

Kwadrans na zastanowienie

silnie zakwaszonym środowisku), w trakcie której układ zmienia się od bezbarwnego do brunatnego (od bromu wydzielającego się w trakcie reakcji). Gdy dobrane i utrzymane są odpowiednie warunki przeprowadzenia reakcji, można względem niej regulować zegarek. Oczywiście taki mniej precyzyjny kupiony za kilkanaście złotych w supermarkecie. „Prawdziwe” na przykład atomowe zegary skonstruowane przez fizyków są bezporównywalnie dokładniejsze. Reakcja B-Ż jest przykładem dużej grupy tak zwanych reakcji oscylacyjnych. Do grupy tej należą również niektóre reakcje strąceniowe (na przykład reakcja rytmicznego strącania $Pb^{++} + 2I^- = PbI_2$ zachodząca w żelu uzyskanym z żelatyny) zdolne do tworzenia tak zwanych pierścieni Lieseganga – barwnych krążków produktu reakcji pojawiających się na różnych wysokościach nad dnem próbówki. Tematyka dotycząca reakcji oscylujących, tudzież pomiarów czasu jest tak fascynująca, że warto poświęcić nim osobne felietony. Niecierpliwym Czytelnikom zalecam posurfowanie po Internecie.

Świetną zabawą jest również umieszczenie kropli cieczy niemieszającej się z wodą i o większej od wody gęstości w tak dobranym wodnym roztworze soli, aby gęstości obu cieczy zrównały się. W wyniku wszędobylskich ruchów konwekcyjnych (na skutek różnicy temperatur, a co za tym idzie gęstości roztworu w różnych miejscach naczynia) kropla taka może poruszać się w sposób łudząco podobny do ruchów ameby. Cierpliwym obserwator może również doczekać się podziału lub połączenia kropelek – pseudokomórek.

Przykładowe reakcje oscylujące wspomniane na wstępie mogą posłużyć do naśladowania procesów, które są immanentną cechą materii ożywionej na poziomie ekosystemu. Jest to jednak znów tylko naśladownictwo zewnętrzne. Ich matematyczny opis jest zwykle dość skomplikowany. Najprostszy mechanizm i odpowiadający mu układ równań różniczkowych znany jest jako model Lotki-Volterry. Rozwiązania równań modelu L-V mogą być między innymi wykorzystane do ilościowej analizy populacji lisów i zajęcy. Istota zachowania się modelu sprowadza się do kilku prostych stwierdzeń: mała liczba lisów oznacza duży przyrost naturalny zajęcy; w następnym roku populacja lisów wzrasta, gdyż mają one co jeść; kolejny rok przynosi spadek populacji zajęcy zjadanych przez olbrzymią liczbę lisów; dalej, z powodu znacznie ograniczonej liczby zajęcy (ograniczonej ilości pożywienia) ginie większość lisów i układ wraca do punktu wyjścia.

Zewnętrzne naśladownictwo działania ma się nijak do rzeczywistego stopnia komplikacji modelowanych procesów – mechanizmu działania serca opartego na prognostyce zachowania się poszczególnych mięśni kurczących zastawki, mięśni odpowiedzialnych za zmniejszenie się objętości komór serca lub też do dokładnej analizy dynamiki ruchu płynów składającego się na ruch ameby albo do analizy fluktuacji łańcucha pokarmowego w ekosystemie itp. Za pomocą prostych chemicznych modeli lub bardzo uproszczonych modeli matematycznych możemy symulować jedynie mało istotne objawy działania organizmów żywych.

