0 i f (0) = 0. Badano kolejno modele a,b,c (s,K=4,3) i d (s,K=2,4) rozpoczynając od silnej regulacji i kończąc na braku regulacji w modelach c i d. Zadbano, by każdy sygnał miał jednakowe prawdopodobieństwo w funkcji każdego nodu.
Model a to ujemne sprzężenia zwrotne z dodatnim (1) i ujemnym (3) wychyleniem od stanu równowagi (0) w każdym z trzech sygnałów wejściowych, z możliwością wyjścia poza zakres homeostazy w obszar losowy (gdy wychylenie jest zbyt duże lub któryś z sygnałów wejściowych =2, to funkcja nodu jest losowa). Dokładny opis tej formuły jest zbyt złożony, by go tu przytaczać, jest dostępny w **(Gecow 2016)**.
Model b ma minimalną regulację: warunek atraktora punktowego f(0,0,0)=0 uzupełniono tylko warunkiem f(0,0,1)= f(0,1, 0)= f(1,0,0)=0, którego nie ma **model c**.
Model d dla sieci Boolowskiej ma tylko warunek f(0,0,0,0)=0.
Każdy z tych modeli symulowano dla trzech kombinacji N,tmx = 400,200; 400,2000; 4000,200 dla sieci sf oraz er tak, by zawsze liczba inicjacji wynosiła 48000 w serii. Próg małej zmiany ustalono dla N=400 na 100, a dla N=4000 na 800. Każda inicjacja z definicji met4 zachodzi dla stanu nodu=0 i stanu wejściowego (0,0,0), tylko więc model c może wykorzystać wszystkie 3 pozostałe wartości funkcji do inicjacji. Dla modelu a pozostaje tylko jedna wartość 2, dla b tylko dwie wartości: 2 i 3, które są nowymi stanami nodu bez obligatoryjnego wygaśnięcia damage u odbiorcy.

Na wykresach a i c przedstawiono liczby zliczeń #(A) zmian wynikowych o rozmiarze A (zmienionych stanów nodów w tmx). Pokazano też skalę dla P(A).
Dla tmx=2000 liczonych dla tych samych sieci co dla tmx=200, wyniki w tabeli dla tmx=200 (b) piku lewego różnią się jedynie dla af o 140 i df o 2. Wyniki na liniowym wykresie a (N=400) dla modeli c i d są też na rys.1 w skali log. Seria przedstawiona na c ma 10 razy mniej sieci, co dało piki znacznie węższe (w skali damage d zamiast A) niż na a. Pik prawy dla modeli c, b i a jest coraz mniejszy w wyniku coraz większej regulacji, co odbija się na diagramie d mniejszym udziałem chaosu. Miejsce piku prawego na a i c dobrze wyznaczone jest przez równowagę Derridy **(Gecow 2011, fig.5)** (inną dla s=2 i s=4), co jest cechą dojrzałego chaosu.
Diagram d jest uzupełniającym rys.3 zestawieniem frakcji przypadków uporządkowanych (q) i chaotycznych (1-q) dla mniej istotnych eksperymentów omawianych w artykule. O ile w rys.3 zestawiono tylko badanie wpływu małego atraktora, to tu – wpływu zwiększenia udziału regulacji w met2 (tylko sf 2,4 można uznać w met2 za wejście w półchaos, patrz rys.4a,b); modularności w met3; złożenia modularności i met2 (rys.4); złożenia atraktora punktowego i regulacji w met4ab i met5b. Z tego jedynie met5b sprawdzało stabilność ewolucyjną włączoną do definicji półchaosu. Jak widać, złożenia są skuteczniejsze od każdej z metod osobno i należy oczekiwać takiej strategii w ewolucji biologicznej. Przypadek af pokazuje, że taką drogą ewolucja może doprowadzić do stanu gdzie system półchaotyczny może wydawać się uporządkowanym. Ewolucja met5b zmniejszyła q względem met4b gdy met5 (rys.3) zadziałała w odwrotnym kierunku względem met4c (nie są to pewne tendencje), jednak w oczekiwanej strategii ewolucji biologicznej chodzi o jej kreatywny aspekt, nie modelowany w przedstawianych symulacjach, zbyt uproszczonych do takiego zadania.



