

ZŁOŻONOŚĆ (complexity)

Pojęcie niezwykle trudne do jednoznacznego sprecyzowania. Najogólniej rzecz biorąc, oznacza coś bardzo skomplikowanego albo trudnego do zrozumienia. Ze zjawiskiem złożoności spotykamy się nie tylko na gruncie nauk przyrodniczych, ale także w chemii, biologii, układach technicznych czy też społecznych i ekonomicznych. Skale występowania tego zjawiska są uniwersalne, począwszy od skal mikroświata do skal kosmologicznych. Często jako przykłady zjawisk tego typu przywoływane są zjawiska pogodowe ze względu na ich deterministyczny charakter oraz jednoczesną nieprzewidywalność, procesy turbulentne w przepływach cieczy i gazów ale także: ruch uliczny, rozprzestrzenianie się pożarów, zachowanie giełdy i innych instytucji ekonomicznych, procesy zachodzące w układach biologicznych i chemicznych, w epidemiologii czy ekologii czy też pewne zachowania w układach społecznych, lingwistyce, etc. Bardzo charakterystyczną własnością złożonych obiektów, pojawiających się w naukach społecznych czy ekonomicznych, jest występowanie oddziaływań pomiędzy indywiduami (agents).

Ludzki umysł jest już sam z siebie uważany za układ złożony; a co dopiero zbiorowość wzajemnie oddziałujących umysłów. Nowe osiągnięcia w dziedzinie badań w naukach przyrodniczych w ostatnich latach doprowadziły do wyłonienia się nowej dziedziny badawczej – złożoności. Dziedzina ta leży gdzieś na przecięciu matematyki, informatyki oraz fizyki i bazuje na pewnych analogiach w zachowaniach cząstek, atomów, molekuł, żywych komórek, mózgów, organizmów ludzi, społeczeństw, ekosystemów etc. Wszystkie te obszary badań łączy wspólna metodologia prowadzonych badań, co oznacza, że podobne metody badawcze mogą być aplikowane do często bardzo odległych dziedzin. Reguły rządzące zachowaniami ludzi w bliskich związkach jak miłość, przyjaźń, Internetem, systemem kulturowym czy też zachowaniem ekosystemów [Nowak i inni 2010], są w pewnym sensie uniwersalne, i stąd poszukujemy ogólnych reguł rządzących zachowaniami układów złożonych, abstrahując już od konkretnych sytuacji i kontekstu ich pojawienia się, które konstytuują nową dziedzinę badawczą-złożoność. Mamy więc do czynienia z przypadkiem, że dziedzina badawcza próbuje zyskać swoją autonomię, zaznaczając interdyscyplinarny charakter stosowanych metod adekwatnych do opisu zjawisk.

Za inny przykład „emergencji” tego typu nowej dziedziny badawczej może posłużyć teoria chaosu deterministycznego, która dzisiaj stała się autonomiczną dziedziną badawczą, będącą de facto zbiorem metod badawczych dedykowanych do analizy fenomenu chaosu deterministycznego. Teoria chaosu deterministycznego odkrywa pewne uniwersalne zachowania, które nazywa drogą do chaosu albo scenariuszem przejścia od regularnego do chaotycznego zachowania. Teoria ta podejmuje problem tzw. złożoności dynamicznej układów, pojawiający się w układach

deterministycznych. Zachowanie układu jest losowe, chociaż sam układ podlega deterministycznym regułom. Źródłem utraty własności prognozowalności jest wewnętrzna własność układu, a nie nadmierna jego komplikacja czy też zewnętrzne szумы (jak np. w zagadnieniu N-ciał, gdzie ich liczba jest duża), czy też jego niepełna określoność (brak pełnej informacji o samym układzie). Element probabilistyczny w zachowaniu układu jest konsekwencją niestabilności układu ze względu na małe zmiany warunków początkowych.

Rozważmy przykładowo regułę deterministyczną określoną na przedziale otwartym $(0,1)$: weź liczbę z tego przedziału następnie pomnóż przez 2 i odrzuć jej część całkowitą. Taka reguła będzie przyporządkowywała punktom odcinka punkty tego samego odcinka. Jest to pewien układ z deterministyczną regułą, w którym występuje własność niestabilności ze względu na małe zmiany warunków początkowych. Ponieważ te znamy ze skończoną dokładnością określoną, powiedzmy przez pomiar, który zawsze będzie obarczony błędem, to w realnych nieliniowych układach zjawisko to jest typowe. Mały błąd w określeniu warunków początkowych dla takich układów może spowodować jego amplifikację w trakcie ewolucji ze względu na nieliniowość. W konsekwencji tego, że sam układ posiada własność nadwrażliwej czułości ze względu na małe zmiany tych warunków początkowych co spowoduje, że układ deterministyczny będzie zachowywać się w sposób losowy. Koronnym świadkiem tego typu zachowania jest zachowanie się trajektorii w tzw. ograniczonym zagadnieniu trzech ciał – małe punktowe ciało w zewnętrznym polu grawitacyjnym dwóch mas [zob. Tempczyk 1998, Szydłowski 1994].

Widzimy więc, że układy ze złożonością dynamiczną nie muszą być skomplikowane z natury a zjawisko złożoności dynamicznej pojawi się już w układach niskowymiarowych (przestrzeń stanów układu jest 3 lub więcej).

Myśląc o układach złożonych, mamy na uwadze głównie takie układy, dla których tak wewnętrzna struktura układu, jak i wzajemne oddziaływanie są skomplikowane i mogą się zmieniać w czasie. Rozróżnia się trzy zasadnicze typy układów złożonych: izolowane (bez oddziaływania z otoczeniem), zamknięte (możliwa jest wymiana materii ale nie energii czy też informacji), otwarte (dopuszcza się możliwość materii, energii oraz informacji). Na ogół układy złożone są układami otwartymi, w których mogą zachodzić procesy nieodwracalne. Typowe układy złożone są układami dynamicznymi. Naturalnym środowiskiem ich opisu jest przestrzeń fazowa – przestrzeń wszystkich możliwych stanów układu dla dowolnej chwili czasu. W przestrzeni fazowej ewolucja układu jest reprezentowana przez krzywe w przestrzeni fazowej, tzw. krzywe fazowe. Dynamika układu w przestrzeni fazowej może być bardzo skomplikowana i trudna do opisu. Sama przestrzeń fazowa posiada pewne struktury (np. fraktalne) pomimo że opisuje układ chaotyczny [Biesiada, 1994].

Widzimy więc, że samo zjawisko złożoności jest niezwykle różnorodne i z trudem poddaje się operacjonalizacji.

