

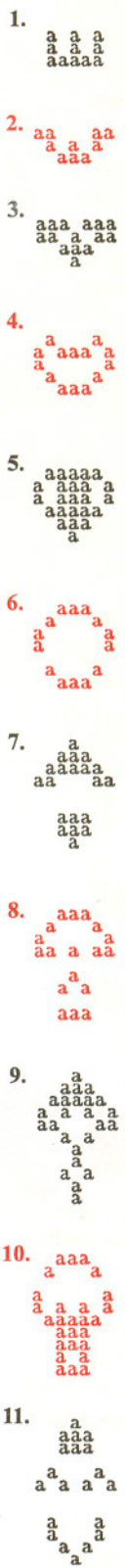
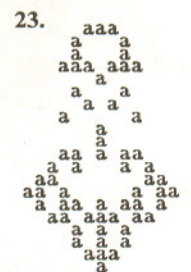
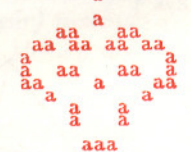
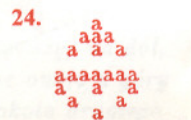
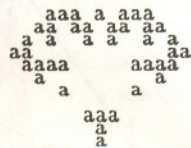
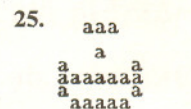
Samorganizowane stany krytyczne: od badań sterty piasku do modeli ewolucji

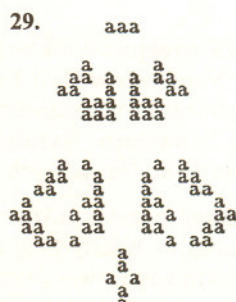
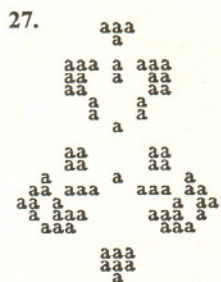
Lech SZYMANOWSKI

Samorganizowana krytyczność oznacza dążenie dużych układów dynamicznych do ich samoczynnej ewolucji do stanu krytycznego, w toku której występują fluktuacje o rozmiarach porównywalnych ze wszystkimi skalami wielkości charakteryzującymi dany układ. Określenie *samorganizowana* oznacza, że układ ewoluuje do stanu krytycznego niezależnie od warunków początkowych tej ewolucji, zadanych przez zaburzenie stanu krytycznego. Samorganizowane stany krytyczne (SSK) są czasami określane jako „stany na granicy chaosu”. Powstaje więc pytanie: gdzie występują SSK?

Najczęściej przytaczanym przykładem, w którym występuje SSK, jest budowa sterty piasku. Układ ten jest przedmiotem wielu modeli teoretycznych. Jest on również przedmiotem doświadczenia, które chciałbym krótko omówić. Na talerzu o danym promieniu (rzędu kilku centymetrów) buduje się stertę piasku dodając do układu po jednym ziarenku. Po osiągnięciu masy krytycznej masa piasku dalej nie wzrasta, lecz zaczyna fluktuować w następstwie występowania lawin o różnej wielkości. Przedmiotem badań są właśnie te fluktuacje masy sterty piasku. Struktura tych fluktuacji ma charakter fraktalny, z okresami oscylacji zmian masy sterty piasku (mierzonymi liczbą ziaren dodanych do układu), zmieniającymi się od jednego do tysiąca ziaren. Wielkość lawin zaobserwowanych w doświadczeniu jest również bardzo różnorodna i zmienia się od jednego do kilkuset ziaren. Prawdopodobieństwo wystąpienia lawiny o danej masie maleje wraz z jej wzrostem tak, jak funkcja potęgowa z pewnym wykładnikiem krytycznym. Takie zachowanie jest charakterystyczne dla układu będącego w stanie krytycznym. Należy je przeciwstawić narastaniu wykładniczemu rozkładu prawdopodobieństwa (układ w stanie chaotycznym) lub rozkładowi z wyraźnym maksimum dla jakiejś szczególnej wielkości masy.

Innym przykładem, w którym występuje SSK, jest „Gra życia”. Rozgrywa się ona na płaskiej sieci, której węzłom przypisane są: liczba 1, symbolizująca istnienie w nich życia, lub liczba 0, symbolizująca pustkę (brak życia). Reguły gry zadaje się lokalnie. I tak, w danym przykładzie, życie zaniknie, gdy w sąsiednich węzłach nie ma istoty żywej lub jest tylko jedna (odsłonięcie). Życie zaniknie również wtedy, gdy w sąsiednich węzłach są więcej niż trzy istoty żywe (zatłoczenie). Z kolei życie powstanie, gdy obok jest dokładnie trzech sąsiadów. „Grę życia” rozpoczyna się przypisaniem węzłom sieci w sposób przypadkowy liczb 0 lub 1 (na tej i trzech następnym stronach odbywa się jedna gra; jako 1 jest a, natomiast jako 0 nic nie ma). Po tym następuje ewolucja, która przebiega według powyższych reguł. Po dłuższym okresie przejściowym układ znajdzie się w stanie stacjonarnym, charakteryzującym się występowaniem prostych cykli złożonych z węzłów, w których istnieje życie. Ten układ stacjonarny podlega następnie zaburzeniu, polegającemu na przypisaniu liczby 1 pustemu węzłowi sieci, wybranemu w sposób przypadkowy. Po zakończeniu ewolucji układu, wywołanej tym zaburzeniem, układ znowu zaburza się. Po wielu zaburzeniach ewolucja układu do stanu stacjonarnego nie zależy już od pierwotnego przypisania węzłom sieci liczb 0 lub 1. Przedmiotem badań są ewolucje układu będące następstwem zaburzeń stanu stacjonarnego. Jedną z charakterystyk tej ewolucji jest aktywność układu, zdefiniowana jako całkowita liczba „urodzin” i „zgonów” mających miejsce od zaburzenia układu