Rys.6. Różnica między półchaosem i chaosem w badaniach met7a i b. Badania met7a i b (bez ewolucji) miały za zadanie głębiej i dokładniej wykazać odrębność uzyskanego stanu od chaosu. Zastosowano tu względem badań ewolucji podwyższone N=800 i tmx=2000. Wariant b, ponad warunki stosowane w wariancie a, ma wymuszanie małych atraktorów w semimodułach oraz ograniczenia: atraktor lokalny ≤100 a globalny >200, przesunięcie do najpóźniej zaczynającego się atraktora lokalnego<500. Eksperyment J - bezpośrednio po wygenerowaniu stanu semimodularności, na 600 sieciach i po wykonaniu J dodatkowe eksperymenty X,S,T,F na 300 sieciach. X - po akceptacji jednej zmiany chaotycznej, S – po zmianie stanów na losowe, T – po przesunięciu funkcji na inne nody i F po losowym wygenerowaniu funkcji. Pomimo braku możliwości sensownego wyznaczenia błędów pomiarowych, powtarzalność wyników i radykalna odmienność zachowania eksperymentu J od pozostałych jednoznacznie świadczy o uzyskaniu stanu silnie odmiennego od chaosu.

a,b – Prawdopodobieństwo czasu eksplozji do chaosu dla met7b. Ten aspekt widoczny jest na przedstawieniach A(t) pokazanych na rys.7 i rys.8 gdzie późne eksplozje upodobniają obraz do chaotycznego i podnoszą niepewność odpowiedniego wybrania tmx.

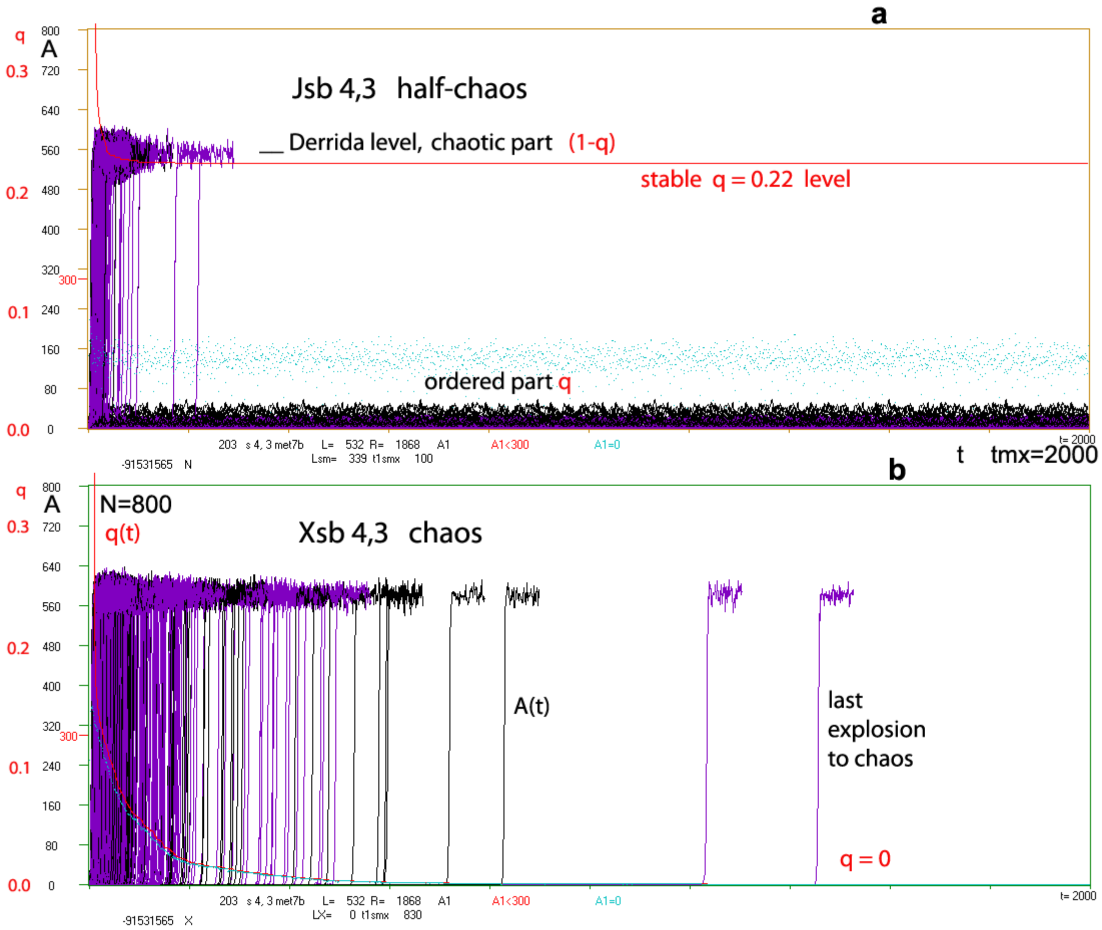
a – J oraz X dla sieci sf, ss i er. Dla J prawdopodobieństwo gładko maleje ze wzrostem czasu, dla X następuje załamanie w okolicy t=22 i przejście do znacznie wolniejszego spadku związanego z obecnością eksplozji chaotycznych po wtórnych inicjacjach. Brak tego załamania dla J wynika z zakończenia pierwszego obrotu krótkiego atraktora lokalnego. Poza tą chwilą brak jest eksplozji w wyniku wtórnych inicjacji wewnątrz danego semimodułu, które znalazłyby się w nowych okolicznościach. Mechanizm ten jest przybliżeniem, gdyż inicjacje odbywają się też w lodowych ściankach pomiędzy semimodułami, ale tam damage rozchodzi się trudniej, a po wniknięciu do semimodułu już podlega wskazanemu mechanizmowi. Widać tu wyraźną różnicę w zachowaniu badanych typów sieci – sf ma późniejsze eksplozje, jest w tym aspekcie najbardziej zbliżona do chaosu, er ma najmniej późnych eksplozji.