W dalszej części możemy sobie wyobrażać układ złożony jako pewien układ otwarty, naturalny bądź sztuczny, o dużej komplikacji jego formy (struktury) albo też zachowania. Z nim nierozzerwalnie powiązane są zjawiska transportu informacji, zmiany struktury, samoorganizacja, itp. Pamiętajmy jednak, że pojęcie złożoności dynamicznej może wystąpić już w zachowaniu niezwykle prostych układów. W tym wypadku pozostaje ona wewnętrzną własnością samego układu.

Pomimo faktu, że istnieje takie niezwykle bogactwo możliwych wewnętrznych struktur i zachowań, złożoność nie jest postrzegana wyłącznie jako właściwość związana ze zjawiskiem albo układem, ale raczej jako subiektywna cecha odzwierciedlająca relacje między obserwatorem/badaczem i układem [Sobczyk 2006]. Jest bowiem miarą trudności badacza związanych z rozpoznaniem układu [tamże].

Gdyby chcieć określić status metodologiczno – poznawczy teorii układów złożonych, to powiedzielibyśmy, że posługuje się metodami matematycznymi i numerycznymi (symulacje numeryczne) oraz analogią wyniesioną z badań różnorodnych układów z wielu dziedzin. Jej przedmiot badań jest wyabstrahowany z tego, do jakiej dziedziny badawczej należy, ponieważ interesują nas uniwersalne zachowania układów złożonych. W tym sensie teoria układów złożonych jest częścią ogólnej teorii modelowania zjawisk (*science modelling*). Za wcześnie jest stwierdzić że mamy do czynienia już z nauką o złożoności.

W tym momencie rysuje się analogia statusu metodologicznego tej problematyki badawczej do problematyki teorii informacji dającej podstawy rozumienia abstrakcyjnego pojęcia informacji w terminach entropii. Sobczyk [tamże, s.56] zauważa, że w przypadku układu złożonego analogiczną rolę do pojęcia entropii może odegrać entropia informacyjna ponieważ określa ona ilość informacji „utkwionej” w układzie, którą trzeba wydobyć. (np. przez pomiary ,obserwacje) aby rozpoznać jego możliwe stany (przestrzeń fazową). Sobczyk [tamże, s.57] zastanawia się, jakie powinno być najwłaściwsze podejście do naukowej analizy układów złożonych. Zauważa, że najbardziej efektywnym językiem opisu byłby język matematyki. Twierdzi, że trudno jednak oczekiwać, aby rezultatem tych badań byłoby sformułowanie uniwersalnych praw dla układów złożonych tak, jak ma to miejsce w fizyce. Zauważa, że każdy układ złożony jest inny i posiada indywidualną komplikację. W tym kontekście przytacza stwierdzenie J. B. Wiesnera – doradcy prezydenta Kennedy'ego: „pewne problemy są zbyt skomplikowane, aby mogły być racjonalnie i logicznie rozwiązane; można poszukiwać ich zrozumienia, ale nie odpowiedzi” [Cambell 1993].

Zrozumienie złożoności jest jednak już dostateczną motywacją dla badań uczonych w tym kierunku i co więcej różne idee pojawiające się w kontekście układów złożonych posiadają ważne implikacje filozoficzne.

Złożone układy społeczne stanowią niezwykle wyzwanie dla badaczy, ponieważ de facto w nich stykamy się z „prawdziwą” złożonością. Układy te wymagają ciągłego dopływu energii, informacji, co powoduje, że nagle mogą zmienić swoją strukturę, jeśli zmianie ulegną wartości ich istotnych parametrów. W strukturach społecznych ważną rolę odgrywa sieć komunikacyjna pozwalająca na wymianę informacji między jej elementami. W układach złożonych z istot żywych same elementy układu magazynują energię oraz informację. Są zdolne do uczenia się i zmiany zachowań pod wpływem nabytej wiedzy. W konsekwencji mogą tworzyć nowe struktury. Gdy elementami układów złożonych są istoty ludzkie a nawet proste układy biologiczne) pojawia się wiele istotnie nowych elementów które nie występują w układach fizycznych jak przykładowo pamięć czy też zdolność antycypacji. Co prawda w fizyce dobrze znane jest zjawisko tzw. histerezy, tym niemniej własność antycypacji jest wymieniana jako główny wskaźnik inteligencji układu. W złożonych układach w których partycypują ludzie istotną rolę będą odgrywały emocje, intencje, motywacje. To wszystko sprawia że ich zachowanie jest obarczone dużą niedookreślonością. W odróżnieniu od fizyki, gdzie fluktuacje odgrywają rolę drugorzędą, stają się kluczowe w układach społecznych. Mogą one spowodować że cały układ przyjmuje nową strukturę czasową i przestrzenną [Prigogine 1976]. Złożone układy w układach społecznych są układami bardzo silnie nieliniowymi pozostającymi daleko od stanu równowagi.

Niektórzy rezerwują dla teorii układów złożonych nazwę „*complex science*”. Czy to już jest nauka? Czy mówienie o cichej rewolucji naukowej w kontekście istnienia układów złożonych jest zasadne? Tradycyjna praktyka badawcza od czasów Kartezjusza metody analitycznej dla zrozumienia złożonego układu rozłożyć go na elementy proste. Rozumienia działania całego układu poszukujemy w zrozumieniu jego części. Takie podejście jest z definicji redukcjonistyczne. Paradygmat myślowy teorii układów złożonych nakazuje poszukiwanie zrozumienia układu w działaniu jego integralnej całości (holizm). Prawa działania tej całości są emergentne w stosunku do praw rządzących działaniami jego elementów. Zauważmy, że fakt znajomości praw rządzących cząstkami elementarnymi nie oznacza, że automatycznie znamy te prawa, gdy cząstki te tworzą strukturę, jaką jest powiedzmy jądro atomowe. Fizyka jądra atomowego jest nową teorią fizyczną, która ustala całkowicie nowe prawa w stosunku do fizyki cząstek elementarnych. Całkowicie nowy jest język pojęć używanych do opisu zjawisk i całkowicie nowa ontologia. Pojęcie emergencji epistemologicznej w tym przypadku pomimo niejasnego statusu dobrze opisuje charakter przejścia od praw

rządzących składnikami do praw rządzących całością. Czy jednak w tym wypadku teoria układów złożonych wzbogaciła naszą wiedzę na temat złożoności jądra. Ten trywialny przykład ukazuje że każda złożoność jest swoista i dotyczy bardzo konkretnego stopnia skomplikowania układu (*degree of complexity*). Przecież zbudowaliśmy fizykę jądrową która jest pewną klasyczną teorią efektywną i to bez udziału teorii złożoności albo filozofii złożoności.

