

# Żyjąca Ziemia



## Paweł M. Rowiński

Instytut Geofizyki, Warszawa

Polska Akademia Nauk

pawelr@igf.edu.pl

Prof. dr hab. Paweł Rowiński jest dyrektorem IGF PAN, zajmuje się modelowaniem matematycznym przepływów turbulentnych, procesami rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń oraz rumowisk w powierzchniowych wodach płynących i metodami statystycznymi w hydrogeologii



## Wojciech Dębski

Instytut Geofizyki, Warszawa

Polska Akademia Nauk

debski@igf.edu.pl

Dr hab. Wojciech Dębski jest profesorem PAN, dyrektorem ds. naukowych IGF PAN, zajmuje się badaniami sejsmiczności indukowanej działalnością górniczą, metodami inwersyjnymi w sejsmologii i numerycznymi technikami modelowania

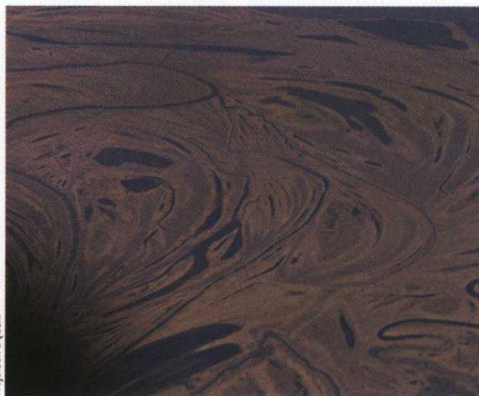
**Wielkie katastrofy naturalne, których byliśmy świadkami w ostatnich latach, takie jak niespotykana sekwencja powodzi na terenie Polski w 2010 r. czy wybuch wulkanu Eyjafjallajökull na Islandii, a także obserwowane zmiany klimatyczne skłaniają do wielowątkowej refleksji nad naszym stanem wiedzy o planecie, na której żyjemy**

Jednym z aspektów trudności, jakie napotyka nauka w zrozumieniu tego, co dzieje się wokół nas w środowisku naturalnym, jest olbrzymia złożoność i wzajemne przenikanie się i oddziaływanie wielorakich procesów fizyko-chemicznych, często charakteryzujących się skrajnie różnymi skalami czasowymi, energetycznymi itp. Ten skomplikowany, ewoluujący w czasie naturalny system, czyli „żyjąca Ziemia”, jest dodatkowo poddawany zarówno istotnym wpływom zewnętrznym, jak również modyfikowany jest przez samych mieszkańców Ziemi. Stajemy wobec

podwójnego, niezwykle skomplikowanego problemu rozwikłania relacji przyczynowo-skutkowych pomiędzy różnymi zjawiskami i procesami z jednej strony oraz matematycznego opisu tej niezwykle złożonej rzeczywistości z drugiej strony. Warto tu wspomnieć słowa Alfonsa z Kastylii (XIII w.): „Gdyby Bóg poradził się mnie, zanim rozpoczął dzieło tworzenia świata, zaproponowałbym Mu coś mniej skomplikowanego”. Złożoność systemu ziemskiego porażała człowieka od zawsze, od kiedy rozpoczął próby jego zrozumienia.

## Źródła życia

Jakie warunki są konieczne, aby na Ziemi mogło powstać i rozwinąć się życie? Pierwszym elementem, który musimy wziąć pod uwagę, jest zapotrzebowanie na energię. Na powierzchnię Ziemi energia ta dostarczana jest dwoma kanałami. Pierwszym z nich jest energia cieplna pochodząca z wnętrza Ziemi i będąca głównie sumą energii cieplnej z okresu utworzenia Ziemi jako planety oraz ciepła związanego z naturalnymi rozpadami promieniotwórczymi wewnątrz Ziemi. Drugim kanałem dostarczania energii na powierzchnię Ziemi jest absorpcja energii słonecznej. Strumień energii docierającej do Ziemi wynosi około 340 W/D m<sup>2</sup>, z czego około 30% jest odbijane przez Ziemię, a pozostała część jest absorbowana na powierzchni Ziemi. Słońce – podstawowe źródło energii, będące de facto olbrzymim reaktorem ter-



Skomplikowany wielokorytowy układ meandrujących rzek (wschodnia Syberia) stanowi olbrzymi problem dla poprawnego opisu matematycznego dynamiki przepływu

Wojciech Dębski



Wojciech Dębski

Skomplikowana geometria płaszczyzny rozrywu (uskoku), wzdłuż której nastąpiło przesunięcie gruntu na długości około 15 km i głębokościach około 16 km w czasie trzęsienia ziemi o magnitudzie  $M=7,3$  (Kobe, Japonia 1995 r.)

mojądrowym, jest dla Ziemi równocześnie podstawowym zagrożeniem. Wiatr słoneczny, czyli zjonizowane cząstki powstające w procesach termojądrowych na Słońcu, jest w stanie w bardzo krótkim czasie zniszczyć wszystkie bardziej zaawansowane struktury biologiczne. Elementem systemu pozwalającym na to, żeby na Ziemi było życie, są także zasoby wodne naszej planety, które biorą udział w tzw. cyklu hydrologicznym, łączącym atmosferę z litosferą. Napędzającą siłą tego cyklu jest znowu energia cieplna Słońca, dzięki której zachodzi parowanie i unoszenie cząstek wody do atmosfery. Brak wody jest bodaj największym zagrożeniem globalnym dla ludzkości.