b – J,X,S,T,F dla sieci sf. Oprócz półchaotycznego J pozostałe chaotyczne X,S,T,F praktycznie pokrywają się, X nieco wystaje z dołu a S i T z góry. W półchaosie zdarzają się także bardzo późne eksplozje, ale są one rzadkie. Są to zwykle przypadki szczególnie dużych atraktorów globalnych, nieraz w ogóle nie znalezionych w zakresie tmx, ponadto, większość inicjacji zachodzi w lodzie pomiędzy semimodułami, gdzie damage rośnie zwykle powoli.

c – Średnie q(t) dla fb (sieć sf w met7b) w eksperymentach J,X,S,T,F. Półchaos J jest wyraźnie odmienny, szybko stabilizuje q, natomiast X,S,T,F spadają do tmx i prawdopodobnie dalej, oraz trochę się różnią. W tym pomiarze można by uznać tę różnicę za mieszczącą się w błędzie pomiarowym, który praktycznie nie da się wyznaczyć z uwagi na wielość czynników, ale na **d** przynajmniej S i T wydają się systematycznie różnić od X i F. Przeglądając przedstawienia przebiegów A(t) jak na rys.7b zauważa się podobieństwo w ramach X, S i F, ale w przypadku T bywają częste odstępstwa różnego charakteru, szczególnie dla fa, gdzie wynik silnie zaburzony jest przez kilka szczególnych przypadków.

d – Średnie q dla wszystkich badanych typów sieci (sf,ss,er) i modeli (a,b) we wszystkich pięciu eksperymentach J,X,S,T,F. Sieć er w przypadkach chaotycznych ukrywa różnice przez występowanie k=0. Patrz też dyskusja różnic w opisie c wyżej.

e – Średnie położenie piku prawego dla chaotycznej równowagi Derridy. Szczególnie duże odstępstwo dla Jfa i Jfb pokazano dokładniej na rys.1 i rys.2c. X,S i T zachowują tu charakter tego odstępstwa, oraz statystyczne odstępstwa od losowości funkcji, co sugeruje takie źródło widocznych tu różnic i określa wielkość wpływu nielosowości funkcji na wyniki. X i S zachowują też korelacje nielosowości funkcji z miejscem nodu w strukturze sieci, co zrywa T.



Rys.7. Półchaos i chaos w przedstawieniu A(t) przebiegu symulacji kompletu małych permanentnych zaburzeń na przykładzie met7b J oraz X dla sieci ss.