Innym skutecznym sposobem imitacji procesów zachodzących w układach ożywionych jest symulacja nie zewnętrznych cech a funkcji układu ożywionego. Pierwszym, znanym historii modelem wykorzystanym do takich symulacji był

Widok pulsującego serca nie jest zarezerwowany jedynie dla kardiochirurgów. W prosty sposób można zbudować układ, który znakomicie imituje zewnętrzny obraz tego organu. Potrzeba kilka łatwych do zdobycia odczynników chemicznych – kwas siarkowy, dwuchromian potasu, odrobina rtęci i stalowa igła. Rolę serca pełni kropla rtęci zmieniająca cyklicznie swój kształt. Takich reakcji chemicznych, w których określone właściwości układu zmieniają się w sposób cykliczny jest znacznie więcej. Należy do nich słynna reakcja Bielousowa- Żabotyńskiego (reakcja utleniania kwasu malonowego za pomocą bromianu potasu katalizowana solami ceru zachodząca w

Homeostat.

HOMEOSTAT – model fizyczny naśladowujący zjawisko homeostazy i samoorganizacyjnej funkcji mózgu. Opracowany i zbudowany przez W.R.Ashby'ego w 1948 roku. Homeostat Ashby'ego był urządzeniem elektromechanicznym. Istotą jego działania było samorzutne dążenie do stanu równowagi wewnętrznej, jeśli urządzenie zostało z niego wytracone poprzez zewnętrzne zakłócenie (wyłączanie poszczególnych części urządzenia, blokowanie ruchów mechanicznych, zmiana kierunku prądu). Stan równowagi urządzenie osiągało dzięki ujemnemu sprzężeniu zwrotnemu.

Układ zwany homeostatem powinien charakteryzować się pewnymi niezmiennymi cechami niezależnymi od właściwości otoczenia, w którym go umieścimy. Układ homeostatyczny odpowiada na zmiany w otoczeniu w ten sposób, że jego funkcjonalność (zdolność do regeneracji, rozmnażania, żywienia się) pozostaje z grubsza nie zmieniona. Z punktu widzenia biologa stan homeostazy oznacza

niezmiennosc w czasie takich parametrów, jak temperatura ciała organizmu stałocięplnego, ciśnienie osmotyczne (zależne od składu płynów ustrojowych), ich objętość itp. Możemy również spojrzeć na homeostat z nieco ogólniejszego punktu widzenia. Organizm żywy z grubsza nie powinien podlegać

UJEMNE SPRĘŻENIE ZWROTNE – takie połączenie układów, w którym skutek jakiegoś procesu przeciwdziała jego przyczynie.

zmianom strukturalnym. Oznacza to, że poziom jego komplikacji, lub jeśli ktoś woli, uporządkowania powinien pozostawać stały. W języku termodynamiki oznacza to, że entropia organizmu żywego pozostaje stała. Termin entropia oznacza w tym przypadku pewną

wielkość fizyczną, funkcję która stanowi miarę nieuporządkowania (chaosu) układu. Przypomnijmy, że w odniesieniu do układu izolowanego stwierdzenie, że jego entropia jest stała oznacza, że układ znajduje się w stanie równowagi lub zachodząca w nim przemiana jest odwracalna (większość, jeżeli nie wszystkie procesy zachodzące w makroskopowej rzeczywistości są nieodwracalne). Stwierdzenie to wynika z jednego z najważniejszych praw fizycznych – z drugiej zasady termodynamiki (wracamy do niej, nie bez kozery niemal w każdym felietonie; wiąże się to z uniwersalnym charakterem tej zasady).