Kategoria „złożoności” znajduje zastosowanie dla tak wielu obszarów rzeczywistości objętych ludzkim poznaniem, że jest kandydatką na niezwykle skuteczne narzędzie badań o charakterze interdyscyplinarnym. Wiążą się z tym jednak problemy natury definicyjnej w odniesieniu do samego terminu „złożoność”. Wskażemy teraz na te obszary badań nad złożonością, które najlepiej uwydatniają charakter badanego pojęcia.

Złożoność algorytmiczna (inaczej algorytmiczna losowość albo algorytmiczna pojemność informacyjna [Żurek 1990])

Pojęcie to pojawiło się w połowie lat 60-tych XX wieku dla opisu pewnego typu losowości układu i złożoności. Samo pojęcie zostało wprowadzone w sposób niezależny przez Solomonoffa (1964), Chaitina (1966) i Kołmogorowa (1968). Pojęcie to charakteryzuje losowość, która jednocześnie określa informację o stopniu złożoności w terminach minimalnej długości (mierzonej liczbą znaków binarnych) algorytmu kodującego dany obiekt. Weźmy dwa ciągi znaków układu dwójkowego, tj. ciągi zer i jedynek:

(A):01010101010101010101,

(B):10011010010110110010.

Oczywiście intuicja podpowiada nam, że ciąg (A) należy uznać za bardziej regularny od ciągu (B). Ciąg ten można prosto opisać przy pomocy algorytmu „dziesięć {01}”, natomiast ciąg (B) nie posiada już tak prostego algorytmu. Powiemy że ciąg (B) jest bardziej złożony, bo nie istnieje oczywisty i prosty algorytm który może być zastosowany do jego opisu. Wyobraźmy sobie wiele innych ciągów typu (B) o różnej długości i różnym stopniu skomplikowania w występowaniu zer i jedynek. Wówczas złożoność algorytmiczną ciągu binarnego $\{s\}$ definiujemy jako najkrótszy algorytm s^* (reprezentowany np. przez program komputerowy) wystarczający do rekonstrukcji tego ciągu. To oznaczamy $k(s)=|s^*|$. Dla poprawności (jednoznaczności tej definicji) odwołujemy się do konstrukcji komputera. W tym przypadku wybieramy maszynę Turinga. Kołmogorow dowiódł, że złożoność zdefiniowana przy pomocy komputera uniwersalnego, jest zawsze mniejsza bądź równa od sumy złożoności wskazywanej przez każdy inny komputer, i pewnej stałej A , zależnej od owego innego komputera (i niezależnej od badanego ciągu). Jeśli ciąg $\{s\}$ jest binarną reprezentacją liczby

całkowitej, to złożoność jest równa logarytmowi przy podstawie 2 z liczby znaków dwójkowych użytych do reprezentacji.

W definicji implicite założyliśmy że mamy do czynienia z ciągiem binarnym skończonym. Jeśli ciąg jest nieskończony to definiujemy go jako granicę $k_N(s)/N$ przy N dążącym do nieskończoności. Można udowodnić [Alekseev, Yakobson 1981], że jeśli dla ciągu binarnego nieskończonego złożoność $K(s) > 0$, to ciąg jest traktowany jako złożony (algorytmicznie losowy). Martin-Lof [1966] dowiódł że tak zdefiniowana złożoność przechodzi wszystkie możliwe testy losowości.

Zdefiniowana własność algorytmicznej złożoności chociaż dotyczy ciągów binarnych może być aplikowana do wielu realnych zjawisk, np. szeregów czasowych, wszędzie tam, gdzie mamy jego liczbową reprezentację. Może być również z powodzeniem zastosowana do badania do wykazania złożoności dynamicznego zachowania trajektorii w przestrzeni fazowej. W tym przypadku możemy dla konstrukcji odpowiedniego ciągu binarnego użyć metody kodowania trajektorii metody dynamiki symbolicznej).

Złożoność wyrażona w pojęciach entropii

Złożoność układu może być scharakteryzowana w terminach pojęcia entropii, które odgrywa tak ważną rolę w fizyce współczesnej. Dzięki Clausiusowi, Boltzmannowi i Gibbsowi pojęcie to stało się kluczowe w konstrukcji termodynamiki, kinetycznej teorii gazów czy też podstaw mechaniki statystycznej. Później w 1948 roku C. E. Shannon użył tego pojęcia do zdefiniowania pojęcia informacji. Natomiast Kołmogorow w 1958 roku zastosował to pojęcie do scharakteryzowania zjawiska chaosu w pewnych klasach nieliniowych układów dynamicznych [Ott 1997]. W każdym z tych przypadków aplikacji pojęcia entropii jest wykorzystywany fakt, że niesie ona informacje o nieokreśloności układu, panującym w nim bezładzie, losowości etc.

Dla ilustracji rozważmy układ, powiedzmy X , który może się znaleźć w jednym z N możliwych stanów. Te stany ponumerujemy dolnymi indeksami: x_1, x_2, \dots, x_N . Załóżmy, że stany te układ osiąga z pewnym prawdopodobieństwem, powiedzmy: p_1, p_2, \dots, p_N . Prawdopodobieństwa sumują się do jedności. Entropią Shannona H nazywa się liczbę, którą definiujemy następująco: $H(X) = - (p_1 \log p_1 + p_2 \log p_2 + \dots + p_N \log p_N)$, gdzie funkcja *logarytm* jest brana przy podstawie 2.

Fakt, że w definicji jest wzięty logarytm przy podstawie 2 oznacza że jednostkami informacji są bity (dwójkowe jednostki entropii). Weźmy zjawisko rzutu monetą, wtedy z prawdopodobieństwem $\frac{1}{2}$ mogą pojawić się orzeł bądź reszka, $N=2$ i dostajemy że $H=1$ bit.

Zjawisko rzutu monetą jest zatem zjawiskiem losowym o jednostkowej entropii. Bardziej skomplikowane zjawisko niż zjawisko rzutu kością będzie posiadać więcej

możliwych stanów, a stąd większą entropię. Zauważmy, że gdy dokonujemy pomiaru jakiejś wielkości badając zjawisko złożone, to zmniejszamy jego entropię ponieważ staje się ono dla nas bardziej określone. Czyli w pewnym sensie pomiar informacji w terminach entropii jest naturalny – ilość informacji mierzymy pomniejszeniem entropii układu. Za informację zawartą w układzie $I(X)$ możemy przyjąć właśnie ilość entropii $H(X)$. Oddaje to stwierdzenie Boltzmana, że entropia jest miarą zagubionych informacji, więc będzie charakteryzować pojemność informacyjną układu.