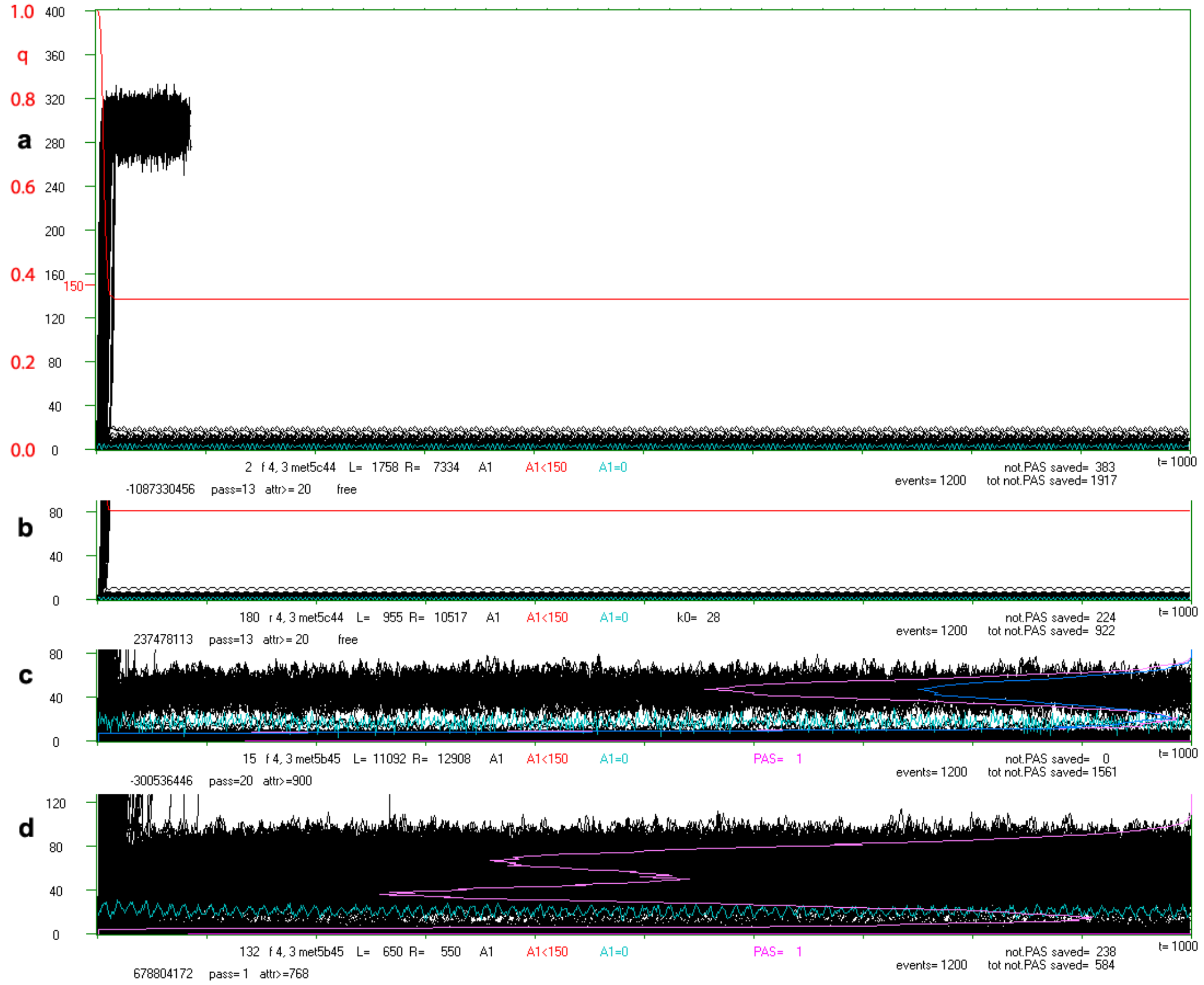
Jest to przedstawienie na pikselach ekranu obserwowane dynamicznie podczas symulacji. Tu także należy oglądać szczegóły na dostatecznym powiększeniu. W met7b stosowano N=800, tmx=2000, na każdej osi jeden piksel obrazuje wiec 2 wartości – prostokąt ma wymiar 400*1000 pikseli. Na rys rys.8, do którego ten należy traktować jako opis formy, użyto N=400 i tmx=1000, więc tam piksel odpowiada jednostce na osiach. Oś pionowa oryginalnie wyskalowana jest w A – liczbie zmienionych względem wzorca stanów nodów, oś pozioma w liczbie kroków t symulacji działania sieci. Po każdej inicjacji małą zmianą permanentną stan A(t) rysowany był na ekranie linią ciągłą po każdym kroku obliczania. Dla inicjacji nodu w semimodule stosowano kolor czarny, a dla inicjacji w ściankach pomiędzy semimodułami – kolor fioletowy. W met5 pokazanym na rys.8 nie znane było to rozróżnienie i zawsze używano kolor czarny. Dla optymalizacji symulacji przerywano liczenie po 70 krokach od eksplozji do chaosu (przejścia przez próg tu =300, zaznaczony z lewej na czerwono), skąd proces już nie miał szans powrócić.