Stała entropia układu izolowanego oznacza więc stan śmierci. Na szczęście organizmy żywe są układami otwartymi. Wymieniają z otoczeniem materię, pracę, energię cieplną. Zachodzi w nich wiele dynamicznych procesów, które jednak nie zmieniają struktury i funkcji organizmów (mówimy, że znajdują się one w stanie stacjonarnym – nie mylmy tego stanu ze stanem równowagi). Druga zasada termodynamiki jest zachowana. Entropia Uniwersum, na które składa się organizm i jego otoczenie wzrasta, bo rośnie entropia otoczenia. Z punktu widzenia termodynamiki procesów nieodwracalnych oznacza to, że gdzieś w układzie lub otoczeniu znajdują się pewne termodynamiczne bodźce (źródła energii, źródła entropii) oraz zachodzą pewne przepływy (przepływy masy, prądu elektrycznego, ciepła). W żywym organizmie te bodźce i przepływy są tak zorganizowane, że nie zmieniają stanu układu, zmieniają za to stan otoczenia. Dla przykładu, w gorącym pomieszczeniu pocimy się. Wydzielony pot paruje, jednocześnie pobierając ciepło potrzebne do przemiany fazowej z powierzchni skóry. W ten sposób organizm oddaje ciepło otoczeniu jednocześnie utrzymując stałą temperaturę. Energia cieplna ulega rozproszeniu. Entropia otoczenia wzrasta. Jest to typowy przykład działania układu (organizmu żywego) wobec otoczenia: należy wyrzucić z siebie, rozproszyć w otoczeniu narastającą ciągle entropię.

Dążenie to utrzymania stałej entropii przez homeostat można też przedstawić w innym świetle. W tym celu zauważmy, że entropia – miara chaosu jest wielkością przeciwstawną do ilości uporządkowanej informacji zgromadzonej w układzie. Używając więc niejako języka informatyki powiemy, że homeostat jest układem, którego działanie przeciwstawia się utracie informacji. Jest to całkowicie zrozumiałe zważywszy, że na przykład utrata informacji genetycznej organizmu nieuchronnie musiałaby skończyć się śmiercią nawet dorosłego osobnika, gdyż unicestwieniu uległyby wszystkie przepisy na produkcję białek.

Wymiana (przepływ) informacji pomiędzy organizmem i jego otoczeniem jest również istotna z punktu widzenia działania naszego *hardware* – mózgu. Powstanie pojęcia homeostatu zawdzięczamy pierwszemu, niezwykle prymitywnemu modelowi mózgu zbudowanymi przez Ashby'ego w celu badań procesów

samoorganizacji. Zauważmy, że organizmy wyposażone w sprawnie działający mózg są w stanie przyjąć bardziej efektywną strategię przetrwania.

Dotyczasowe rozważania, które pobieżnie dotyczą dość różnorodnych zagadnień związanych z działaniem homeostatów są ściśle, jeśli – jak to zwykle w nauce – przyjmie się bardzo upraszczające założenia. Konstruując model bardzo łatwo jest wskazać wyraźną granicę pomiędzy układem (do tej pory utożsamianym z organizmem żywym) a jego otoczeniem. W rzeczywistym świecie o tak wyraźnie zdefiniowaną granicę trudno, często nawet w laboratorium naukowca. Nie wchodząc w szczegółowe rozważania, gdzie w czasie i w przestrzeni zaczyna się i kończy organizm żywy (w czasie – w momencie poczęcia, trochę wcześniej lub później, w przestrzeni – na powierzchni skóry, pancerza, włosów lub piór) zauważmy, że organizm ssaka (układ) stanowi otoczenie dla żyjących w nim bakterii a zapewne również pierwotniaków, robaków, owadów itd. Z punktu widzenia bakterii żyjącej w naszym układzie pokarmowym nasz organizm to oczywiście otoczenie. Ale do życia bakteria potrzebuje organizmu żywego – a więc homeostatu. Okazuje się więc, że układem homeostatycznym nie jest jedynie pewien niewielki obszar ograniczony błoną komórkową w naszym jelicie lecz znacznie większy obszar zajmowany przez nasze czcigodne osoby.

Pozostawmy bakterie ich problemom. Spójrzmy za to, w jaki sposób takie rozszerzenie pojęcia homeostatu może wpłynąć na rozumienie relacji pomiędzy nami i naszym otoczeniem. Pojęcie homeostazy zaprowadziło nas zatem w krąg zainteresowań ekologii.