Złożoność dynamiczna układu

Zjawisko złożoności dynamicznej występuje w układach dynamicznych, które możemy traktować jako deterministyczne modele procesów, zjawisk etc. Językiem opisu ewolucji układu jest przestrzeń fazowa, którą budujemy w oparciu o znajomość zmiennych określających stan układu. W przypadku układów społecznych już samo określenie istotnych zmiennych charakteryzujących sam proces jest trudne. Poza tym zwróćmy uwagę, że ilość zmiennych istotnych dla charakteryzacji procesu może się zmieniać z czasem. Przykładowo jak rozważamy układ ekonomiczny – prawdziwie złożony układ – to istotne są zachowania indywiduów (np. inwestorów), musimy antycypować ich zachowania, a te zależą od bardzo wielu czynników, społecznych, politycznych i innych. Sytuacja jest o wiele bardziej skomplikowana niż w układach fizycznych, gdzie od samego początku znamy te istotne zmienne stanu układu.

Matematycznym modelem procesu deterministycznego jest układ dynamiczny – matematycznie układ równań różniczkowych. Takim układem jest na przykład układ skonstruowany na podstawie drugiej zasady dynamiki, która określa ruch układu pod wpływem pewnych sił. Oczywiście jest to układ deterministyczny, i ze znajomości stanu układu w pewnej wybranej chwili czasu w oparciu o jego rozwiązania mogę wyznaczyć stan w dowolnej innej chwili czasu. Matematycznie ten problem nazywa się problemem warunków początkowych: zadając warunki początkowe, wyznaczam w jednoznaczny sposób rozwiązanie układu które reprezentuje jego ewolucję. Oczywiście, ta ewolucja może być zwizualizowana w przestrzeni wszystkich dopuszczalnych stanów układu-przestrzeni fazowej. Czyli rozwiązania układu dynamicznego $dx/dt = f(x)$, gdzie x jest wektorem stanu i f jest gładką funkcją stanu będą funkcją dwóch zmiennych, czasu t oraz warunków początkowych x_0 .

Wiek XVIII i XIX to pasmo sukcesów zastosowań deterministycznej teorii Newtona. Badania dynamiki układów newtonowskich przyciągało uwagę najwybitniejszych matematyków tamtych czasów. W tym czasie rozwikłano metodami analitycznymi wiele bardzo złożonych zagadnień dynamicznych z zagadnień fizyki i astronomii, mechaniki nieba. H. Poincaré (1892) zajmował się wtedy bardzo trudnym zagadnieniem oddziaływania Słońca, Ziemi i Księżyca. To można uważać za datę rozpoczęcia badań układów dynamicznie złożonych. Poincaré swoje badania

koncentrował na badaniu stabilności swojego układu (dziś ze względu na poczynione założenia upraszczające określa się go mianem ograniczonego zagadnienia trzech ciał). W kontekście tych badań (układu nieliniowego) odkrył on niezwykle skomplikowane zachowanie trajektorii w przestrzeni fazowej, chociaż układ był deterministyczny. Po raz pierwszy zauważył on, że małe różnice w warunkach początkowych mogą generować niewspółmiernie duże różnice w końcowej reakcji układu. To sprawia, że przestaje być skuteczna jakakolwiek prognoza odnośnie przyszłego zachowania układu. Odkrycie Poincaré zachwiało wiarą matematyków, że każdy układ dynamiczny w zasadzie można rozwiązać, podając odpowiednią formułę matematyczną. W zagadnieniu dynamiki Newtona pojawia się prosty układ dynamiczny, w którym występuje złożoność jako przejaw własności nadwrażliwej czułości zachowania układu ze względu na małą nieoznaczoność warunków początkowych. Typową miarą stopnia złożoności układu jest wykładnik Lapunowa – miara tempa eksponentjalnego rozbiegania się bliskich trajektorii układu oraz jego odwrotność – miara tempa w jakim układ traci pamięć o swoich warunkach początkowych.

W XX wieku matematycy dokonali dalszych odkryć złożonej struktury przestrzeni fazowej w układach nieliniowych. Za sprawą G. D. Birkhoffa (1927), A. N. Kołmogorowa, V. I. Arnolda i J. Mosera zrozumiano wiele aspektów tej złożoności. Dla układów bliskich hamiltonowskich sformułowano zostało twierdzenie KAM (tak nazywane od pierwszych liter nazwisk ich twórców), które charakteryzuje w przestrzeni fazowej miejsce układów) chaotycznych. Pokazano, że w typowej sytuacji układów hamiltonowskich zachowania regularne i chaotyczne koegzystują, a brzeg tych zachowań w przestrzeni fazowej jest fraktalny. Ma też miejsce przeciekanie trajektorii z obszarów poprzez ten brzeg.

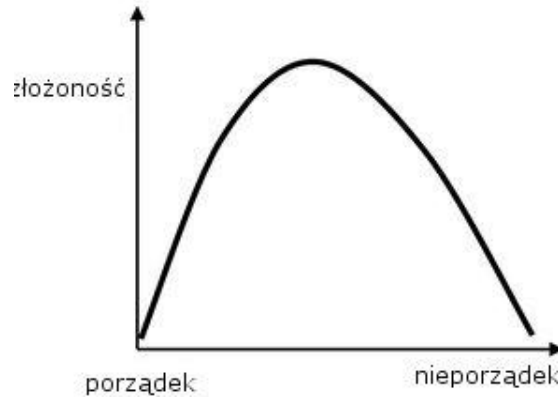
Ważnym momentem w zrozumieniu złożoności dynamicznej miało również odkrycie chaosu w układzie Lorenza (1963), który pracował nad prostymi modelami pogody – zjawisku opartym na prawach fizyki atmosfery. Znalazł pewien prosty układ z analizy zjawiska konwekcji który sprowadził do postaci trójwymiarowego układu dynamicznego. W tym układzie pokazał numerycznie, że występuje chaotyczny ruch złożony na pewnych przyciągających podzbiorach przestrzeni fazowej zwanymi traktorami.