Jak widać, przejście do chaosu w okolice równowagi Derridy nie jest powolne, tylko nagłe, w kilku do kilkunastu krokach, w których A zwiększa się radykalnie, dlatego – „eksplozja". Po wychyleniu A od malej wartości do powiedzmy – A=80 już nie spotyka się powrotów (co sprawdzono bez optymalizacji, patrz **(Gecow 2016)**). Dodatkowo, po zakończeniu kompletu, do rysunku dodawano wykres q(t) – czerwona krzywa. W met7 jest ona pierwotnie wyskalowana zgodnie z A jako liczba inicjacji, które nie przekroczyły progu=300, a inicjacji jest 3N=2400. W met5 na rys.8 takie q(t) jest podzielone przez liczbę inicjacji na nod, czyli 3, tak że q=1 dla A=N. Czerwony opis z lewej został dodany dla czytelności i tu q(t) jest już udziałem procesów, które do chwili t nie przeszły przez próg.

a – Półchaos, eksperyment J dla sieci ss modelu b. Takich symulacji było po 600 dla każdego typu sieci z sf,ss,er i modelu a i b met7. Czerwona krzywa q(t) stabilizuje się szybko na wysokim poziomie q=0.22. W dolnej części wykresu widać wiele trajektorii (jest ich tam L=532 z 2400), które od t nieco powyżej 200 już nie eksplodują. Do chaosu – równowagi Derridy, przeszło więc R=1868 procesów już na samym początku.

b – Chaos na przykładzie eksperymentu X wykonanego bezpośrednio po pomiarze J przedstawionym wyżej na a. Takich symulacji było po 300 dla każdego typu sieci z sf,ss,er i modelu a i b met7 oraz dla każdego z eksperymentów X,S,T,F. Tu q(t) spada systematycznie aż do wyczerpania procesów jeszcze nie 'wybuchłych'. Na końcu jest ich dokładnie LX=0, czyli q=0.

Niebieskie punkty opisują liczbę procesów które w danej chwili mają A=0, czyli damage wygasły, jednak dla X wtórne inicjacje doprowadzają do ich eksplozji.



Rys.8. Symulacje met5 (kumulacji zmian) w przedstawieniu A(t).

Poza czerwonym opisem q z lewej każdy rysunek powstawał dynamicznie na ekranie podczas symulacji pełnego kompletu inicjacji bez blokowania cofania. Jest z dokładnością do piksela. Opis elementów przedstawienia w rys.7.

a – Pełny, typowy obraz dla M13 met5c (na innych rysunkach – met5, model c z met4), sieć sf. Widać niemal natychmiastowe zakończenie eksplozji do chaosu. U góry stan chaosu w równowadze Derridy (krótki z powodu optymalizacji przerywającej liczenie po 70 krokach, jak na rys.7), a na dole powtarzający się wzór zgodnie z zaznaczonym na górnej ramce atraktorem globalnym (stanem sieci wzorcowej jak w tmx przed pierwszą inicjacją z kompletu). Tu L i R pod dolną ramką są sumą od początku symulacji danej sieci. W tym komplecie skumulowano 383 zmiany z 1200 próbowanych ale zaakceptowanych wyznaczających q (nie przekraczających progu =150) było nieco więcej (z atraktorem globalnym<7).

b – Typowy obraz symulacji sieci er w met5c. Górną cześć jako niemal identyczną z a obcięto. Poziom q(t) jest niżej, pas przy dolnej krawędzi wyraźnie cieńszy, czas najpóźniejszych eksplozji do chaosu krótszy.