do czasu osiągnięcia przez niego stanu stacjonarnego. Rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia ewolucji o zadanej aktywności ma postać charakterystyczną dla układu znajdującego się w stanie krytycznym. Prawdopodobieństwo to maleje wraz ze wzrostem aktywności tak, jak funkcja potęgowa z pewnym wykładnikiem krytycznym. Taką samą postać ma rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia ewolucji o zadanym czasie jej trwania, który również maleje potęgowo wraz ze wzrostem czasu trwania ewolucji. Obie te cechy świadczą, że życie i śmierć w „Grze życia” są skorelowane w czasie i przestrzeni. Obserwowana aktywność zmienia się o kilka rzędów wielkości. To samo dotyczy obserwowanych czasów trwania ewolucji. Wszystko to świadczy o tym, że układ znajduje się w SSK.

Ostatnio wysunięto przypuszczenie, że przy opisie ewolucji biologicznej mogą mieć zastosowanie SSK. Wiąże się to z pytaniem dotyczącym sposobu, w jaki przebiega ewolucja biologiczna: czy jest ona jednostajna, czy też przebiega w sposób niejednostajny, a okresy wielkiej aktywności są poprzeplatane okresami małej aktywności? Ostatnie dane geologiczne dotyczące przeżywalności wielu gatunków zwierząt morskich w ciągu minionych 600 mln lat sugerują, że proces wymierania tych zwierząt przebiegał bardzo niejednorodnie.

Model Baka-Sneppena (BS) jest teoretycznym modelem ewolucji biologicznej, w którym wykorzystano SSK. Oczywiście, jest on modelem zbyt uproszczonym, aby uznać go za realistyczny. Niemniej pewne jego własności mogą odzwierciedlać cechy ewolucji rzeczywistej. W modelu BS każdemu gatunkowi przypisany jest punkt na sieci jednowymiarowej. Miarą skłonności gatunku do mutacji jest wysokość bariery, która w modelu przyjmuje wartości z przedziału (0,1). Im bariera przypisana gatunkowi jest mniejsza, tym łatwiej podlega on mutacji. Jest przy tym rzeczą bardzo ważną, że mutacja danego gatunku ma wpływ na mutację innych gatunków. W praktyce ewolucja układu przebiega według poniższych zasad. Po przypisaniu w sposób przypadkowy punktom reprezentującym gatunki wysokości ich barier szuka się węzła z najmniejszą barierą, którą zmienia się w sposób przypadkowy, jednocześnie zmieniając w podobny sposób wysokości barier w sąsiednich węzłach sieci. Po okresie przejściowym, w którym mutacje są nieskorelowane, układ znajdzie się w stanie stacjonarnym, który jest obiektem badań. W stanie stacjonarnym najbardziej prawdopodobne są przypadki, w których kolejnym mutacjom podlegają gatunki w sąsiednich węzłach, czyli mutacje są skorelowane. Śledząc ewolucję wybranego gatunku w czasie (mierzonym całkowitą liczbą mutacji zachodzących w układzie) widać, że mutacje tego gatunku zachodzą w bardzo niejednorodny sposób: okresy spokoju są poprzeplatane okresami dużej skłonności do mutacji. W tym sensie model BS odtwarza pewne cechy ewolucji obserwowane w badaniach geologicznych.

Ewolucja w modelu BS dąży do zwiększenia wysokości barier przypisanych poszczególnym gatunkom. W stanie stacjonarnym wysokość większości barier jest większa niż pewna wartość progowa i ich rozkład powyżej tej wartości jest jednorodny. Warto to przeciwstawić modelowi ewolucji bez oddziaływania na sąsiadów, w którym ewolucja ulega zakończeniu po osiągnięciu przez wszystkie gatunki barier o wysokości jednakowej i równej 1. Ciekawe wyniki w modelu BS dotyczą wielkości lawin, zdefiniowanych jako liczba kolejnych mutacji z barierami mniejszymi od zadanej wartości progowej. Rozkład wielkości tych lawin opisuje funkcja potęgowa, która maleje wraz ze wzrostem wielkości lawiny w sposób określony przez wartość wykładnika krytycznego. Ponadto wielkości lawin, które występują w układzie, różnią się między sobą o wiele rzędów wielkości, od bardzo małych do przybierających formę katastrof. Stanowi to ilustrację podstawowej własności SSK, jaką jest samoczynne występowanie w nim zjawisk o różnych stopniach natężenia, bez konieczności odwoływania się do wpływu czynnika zewnętrznego.