Jest niezwykle interesujące, że dynamika Wszechświata w pobliżu osobliwości początkowej jest koronnym świadkiem złożonego chaotycznego zachowania. W otoczeniu osobliwości początkowej, gdy objętość trójprzestrzeni zmierza do zera ewolucja Wszechświata daje się aproksymować przez serię tzw. epok Kasnerowskich. W tej fazie ewolucji efekty materii są zaniedbywalne i przybliżenie próżniowe Einsteinowskich równań dobrze aproksymuje ewolucję wczesnego Wszechświata. Rozwiązania próżniowe i płaskie jednorodnych modeli kosmologicznych Bianchiego

mają postać rozwiązań potęgowych dla trzech czynników skali w trzech głównych kierunkach przestrzennych, przy czym suma tych wykładników jak i ich kwadratów jest równa jeden. Chaos w zachowaniu czynników skali w pobliżu osobliwości jest aproksymowana serią epok Kasnerowskich parametryzowanych tylko jednym parametrem u , gdzie $a_i = t^{p_i}$, $i=1,2,3,\dots$ są czynnikami skali. Bieliński, Lifshitz i Khalatnikow odkryli reguły wymiany wykładników Kasnerowskich. Najpierw następuje wyczerpywanie części całkowitych parametru a potem jego wymiana na odwrotność i tak w nieskończoność. Złożone zachowanie chaotyczne daje się aproksymować prostymi regułami a ten typ zachowania jest generyczny dla rozwiązań równań Einsteina w pobliżu osobliwości początkowej (zob.: Damour Henneaux 2000). Złożone chaotyczne zachowanie nie jest tylko domeną ewolucji wszechświata. Złożone chaotyczne zachowanie w różnych jego aspektach ma miejsce w kosmologii z polem skalarnym [Hrycyna 2006]. W ostatnich czasach należy odnotować niezwykle postęp tak w zrozumieniu samych mechanizmów złożoności, jak i praktycznych aplikacji zjawiska chaosu deterministycznego. W kodowaniu informacji, kryptologii, medycynie i wielu innych dziedzinach technicznych. Stało się to możliwe dzięki rozwinięciom metod numerycznych w badaniach tych układów. Od tego momentu rozpoznane numerycznie zjawisko złożoności dynamicznej zaczyna mieć bardzo praktyczne zastosowanie, np. w leczeniu epilepsji i innych schorzeń ponieważ stała się możliwa rekonstrukcja przestrzeni fazowej z danych empirycznych (np. zapisy EKG, EEG). Istnieje również cała klasa układów z bardzo wielu dziedzin które pojawiają się w kontekście badania zjawiska samoorganizacji [Szydłowski, Hereć, Tambor 2010]. Układy te pojawiają się na krawędzi chaosu i regularności. Ich prawa mają charakter emergentny w stosunku do praw odnoszących się do ich składowych. W ich zrozumieniu istotną rolę odgrywa koncepcja emergencji. Emergentne własności są odbiciem różnych poziomów opisu posiadającym swoje odrębne i autonomiczne prawa. Dla zrozumienia tych praw i ich wyłonienia się, startujemy z praw fundamentalnych dla elementów materii ale koniecznie dodajemy nieliniowość oraz więzy które musi respektować układ [Nicolis, Rouvanas – Nicolis 2007].

Konkludując, powołajmy się na Herberta Simona [Simon 1981], który jako jeden z pionierów dyskutował naturę i architekturę układów złożonych. Sugerował on taką ich definicję: „utworzone z dużej liczby części, które wykazują wzajemne oddziaływania (...) W takim układzie całość jest czymś więcej niż sumą części w tym sensie, że, mając własności poszczególnych elementów i prawa rządzące ich wzajemnymi oddziaływaniami, nie jest rzeczą trywialną wnioskować o własnościach całości.”

Dla pogłębienia zrozumienia pojęcia złożoności rekomendujemy: [Adami,2002; Gell-Mann 1965; Kauffman 1993; Wolfram 2002; Holland 1998; Carthes 2004].



Szczególnie istotną sprawą z przedmiotowego punktu widzenia jest problem określania miary złożoności. Wyróżnić można algorytmiczne sposoby takiego zabiegu, które jednak odnoszą się do określania stopnia złożoności na poziomie opisu. Złożoność postrzeganą jaką efekt czasowej ewolucji układu można określić na bazie statystycznej teorii informacji. Dokonując prób szacowania stopnia złożoności, można iść niejako w dwóch kierunkach: 1) określając stopień nieuporządkowania układu, przypadkowości w układzie elementów czy procesów zachodzących w systemie (często takich rekonstrukcji dokonuje się w języku logiki, teorii algorytmów); 2) określając zawartość informacyjną układu złożonego; zwracając uwagę na wysoki poziom organizacji struktury (oszacowania dokonuje się w kategoriach złożoności statystycznej lub fizycznej). Powyższy rysunek pokazuje próbę ilustracji zależności „ilościowej” miary złożoności w zależności od stopnia uporządkowania układu. Termin „ilościowy” ma tutaj jednak wysoce nieprecyzyjne znaczenie; wykres wskazuje bardziej na tendencję niż ściśle matematyczne ujęcie związku między złożonością a porządkiem/nieporządkiem w układzie. Taka dualna charakterystyka złożoności pozwala uchwycić jej atuty w nowym sposobie ujęcia podstawowych problemów w schemacie złożoności. Na przykład pojawienie się życia biologicznego, w ujęciu układów złożonych, nie jest czymś przypadkowym, jest „konieczne i uprawnione w sensie dyssypatywnej samoorganizacji” [Mainzer 2007, s. 114].

Filozofia złożoności

Jak zostało przedstawione powyżej, zjawisko układów złożonych i problem złożoności jako takiej dopracowało się adekwatnych metod i technik ich analizy w ramach tzw. *complexity science* (techniczny formalizm algorytmów sieciowych, symulacji komputerowych, analiza nieliniowych równań różniczkowych) [Medd 2001]. Wciąż jednak zjawisko złożoności domaga się pogłębionej analizy filozoficznej. Taka analiza tego problemu może mieć charakter zarówno metodologiczny (jako ściśle logiczna próba rekonstrukcji rozumowań), jak i szerzej – metanaukowy lub wręcz ściśle

filozoficzny. Jak się okazuje, teoria złożoności pozwala niejako w nowym świetle spojrzeć na klasyczne problemy filozoficzne.