c,d – Dolna część obrazu dla met5b (z minimalną regulacją). Tu poziom q(t) był znacznie wyżej niż na a. W modelu b szerokość dolnego pasa jest większa z uwagi na możliwość regulacji. Symulacje nieco innego modelu niż na rys.5d – tu bez blokowania cofania, ale z warunkiem niemalenia atraktora globalnego i kumulacji zmian nie mniejszych niż A=3, przesunięcie początku =2 a nie 50. W tych symulacjach badano rozkład wielkości A<150 na odcinku od t=600 do tmx dla danego kompletu inicjacji (fioletowa krzywa na prawej ramce) i dla sumy kompletów w ostatnim komplecie M20 (niebieska krzywa na c). Jest to jeden z kilku sposobów poszukiwania dowodu na istnienie semimodułów. Jak widać, w obu (c,d) pokazanych przypadkach na rozkładzie tym są wyraźne piki odpowiadające za pobudzenie jednego (na c M20) lub dwóch (na d M1) hipotetycznych semimodułów. Pod zakresem tych pików jest wyraźny prześwit w minimum rozkładu. Interpretacja tych pików może być różna, nie są dowodem na istnienie semimodułów, które wykazano później obserwując powtarzanie się stanów nodów, ale są silną przesłanką. Poziom q jest tu wysoki: na c q= 0.46 a na d q=0.55. Na c atraktor nie został znaleziony już na początku kompletu (attr>=900), i ponieważ nie mógł maleć, nie skumulowano ani jednej zmiany (not.PAS saved=0), nie znaczy to jednak, że brak jest tu przypadków akceptowalnych (A<150), jest ich 220, na co wskazuje q i szeroki czarny pas poniżej A=150.

Bibliografia

Aldana, M., Coppersmith, S., Kadanoff, L. P., Boolean Dynamics with Random Couplings. in *Perspectives and Problems in Nonlinear Science*, Applied Mathematical Sciences Series, ed. E. Kaplan, J. E. Marsden, K. R. Sreenivasan (Springer-Verleg, Berlin) (**2003**).

Derrida, B., Pomeau, Y. Random Networks of Automata: A Simple Annealed Approximation. Europhys. Lett., 1(2), 45–49. (**1986**).

Gecow, A. Emergence of Growth and Structural Tendencies During Adaptive Evolution of System. In From System Complexity to Emergent Properties. M.A. Aziz-Alaoui & Cyrille Bertelle (eds), Springer, Understanding Complex Systems Series, 211-241 (**2009**).

Gecow, A. Emergence of Matured Chaos During Network Growth, Place for Adaptive Evolution and More of Equally Probable Signal Variants as an Alternative to Bias p. In: Chaotic Systems, E.Tlelo-Cuautle (ed.), ISBN: 978-953-307-564-8, 280-310 http://www.intechopen.com (**2011**).

Gecow, A. Report of simulation investigations, a base of statement that life evolves in the half-chaos http://vixra.org/abs/1603.0220 (**2016**) Tam także wersja polska: Raport z badań symulacyjnych, podstawa stwierdzenia, że życie ewoluuje w półchaosie.

Iguchi, K., Kinoshita, S.-i., Yamada, H. Boolean dynamics of Kauffman models with a scale-free network. J. Theor. Biol. 247, 138–151 (**2007**).

Kauffman, S. A., Requirements for Evolvability in Complex Systems - Orderly Dynamics and Frozen Components, ***Physica D*** 42, 135–152. **(1990)**

Kauffman, S. A. The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution.(Oxford University Press New York) (**1993**).

Kauffman, S.A. .*At Home in the Universe.* Oxford University Press USA **(1996).**

Kauffman, S.A., Peterson, C., Samuelsson, B., Troein, C. Genetic networks with canalyzing Boolean rules are always stable. PNAS vol. 101 no.49, 17102-17107 (**2004**).

Luque, B., Ballesteros, F.J., Random walk networks. Physica A 342 207–213 (**2004**).

Nghe, P., Hordijk, W., Kauffman, S. A., Walker, S. I., Schmidt, F. J., Kemble, H., Yeates, J. A. M., Lehman, N. *Prebiotic network evolution: Six key parameters*. *Molecular BioSystems*, *11*(12), 3206-3217. DOI: 10.1039/c5mb00593k (**2015**).

Serra, R., Villani, M., Semeria, A. Genetic network models and statistical properties of gene expression data in knock-out experiments. J. Theor. Biol. 227, p.149-157 (**2004**).

Serra, R., Villani, M., Graudenzi, A., Kauffman, S. A. Why a simple model of genetic regulatory networks describes the distribution of avalanches in gene expression data. J.Theor.Biol. **246** 449-460 (**2007**).

Shmulevich, I., Kauffman, S. A., Aldana, M., Eukaryotic cells are dynamically ordered or critical but not chaotic. PNAS 102 (38), 13439–13444 (**2005**).

Sole R.V., Luque, B., Kauffman S. Phase transitions in random networks with multiple states. Technical Report 00-02-011, Santa Fe Institute (**2000**).

Spis treści