### Dlaczego na Ziemi?

Odpowiedź na pytanie, dlaczego na Ziemi mogło powstać życie, kryje się głęboko pod naszymi stopami. Tam bowiem, na głębokości ponad 2900 km, zaczyna się jądro zewnętrzne, będące źródłem pola magnetycznego Ziemi. To właśnie ziemskie pole magnetyczne w obszarze przestrzeni kosmicznej okołoziemskiej powoduje, że prawie cały wiatr słoneczny jest odpychany od Ziemi, chroniąc życie przed wysokoenergetycznymi cząstkami ze Słońca. Cząstki, którym uda się przedostać przez tę warstwę ochronną, trafiają w okolice biegunów magnetycznych Ziemi i – absorbowane w górnych warstwach atmosfery – są

źródłem przepięknych zorcz polarnych. Słońce oprócz cząstek plazmy wysyła w kierunku kuli ziemskiej także olbrzymie ilości energii w postaci promieniowania elektromagnetycznego. Część z tego promieniowania w zakresie widzialnym, podczerwieni, a także bliskiego ultrafioletu jest błogosławieństwem dla życia na Ziemi. Jednakże część ultrafioletowa, promieniowanie rentgenowskie i fale o jeszcze wyższych częstotliwościach są zabójcze dla wszelkich form biologicznych. Z pomocą w usunięciu tej części promieniowania przychodzi atmosfera, która poprzez swój specyficzny skład chemiczny powoduje absorpcję i konwersję tego promieniowania, praktycznie eliminując 99% niebezpiecznego dla życia promieniowania. Obecność gorącego, płynnego jądra zewnętrznego wywołuje w górnym płaszczu Ziemi bardzo silne ruchy konwekcyjne, w wyniku których sztywne masy skalne tworzące skorupę i górny płaszcz poruszają się względem siebie. Ruchy te, choć niewielkie w skali globu, rzędu pojedynczych milimetrów na rok w krajach tektonicznie spokojnych (jak Polska) do kilkunastu centymetrów rocznie (np. Japonia), powodują trzęsienia ziemi, wulkanizm i pochodne katastrofy. Podobnie atmosfera, będąc w stanie bardzo chwiejnej równowagi, gwałtownie reaguje na czynniki zaburzające, prowadząc w efekcie nie tylko do takich katastrof naturalnych jak

## Zastosowanie modeli matematycznych do opisu zjawisk przyrody nieożywionej



Paweł M. Rowiński

Przepływy turbulentne, choć malownicze i powszechnie spotykane, ciągle pozostają poza naszymi możliwościami pełnego opisu matematycznego

tajfuny, trąby powietrzne, ale także zjawisk znacznie dłuższych w skali czasu, takich jak katastrofalne susze lub opady. Niezwykle ważnym elementem systemu w kontekście jego złożoności jest klimat, rozumiany jako statystyczny stan atmosfery. Klimat ziemski nie jest oczywiście stały i ulega zmianom na skutek zmian parametrów ruchu obiegowego Ziemi, aktywności Słońca czy też nachylenia osi Ziemi. Ostatnio gorącą dyskusję wywołuje prawdopodobny wpływ człowieka na globalny rozkład przenoszenia energii i masy (wody i powietrza), a w konsekwencji na naturalne trendy klimatyczne. Antropopresja jest zatem stosunkowo nowym, ale niezwykle istotnym elementem, który należy rozważyć w próbach zrozumienia skomplikowanego systemu, jakim jest Ziemia.

### Złożoność natury a matematyka

Michał Heller w swojej pasjonującej wędrówce po historii fizyki i kosmologii „Podglądanie Wszechświata” zauważył, że rola doświadczenia sprowadza się do inspirowania, kontrolowania, potwierdzania lub obalania teoretycznych konstrukcji, wgląd do badanego obszaru świata zaś dają nie doświadczenia, lecz struktury matematyczne. Struktury te pozwalają na konstrukcje

tzw. modeli matematycznych, czyli uproszczonej reprezentacji rzeczywistości. Bardzo istotnym zagadnieniem przy próbach opisu i analiz jest stopień złożoności tych opisów matematycznych. Niestety, modele mogą być używane jedynie przez najwyższej klasy specjalistów. Modelowanie różnych procesów stanowi bardzo ważne wyzwanie, a skonstruowane modele pozwalają na przewidywanie różnego typu procesów, np. analizę „odpowiedzi” rzek na zmiany w zasilaniu wodą i rumowiskiem. Szczególnego znaczenia nabiera badanie „odpowiedzi” rzek na przepływy powodziowe. Powodzie wywołują kaskadę procesów fizycznych, które zmieniają zarówno sam strumień rzeczny, jak i obszary przybrzeżne - mogą być traktowane jako wielkie naturalne zaburzenia systemu. Pomimo olbrzymiego wysiłku wielu centrów badawczych sukcesy w modelowaniu przepływów powodziowych są wciąż dość umiarkowane, co świadczy o naszych olbrzymich niedostatkach w zrozumieniu procesów. Konstruując modele matematyczne i zapisując je w abstrakcyjnej matematycznej formie, często napotykamy zasadnicze problemy związane z ich strukturą. Przykładem mogą być równania przepływu. Równania te okazują się niezwykle uniwersalne, opisują