Pierwszą grupę problemów, na którą warto spojrzeć w nowej optyce złożoności, można nazwać klasycznym – kartezjańskim stylem myślenia. Jego analogonem po stronie *science* jest mechanika Newtonowska, która naznaczyła sposób postrzegania świata empirycznego co najmniej do początku XX wieku¹. Wśród najważniejszych kwestii filozoficznych w obrębie tego stylu należy wymienić: **dualizm** (wprowadzenie kategorii *umysłu*, jako próba poradzenia sobie z problemami wolności, swobody interpretacji w świecie cząstek *materii* zdeterminowanym przez prawa mechaniki), **determinizm** (związany z liniowym postrzeganiem dynamiki stanów, przyczynowość rozumiana deterministycznie, „(...) przyroda traktowana była jak ogromny, zachowawczy i deterministyczny układ przyczynowych zdarzeń, których pojawienie się można przewidzieć dla dowolnej chwili w przyszłości lub przeszłości. (...) [Mainzer 2007, s. 10]), **korespondencyjna teoria wiedzy** (dotyczy możliwości istnienia zupełnej odpowiedniości między układem fizycznym a jego reprezentacją w umyśle badacza), **ogólnie pojęta racjonalność** (rozumiana jako zapostulowana zasada wyboru, który maksymalizuje wartość *użyteczności*), **podejście redukcjonistyczne i analityczne** (istnieje możliwość uzyskania pełnej wiedzy, dotyczącej układu złożonego, którą uzyskuje się na podstawie rozkładu na części składowe, znajomości własności jego elementów i relacji między nimi).

Filozoficzne podejmowanie problemu złożoności implikuje zasadniczo dwa zabiegi „metodologiczne”: 1) wprowadzenie do dyskursu nowych narzędzi językowych; 2) dokonanie korekt w klasycznym schemacie pojęciowym.

Po pierwsze, terminologia języka podejmującego kwestię złożoności wzbogaca się materialnie i konceptualnie o takie pojęcia, jak **holizm**, **superweniencja** czy **emergencja**. Łączy je bazowe założenie, że system jako złożona całość jest czymś więcej niż sumą elementów składowych. Dynamiczne wysiłki związane nad wypracowaniem jednolitej *semantyki* tych pojęć związane były szczególnie z pracami filozofów procesu (Bergson, Whitehead) oraz rozwojem współczesnej filozofii umysłu (Lycan, Rosenthal, Chalmers, Kim, Poczobut). Koncepcja **emergencji** podejmuje rewizję problematyki związanej z kwestią redukcjonizmu oraz stanowi wyzwanie dla klasycznej dualnej wizji rzeczywistości, postulując wielopoziomową strukturę *uniwersum* (przynajmniej na poziomie opisu). Ujmując rzecz historycznie², warto wyodrębnić okres klasyczny w rozwoju koncepcji emergencji (za taki uważa się lata

¹ Za prekursora zasadniczo innego podejścia do rzeczywistości, w kierunku traktowania jej jako systemu złożonego, można potraktować Leibniza i jego ideę zhierarchizowanych systemów naturalnych.

² Sam termin „emergencja” znalazł się w słowniku filozoficznym za sprawą G. H. Lewesa (1875), a następnie prac J. S. Milla (por. Mill 1962).

dwudzieste ubiegłego wieku i prace Samuela Alexandra (1920), C.L. Morgana (1920) i C.D. Broad'a (1925)), niewątpliwie do klasyków emergencji, choć już bliżej współczesności można zaliczyć J. Kima (1999) i P. Humphreys'a (1997). Spośród polskich filozofów podejmujących w różnych kontekstach aktualną problematykę związaną z koncepcjami emergencji należy wymienić R. Poczobuta (2009), W. Strawińskiego (1997) i J. Życińskiego (2002). Pojęcie emergencji znajduje kluczowe zastosowanie w opisie istotnych własności charakteryzujących układy złożone z kilku powodów. Po pierwsze, już w ujęciu klasycznym emergencja dotyczyła takich cech, jak zasadnicza nowość, nieredukowalność, niededukowalność, nieprzewidywalność, nie-obliczalność, nie-wyjaśnialność. „ (...) emergencja w sensie Mill'a to niemożność wyznaczenia pewnej wielkości, związanej z łącznym skutkiem działających razem przyczyn, jako wypadkowej odpowiednich wielkości związanych z poszczególnymi przyczynami, w oparciu o określoną zasadę składania danych wielkości (...) „ [Strawiński 1997]. We współczesnej terminologii dotyczącej kwestii złożoności układu i pojawiającej się trudności z opisem cech układu nieredukowalnych do własności elementów, które go tworzą, powiemy zatem, że *układ ma własność emergentną*. Można tak nazwaną własność interpretować na kilka sposobów: 1) nie istnieje możliwość wyjaśnienia pojawienia się własności emergentnej na podstawie wiedzy o składnikach struktury złożonej, którą tworzą (emergencja epistemiczna); 2) własności emergentnej nie jesteśmy także w stanie wyjaśnić w oparciu o wiedzę na temat relacji między składnikami (emergencja interakcyjna); 3) nie można przewidzieć zaistnienia własności emergentnej, mając wiedzę o własnościach tych składników (emergencja aktualizacyjna). Wielość odmian emergencji, problemy z ustaleniem tzw. jednostki emergencji i bogactwo jej odniesień, niejednokrotnie sprawiają, że koncepcja emergencji pozostaje wciąż zbyt rozmyta znaczeniowo, by stanowić solidną podstawę do rekonstrukcji rozumowań naukowych dotyczących układów złożonych. Historycznie rzecz ujmując, szansą do naukowego ugruntowania się koncepcji holizmu jest ogólna teoria systemów, szczególnie w wersji biologa Ludwika von Bertalanffy'ego (1973). Rozwija on nowe podejście do układów biologicznych, eksponując cechę ich otwartości. Prowadzi to do sformułowania zupełnie nowego schematu pojęciowego. *Układ otwarty* ulokowany jest w określonym *środowisku*, ma zatem *granice* [por. Cilliers 2001]. W oparciu o nie można definiować *tożsamość* układu, jego specyfikę i własności.

Układ oddziałuje z otoczeniem, potrzeba zatem określenia tego, co stanowi dla niego informację *na wejściu* (*input*) i *na wyjściu* (*output*). Konfrontując ten nowy schemat pojęciowy z klasycznym, można potraktować *przyczyny* jako *wkład do układu na wejściu* (*input*), *skutki* natomiast jako *output*. Myślenie liniowe karze spodziewać się proporcjonalności między *input* a *output*. Rozważmy sytuację, że układ ponownie „użyje” (nastąpi przekierowanie) tego, co uzyskał na wyjściu, jako dodatkową

kontrybucję do przyczyn (*input*) stanowiących standardowe wejście. Firma, inwestując część zarobionych pieniędzy, uzyska nieliniowo wzrost produkcji. Często bardzo mała różnica (niezauważalna) między wcześniejszym i późniejszym stanem na wejściu, prowadzi, na skutek tego przyczynowego sprzężenia zwrotnego, do dużej obserwowalnej zmiany.