Na początek zauważmy, że sprawne funkcjonowanie przeciętnego mieszkańca wielkiego miasta pociąga za sobą konieczność sprawnego działania homeostatu złożonego z sieci dystrybucji pożywienia, odzieży, instalacji dostarczających wodę, energię i informację. Prawidłowe relacje pomiędzy elementami homeostatu – ludźmi zapewniają prawa stanowione i instytucje powołane do egzekwowania tych praw. Idąc tym tropem, prędzej czy później stwierdzimy, że nasze życie jest uwarunkowane przez złożony twór (społeczność, państwo), którego stan stacjonarny jest warunkiem niezbędnym naszego istnienia.

Tak, jak dla życia pojedynczego organizmu potrzebne jest między innymi pożywienie, dla życia „państwa-homeostatu” potrzebne są możliwości wytwarzania tego pożywienia, źródła energii, rozwój lub chociaż utrzymanie infrastruktury, jak również utrzymanie wszystkich bogactw, które muszą być eksploatowane obecnie lub które są jedynym rezerwuarem dla przyszłych zastosowań. Gdy przyjrzymy się z tego punktu widzenia wybranym przykładom z naszego otoczenia – włos się jeży. Można odnieść wrażenie, że nasz homeostat usiłuje popełnić samobójstwo (być może z pewną pomocą niektórych – niezbyt rozgarniętych – części składowych). Przypomnijmy chociażby takie kwestie, jak sprawa dywersyfikacji dostaw gazu czy uporczywe dążenie do całkowitego zniszczenia rezerwuarów nieskażonej przyrody (dolina Rospudy), niektóre prawa stanowione służące nie tyle ustalaniu relacji pomiędzy elementami homeostatu a raczej eliminowaniu niektórych z nich itd.

Stan naszego państwa-homeostatu nie napawa optymizmem. Stosując nadal metodę poszukiwań granicy pomiędzy homeostatem i jego otoczeniem szybko stwierdzimy, że jakkolwiek sprawne działanie państwa jest niezbędne do naszego istnienia, jednak ważniejsze dla nas jest utrzymanie działania homeostatu w skali globalnej. I może drugorzędną rolę odgrywają tutaj konflikty na skalę państw czy społeczności – przynajmniej tak długo, jak w konfliktach tych nie zostanie użyta broń masowego rażenia z bombą atomową czy termojądrową włącznie.

Jesteśmy dalecy od pełnego zrozumienia mechanizmu działania biotopu (czy raczej ekosystemu) Ziemi. Kataklizmy związane z ruchami płyt tektonicznych czy czynnością wulkaniczną bywają i naszych czasach – czasach rozwiniętych technologii – przyczyną setek tysięcy ofiar. Na razie pominiemy je jednak w dyskusji – hardware naszego homeostatu-Ziemi jeszcze nie dorósł, aby przeciwdziałać takim katastrofom.

Pojawia się jednak inny problem. Jeden z zasiedlających Ziemię gatunków, z uporem godnym lepszej sprawy, jest źródłem powiększającej się zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze. Z prowadzonych obecnie badań wyłania się obraz Ziemi jako bardzo delikatnego systemu autoregulacji. Wiemy, że poziom ditlenku węgla w ostatnich dekadach wzrasta. Obserwujemy zmniejszanie się mas lodu w strefach podbiegunowych i w wysokich górach. Nie wiemy natomiast, jaki jest cywilizacyjny udział we wzroście stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze. Nie znamy bowiem dynamiki uwalniania tych gazów w warunkach naturalnych. Dopiero poznajemy procesy składające się na tą dynamikę. Nie wiemy, jaki wpływ