zarówno stan atmosfery, przepływy w oceanach, jak i, choć w innej skali, strumieniach rzecznych. Z kolei w czasowej skali geologicznej (miliony lat) są one wykorzystywane do opisu konwekcji materiału w płaszczu Ziemi i związanych z tym zjawisk, na przykład ruchu płyt tektonicznych. Niestety, istnieją olbrzymie problemy z jednoznacznością rozwiązań. Ogromną wrażliwością rozwiązań na zaburzenia warunków początkowych czy też parametrów modelu charakteryzują się tzw. modele chaosu. Tłumaczą one tzw. efekt motyla (wg określenia meteorologa Lorenza) – możliwość wywołania tornado na południu Stanów Zjednoczonych na skutek trzepotu skrzydeł motyla gdzieś w Azji. Natura matematyczna stosowanych równań (ich nieliniowość) tłumaczy również ciągłe niepowodzenia w konstruowaniu długoterminowych prognoz pogody. Fantastycznym przykładem, zjawiskiem wszechobecnym na Ziemi i w jej otoczeniu, jest turbulencja, która jest tak naprawdę wynikiem utraty stabilności. Jest to też zjawisko spędzające sen z powiek wielu uczonym, wciąż bowiem zaskakuje i nie daje się w pełni uchwycić. Przepływy turbulenty, z jakimi mamy do czynienia w atmosferze, plazmie, oceanach, rzekach, charakteryzują się oddziaływaniem na siebie różnych struktur o całym spektrum rozmiarów i czasów żywotności. Te oddziaływania generują fluktuacje prędkości we wszystkich kierunkach. Tylko największe wiry powstają jako wynik niestateczności ruchu uśrednionego. One z kolei, w sprzyjających warunkach, rozpadają się na mniejsze, oddając im część swojej energii. Wraz ze zmniejszaniem skali wirów wpływ tarcia rośnie i staje się istotny, określając rozmiar najmniejszych wirów. W przepływie turbulentnym istnieją zatem wiry o ciągłym spektrum skal, których ruch wzajemnie się na siebie nakłada. To fascynujące zjawisko leży u podstaw procesów mieszania, wymiany masy i energii w wodzie i powietrzu. Jest ono odpowiedzialne również za wiele drobnych anomalii pola magnetycznego ziemskiego.

### Przewidzieć przyszłość

Bardzo istotna w budowaniu modeli matematycznych służących do interpretacji i oceny przeszłych zachowań, ale również badań scenariuszowych czy też prognostycznych jest ocena roli niepewności.

Środowisko Ziemi, w którym żyjemy i za które jesteśmy odpowiedzialni, jest niezwykle skomplikowanym systemem wzajemnie połączonych procesów, zwykle nieliniowych o rzadko spotykanej rozpiętości charakterystycznych skal przestrzennych i energetycznych. Złożoność systemu i jego zmiany w czasie, które obecnie możemy śledzić wyrafinowanymi technikami obserwacyjnymi lub próbować odtworzyć z dostępnych nam „zapisów” geologicznych, jest nadzwyczaj skomplikowana. W efekcie przy obecnym stanie wiedzy jesteśmy w stanie tylko wrywkowo i w krótkim czasie opisywać i modelować, przy akceptowalnym stopniu dokładności, otaczające nas procesy naturalne. Niemniej wysiłek włożony w próbę poznania otaczającego nas świata i jego matematycznego opisu przynosi coraz więcej wymiernych efektów. Rozwój technik obserwacyjnych i stosowanie technik modelowania pozwala w wielu wypadkach istotnie zminimalizować społeczne skutki gwałtownych zjawisk natury, takich jak powodzie, huragany, fale tsunami, a także, choć w mniejszym stopniu, trzęsienia ziemi. Ten ostatni element ciągle „wymyka się nam z rąk”, choć doświadczenia ostatnich lat pokazują, że jesteśmy w stanie nauczyć się żyć niejako w symbiozie z trzęsieniami ziemi. ■

### Chcesz wiedzieć więcej?

- Sornette D. (1999). Earthquakes: from chemical alteration to mechanical rupture. *Physics Reports*, 313, 237-291.  
 Stacy F.D., Davis P.M. (2008). *Physics of the Earth*, Cambridge University Press.  
 Schumm S. (2005). *River Variability and Complexity*, Cambridge University Press.

**Proces wysychania gleby jest łatwo dostępnym przykładem olbrzymiej złożoności procesów geofizycznych prowadzących do skomplikowanych struktur przestrzennych**



www.ssc.hu