To, co kluczowe dla koncepcji teorii systemów, to analiza swoistej sieci układów, które tworzą (pojawia się pojęcie *super-układu* i *sub-układu*). Prowadzi to do potrzeby zupełnie nowego podejścia poznawczego: układ złożony nie może być traktowany jako niezależny, ale jako pozostający w szczególnego typu relacjach. Jest to odejście od *ontologii* zakładanej w podejściu mechaniki Newtonowskiej. Podstawowymi składnikami rzeczywistości nie są cząstki materialne, ale złożona struktura i relacje w jej obrębie. Naturalnie nie wyklucza to możliwości podejścia analitycznego, ale stanowi jego znaczące uzupełnienie. Metodologicznie znaczy to odwrotny kierunek badań układu złożonego. W opisie relacji między układem a jego składnikami przychodzi z pomocą kluczowy składnik koncepcji emergencji: pojęcie oddziaływania systemu jako całości na jego elementy (tzw. *downward causation*) [Campbell 1974]. W podejściu klasycznym – analitycznym mowa jest tylko o *upwards causation*, w ujęciu teorii systemów zachowanie składników systemu jest ograniczone przez własności/prawa na poziomie wyższym.

Dodatkową zaletą systemowego podejścia do złożoności jest możliwość ustalania *relacji izomorfizmu* między układami złożonymi różnych typów. Uzyskuje się w ten sposób niezwykle efektywny punkt widzenia i potężne narzędzie do eksplorowania cech sieci biologicznych, sieci społecznych po sieci komputerowe i symulacje działania mózgu [Fronczak A i P 2009].

Filozoficzną implikacją tego toku myślenia jest, zaproponowane przez Gershensona (2002) ontologiczne rozróżnienie na istnienie (bycie) absolutne (*a-being*) i istnienie relatywne (*re-being*). Jest to bezpośrednio związane z kwestią poznawczego ujęcia złożoności. Pierwsze odnosi się do kwestii istnienia rzeczy niezależnie od obserwatora; drugie wskazuje na własności rzeczy, które ujęte są przez obserwatora w specyficznym kontekście. Relacyjne ujęcie układu złożonego pozwala objawiać różne jego oblicza. Gershenson definiuje złożoność rekursywnie, twierdząc, że jest proporcjonalna do liczby jego elementów, do liczby ich wzajemnych oddziaływań, do złożoności ich elementów oraz do stopnia złożoności oddziaływań między nimi. Autor neguje istnienie złożoności absolutnej, natomiast, opierając się na hierarchicznym ujęciu poziomów rzeczywistości (nazywa je poziomami abstrakcji), formułuje koncepcję złożoności względnej. Bardzo charakterystyczne jest takie przedstawienie *złożoności* w perspektywie obserwatora, który ją poznaje i ujmuje ją niejako *dynamicznie* wg. schematu: **niższy poziom abstrakcji** (np. atomy, molekuły, proteiny, komórki, organizmy żywe, społeczności/ekosystemy, ...) → **poziom**

złożoności → **wyższy poziom abstrakcji** (odpowiednio: molekuly, proteiny, komórki, organizmy żywe, społeczności/ekosystemy, systemy planetarne, ...). Między niższym poziomem abstrakcji a poziomem złożoności następuje emergencja złożoności, natomiast między poziomem złożoności a wyższym/kolejnym poziomem abstrakcji następuje emergencja prostoty (opisywanie zachowania społeczności w kategoriach każdego stanowiącego ją człowieka były niezwykle skomplikowane, podobnie jak opis ruchu planet z poziomu ruchu molekuł). Warto zauważyć, że w zaproponowanej przez Gershensona ontologii relacyjnej fenomen emergencji własności przestaje być czymś tajemniczym, staje się wręcz naturalny i możliwy do poznawczego ujęcia w ramach odpowiednich poziomów abstrakcji.

Niewątpliwie pojęciem, które trzeba uznać za najbardziej istotne narzędzie do opisu złożoności, jest pojęcie *układu wielu-indywiduów* (*multi-agent system - MAS*). Układy tego typu posiadają następujące cechy [Sycara 1998]: 1) każde indywiduum (człowiek, zwierzę, komórka, molekula) posiada niepełną informację lub zdolność do rozwiązania problemu, który napotyka (ma ograniczony punkt widzenia, nie jest w stanie przewidzieć odległych skutków swoich decyzji i działań). Często indywidua (*agents*) postrzegane są jako posiadające cechy swoistej „czarnej skrzynki”: znane są prawa rządzące ich indywidualnym zachowaniem, natomiast nie znana jest ich wewnętrzna struktura; 2) nie istnieje globalny system kontroli zachowania, choć ewolucja układu złożonego (biologicznego, społecznego) nie jest sumą pojedynczych decyzji i działań, ale skutkiem interakcji o charakterze nieliniowym; 3) dane są zdecentralizowane; 4) obliczenia/wybór działania nie są synchroniczne (ta sama czynność/ zachowanie może mieć w ogólności różny skutek w różnych *miejscach* układu złożonego i w różnym *czasie*). Tak przedstawiana charakterystyka złożoności w zupełnie inny sposób karze odnieść się do filozoficznych pytań typu: jaka jest zasada (w sensie *arche*) organizującej się materii, powstającego uporządkowania, organizacji przejawiającej wysoki stopień złożoności, skoro indywiduum nie jest w stanie przewidzieć konsekwencji swoich działań (lub ujmując rzecz w kategoriach układów dynamicznych: jak zidentyfikować atraktory ewoluującej struktury)?

Istotnym wkładem do filozoficznej analizy pojęcia złożoności jest pogłębiona, interdyscyplinarna monografia Klausa Mainzera [Mainzer 2007], w której autor analizuje badane pojęcie na gruncie fizyki, matematyki, nauk przyrodniczych, kognitywistyki i społecznych. W jego ujęciu „poznawanie złożoności” staje się programem badawczym, który jest w stanie dostarczyć narzędzia nie tylko badającego, ale dostarczającego wyjaśnienia związanej ze złożonością samoorganizacji systemów w różnych domenach rzeczywistości empirycznej: fizycznej, chemicznej, neurobiologicznej. Istotne jest, jak zauważa Mainzer, że uwzględnienie nowego schematu pojęciowego i sposobu podejścia, których dostarcza badanie złożoności, nie