na poziom gazów cieplarnianych ma wciąż trwająca dewastacja lasów w strefie międzyzwrotnikowej. Nie mamy również pojęcia czy tzw. efekt cieplarniany może przyczynić się po wielu latach do wzrostu, czy też do zmniejszenia się średniej temperatury atmosfery. Podstawowa trudność tkwi tutaj w kłopotach z oszacowaniem, jaki wpływ będzie miało zmniejszanie się zasolenia wody oceanicznej (topniejące lodowce są źródłem „wody słodkiej”) i wynikające stąd zmiany gęstości wody na układ głównych prądów morskich, w szczególności prądu El Niño i Prądu Peruwiańskiego odpowiedzialnych za zmiany klimatu na dużych połaciach kuli ziemskiej. Nie wiemy również, czy obserwowany obecnie wzrost aktywności Słońca jest zjawiskiem powtarzającym się cyklicznie i jak często można spodziewać się ociepleń wywołanych działaniem Słońca. Przy takiej ignorancji w sprawach klimatycznych nie wiemy nawet, czy wywołana przez nas emisja ditlenku węgla jest zasadniczą przyczyną obserwowanych obecnie zmian, czy też stanowi jedynie nic nie znaczący epizod w tle dużych naturalnych zmian klimatycznych Ziemi. Niemniej, Ziemia jest tylko jedna i nie możemy sobie pozwolić na doświadczenia klimatyczne w skali globalnej.

Charakterystyczną cechą reakcji na przewidywane konsekwencje efektu cieplarnianego, było zwołanie Rady Bezpieczeństwa, która wszczęła dyskusję na temat zagrożeń wynikających z migracji olbrzymich grup ludności związanych z podnoszeniem się poziomu mórz i oceanów. Zagrożenia te, to oczywiście ogromne obciążenie ekonomiczne krajów posiadających gęsto zaludnione obszary nadmorskie, problemy epidemiologiczne, ale też – zgodnie z klausewitzowskim stwierdzeniem, że wojna jest przedłużeniem polityki – wizja wojen wywołanych społecznymi i politycznymi konsekwencjami nadchodzących kataklizmów.

Na pocieszenie pomyślmy, że problem utrzymania homeostazy Ziemi, to przyszcz w skali Kosmosu. Co prawda zdarzające się regularnie, ale niezwykle rzadko w naszej skali czasowej, wybuchy supernowych nam nie grożą (nie ma niebezpiecznej kandydatki w pobliżu). Nie musimy również obawiać się bliskiego wejścia w zasięg efektywnego przyciągania grawitacyjnego czarnej dziury. Teorie kosmologiczne spekulujące na temat energii próżni uspokajają nas stwierdzając, że nawet jeżeli jest możliwe przejście fazowe próżni i nawet, jeżeli takie przejście miałyby miejsce, to i tak go nie zauważymy, bo proces rozchodziłby się z prędkością światła. Nasze pocziwe Słońce poświęci jeszcze około 5 miliardów lat zanim zamieni się w czerwonego olbrzyma i wysterylizuje Ziemię w temperaturze kilku tysięcy stopni Celsjusza. Mamy więc jeszcze trochę czasu.

Nie popadajmy jednak w błogostan wynikający z całkowitego braku zagrożeń kosmicznych. Otóż zagrożenia są i to całkiem realne. Przyjrzyjmy się kraterom powstałym po uderzeniach różnej wielkości ciał kosmicznych na powierzchni Ziemi czy Księżyca. Czy potrafimy takie kataklizmy przewidzieć i ewentualnie im przeciwdziałać? No cóż, odpowiedź jest dość złożona. Poza dobrze znanymi nam planetami składającymi się na Układ Słoneczny, na jego peryferiach poruszają się stosunkowo małe, ale dla nas groźne obiekty tworzące tak zwany pas Kuipera i znacznie bardziej oddalony obłok Oorta. Stamtąd właśnie pochodzą komety odwiedzające od czasu do czasu obszar układu w pobliżu orbity Ziemi. Znamy obecnie orbity pewnej liczby takich obiektów. Komety mogą być przyczyną spektakularnego widowiska, jak udowodniła to kometa Shoemaker-Levy uderzając w powierzchnię Jowisza. Na szczęście, wśród znanych nam komet o określonych orbitach nie ma obecnie takich, które groziłyby zderzeniem z Ziemią. Niestety nie oznacza to, że w obłoku Oorta, gdzie oddziaływanie grawitacyjne Słońca jest bardzo słabe, wzajemne oddziaływania pomiędzy krążącymi tam obiektami nie wytrąci któregoś z nich z orbity i nie pchnie w kierunku Ziemi. Czy zatem istnieje realne zagrożenie z tej strony? Nie wiemy.