uchyla tradycyjnych kwestii filozoficznych, szczególnie tych kwestii traktowanych jako problematyka tzw. filozofii przyrody. Teorię układów złożonych autor traktuje jako „nowe podejście”, które na różnych poziomach aplikacji objawia także słabości: a) w odniesieniu do klasycznego problemu wyłaniania się porządku z chaotycznej materii: „jak w niezmiarzonej mnogości danych pomiarowych można wyśledzić traktory tworzenia się struktury” [tamże, s. 27]; b) w odniesieniu do kwestii „emergencji” życia: „Teoria dynamicznych systemów złożonych nie wyjaśnia, czym jest życie, ale może modelować sytuacje, w jakich w określonych warunkach życie może powstawać.” [tamże, s. 115]; c) w odniesieniu do klasycznych problemów kognitywistyki: „Podejście systemowe nie jest w stanie wyjaśnić, czym jest umysł. Możemy jednak modelować dynamikę pewnych stanów umysłowych ramach pewnych warunków. Nie można nawet wykluczyć modelowania zachowania celowego.” [tamże, s. 155-156]; d) odnosząc się do nadziei związanych z ewolucją systemów obliczeniowych, autor stawia pytania natury metodologicznej i filozoficznej: „(...) czy od komputerów kwantowych oraz kwantowej teorii złożoności możemy oczekiwać większej efektywności w przetwarzaniu informacji? Czy materia nie jest niczym więcej niż „skondensowaną” informacją kwantową o różnym stopniu złożoności?” [tamże, s. 221].

Literatura

Adami, C. (2002), What is complexity?, *BioEssays* 24, 1085-1094.

Alexander, S. (1920), *Space, Time, and Deity* (London: Macmillan Alexander)

Bar-Yam, Y. (1997), *Dynamics of Complex Systems*. Addison-Wesley.

Biesiada, M. (1994), *Chaos i Kosmos*, w: Kosmos i Filozofia, Biblos.

Broad, C. (1925), *The Minds and Its Place in Nature* (London: Routledge and Kegan Paul).

Byrne, D. (1998), *Complexity Theory and the Social Sciences. An Introduction*. London: Routledge.

Campbell, D. T. (1974), “Downward Causation” in *Hierarchically Organized Biological Systems, Studies in the Philosophy of Biology*, F.J. Ayala and T. Dobzhansky (eds.), Macmillan, New York.

Cilliers, P. (2001), Boundaries, Hierarchies and Networks in Complex Systems, *International Journal of Innovation Management*, Vol. 5, No. 2, pp. 135-147.

- Carthers, J. M. i inni, (2004)**, Informational complexity and functional activity of RNA structures, *J. Am. Chem. Soc.*, 126, 5130-5137.
- Damour, T., Henneaux, M. (2000)**, Chaos in superstring cosmology, *Phys. Rev. Letters* (2000), 85 (5), s. 920-923.
- Fronczak, A. i Fronczak, P. (2009)**, *Świat sieci złożonych, Od fizyki do Internetu*, PWN Warszawa.
- Gell-Mann, M. (1995)**, What is complexity?, *Complexity* 1, s. 16-19.
- Gershenson, C. (2002)**, Complex Philosophy, Proceedings of the First Biennial Seminar on Philosophical, Methodological and Epistemological Implications of Complexity Theory, La Habana, Cuba, *Inter. Journal of Complex Systems*, 544.
- Heylighen F. (1997)**, Publications on Complex, Evolving Systems: a citation-based survey, *Complexity* 2 (5), s. 31-36.
- Humphreys, P. (1997)**, How properties emerge, *Philosophy of Science* 64, s. 1–17.
- Hrycina, O., Szydłowski, M. (2006)**, Different faces of chaos in FRW models with scalar field, *Chaos, Solitons and Fractals* 28, s. 1252-1270.
- Holland, J. H. (1998)**, *Emergence: from chaos to order*, Helix Books, N.Y.
- Kauffman, S. (1993)**, *The Origin of Order*, Oxford University Press, N.Y.
- Kim, J. (1999)**, Making sense of emergence, *Philosophical Studies* 95, s. 3–36.
- Lewes, G. H. (1875)**, *Problems of Life and Mind*, vol. 1-2, London: Truebner and Copany.
- Mainzer, K. (2007)**, *Poznawanie złożoności, Obliczeniowa dynamika materii, umysłu I ludzkości*, Wyd. UMCS Lublin.
- Medd, W. (2001)**, „What Is Complexity Science?”, *Emergence*, Vol. 3, Issue 1, s. 43.
- Mill, J. S. (1962)**, *System logiki dedukcyjnej i indukcyjnej*, t. 1-2, przeł. C. Znamierowski, Warszawa: PWN.
- Morgan, C. (1920)**, *Emergent Evolution* (New York: Holt)
- Nicolis, G., Rouvanas-Nicolis, C. (2007)**, *Scholarpedia*, 2 (11), 1473, hasło: *complex systems*.
- Nowak, A., Borkowski, W., Winkowska-Nowak, K. (2010)**, *Układy złożone w naukach społecznych. Wybrane zagadnienia*, Wyd. Scholar, Warszawa.
- Poczobut, R. (2009)**, *Między redukcją a emergencją, Spór o miejsce umysłu w świecie fizycznym*, Monografie FNP, Wrocław.

- Prigogine, I. (1976)**, Order through fluctuation: self-organization and social systems, w: E. Jantsch (Eds.), *Evolution and consciousness: human systems in transition*. Addison-Wesley, London, 1976.
- Simon, H. A. (1981)**, The science of the artificial, MIT Press: Cambridge.
- Sobczyk, K. (2006)**, Losowość, złożoność, prognozowalność: próby zrozumienia, *Nauka* 2/2006, 45-64.
- Sporns, O. (2007)**, *Scholarpedia*, 2 (10), 1623, hasło: *complexity*.
- Szydłowski, M. (1994)**, *Czy Pan Bóg gra w kości?*, w: Kosmos i Filozofia, Biblos, Tarnów.
- Tempczyk, M. (1998)**, Teoria chaosu a Filozofia, wyd. Cis, Warszawa.
- Strawiński, W. (1997)**, *Jedność nauki, redukcja, emergencja - z metodologicznych i ontologicznych problemów integracji wiedzy*, Fundacja Aletheia, Warszawa.
- Sycara, K.** MultiAgent Systems, *AI Magazine* 19 (2), 1998, s.79-92.
- Wolfram, S. (2002)**, A new kind of science, Wolfram media INC., Champaign, Illinois.
- von Bertalanffy, L. (1973)**, General System Theory (Revised Edition), George Braziller, New York.
- Żurek, W. H. (1989)**, Algorithmic randomness and physical entropy, *Phys. Rev.* A40, 9.
- Życiński, J. (2002)**, *Bóg i ewolucja. Podstawowe pytania ewolucjonizmu chrześcijańskiego*, TN KUL, Lublin.

Marek Szydłowski, Paweł Tambor