Wiemy natomiast sporo na temat asteroidów, które krążą wokół Słońca w podobnej odległości jak Ziemia. Orbity części z nich mogą przecinać się z orbitą Ziemi. Jeśli znajdziemy ciało, którego orbita przecina orbitę Ziemi, i które obiega Słońce z inną prędkością kątową niż Ziemia, to zderzenie jest tylko kwestią czasu. Ostatnio astronomowie obserwacyjni zajmujący się wykrywaniem takich potencjalnych pocisków kosmicznych donieśli o pewnym potencjalnym niebezpieczeństwie. Niebezpieczeństwo jest związane z asteroidą Apophis – obiektem o średnicy około 250 m (prawdopodobnie znacznie większym od meteoru, który uderzył w okolicach Podkamiennej-Tunguskiej na Syberii w 1908 roku). Orbitę tej asteroidy dzięki pomiarom radarowym udało się wyznaczyć z dość dużą precyzją. Z obliczeń wynika, że kolejne zbliżenie Apophis z Ziemią będzie miało miejsce w piątek 13 kwietnia 2029 roku. Podczas tego zbliżenia Apophis nie uderzy w Ziemię. Przemknie nad jej powierzchnią na wysokości około 30-40 tysięcy kilometrów (to znaczy

w odległości porównywalnej z rozmiarami Ziemi). Będzie to pierwsze w historii znane zbliżenie tak wielkiego ciała niebieskiego z Ziemią. Obecne wyniki obliczeń nie pozwalają na dokładne wyznaczenie toru Apophis w pobliżu Ziemi w 2029 roku. A szkoda, gdyż z prawdopodobieństwem około 3 % (prawdopodobieństwo zamieni się w pewność w 2029 roku) pole grawitacyjne Ziemi tak zmieni orbitę Apophis, że w roku kolejnego zbliżenia (będzie to rok 2036 lub 2037) dojdzie do zderzenia. Niezbyt dokładna data ewentualnego zderzenia bierze się właśnie z niepewności orbity asteroidy w 2029 roku. Pomiary, które będą mogły być wtedy przeprowadzone pozwolą na pewną odpowiedź, czy asteroida uderzy w Ziemię. Jednak czas na ewentualną reakcję będzie bardzo krótki (Apohis krótko przebywa w okolicy Ziemi, potem szybko oddala się na odległość porównywalną ze średnicą orbity Ziemi).

Apophis jest stosunkowo małą asteroidą. Jej ewentualny upadek nie jest zagrożeniem dla życia na Ziemi, nie jest nawet poważnym zagrożeniem cywilizacji. Może jednak kompletnie zniszczyć obszar największej metropolii na świecie, a jej uderzenie w ocean może wywołać tsunami o niewyobrażalnie wielkim zasięgu. Katastrofa nie jest nieunikniona. Istnieją dość proste sposoby odchylenia orbity Apophis tak, aby nie uderzyła w Ziemię. Jednak przygotowanie ratunkowego przedsięwzięcia jest kosztowne i wymaga współdziałania. A więc, do normalnego arsenału ekologa walczącego o sprawne działanie homeostatu w jakim żyjemy należy dodać jeszcze skuteczne sposoby zmuszania polityków do logicznego myślenia i podejmowania sensownych decyzji.

*dr hab. Waldemar Nowicki
Zakład Chemii Fizycznej
Wydział Chemii UAM*