

# Słońce a klimat

Tomasz KWAST

O zależności Ziemi i licznych, zachodzących na niej, zjawisk od Słońca nikogo nie trzeba przekonywać. Bywa raczej odwrotnie, tzn. niektórzy są skłonni dopatrywać się decydującej roli Słońca tam, gdzie jest to nieuzasadnione, a przynajmniej nie dowiedzione. Na poparcie tych domniemyanych więzi przytacza się różne statystyki, zapominając o tym, że statystyka jest cierpliwa, korelować można wszystko ze wszystkim, tylko że na końcu i tak nie wiadomo, czy korelacja – jeżeli w ogóle wystąpi – jest przypadkowa, czy jest skutkiem jakiejś fizycznej więzi. Nierzadko w prognozie pogody słyszymy np., że następny dzień będzie ciężki dla meteopatów, bo nadciąga niż. Tymczasem naturalne jest, że ponura pogoda działa na wszystkich przynębiająco, nikt nie lubi gwałtownych zmian ciśnienia, za to jeżeli ktoś akurat dostał podwyżkę, to najbardziej ponura pogoda nie zepsuje mu nastroju. Tak więc ostrożnie z tego rodzaju statystykami, bo można by uwierzyć nawet w to, że konfiguracja planet w chwili urodzenia człowieka określa jego charakter i losy.

Niemniej jednak Ziemia od Słońca otrzymuje konkretną ilość energii, która określa średnią temperaturę i w ogóle klimat. W ciągu roku Słońce silniej oświetla to północną, to znowu południową półkulę Ziemi – wskutek pochylenia ziemskiej osi obrotu – i wynikiem tego są pory roku. W ciągu roku zmienia się też odległość Ziemi od Słońca, a więc ilość energii, otrzymywanej od Słońca, lekko się zmienia. Jednak jest to efekt bardzo mały, gdyż spłaszczenie orbity ziemskiej jest niewielkie, a poza tym ilość ta uśrednia się już po roku. Chcielibyśmy wiedzieć, czy w dłuższych okresach czasu zmiany zachodzące na Słońcu mają wpływ na klimat Ziemi. Najpierw trzeba więc stwierdzić, czy takie zmiany na Słońcu w ogóle zachodzą. Nie ma wątpliwości, że Słońce przechodzi 11-letni (średnio) cykl aktywności. W okresie tym zmienia się liczba plam, magnetyzm i całkowite natężenie promieniowania słonecznego. Minimum cyklu to minimum liczby plam, w tym też czasie pole magnetyczne na powierzchni Słońca jest najslabsze i – co nie jest oczywiste – najslabsze jest też całkowite promieniowanie Słońca. Inaczej mówiąc, zaplamione Słońce świeci silniej, gdyż plamom towarzyszą liczne obszary aktywne, które z nadmiarem rekompensują zmniejszenie się świecącej normalnie powierzchni Słońca. Zmiany te są zresztą bardzo małe. Ziemia otrzymuje od Słońca średnio  $1,372 \text{ kW/m}^2$  (jest to tzw. stała słoneczna), a wspomniane zmiany to w przybliżeniu o jednostkę na trzecim miejscu dziesiętnym, może trochę więcej. Ten 11-letni cykl aktywności Słońca przejawia się w rozmaitym natężeniu występowania zórz polarnych, okresowych trudnościach w łączności radiowej, różnym napromieniowaniu Ziemi przez energetyczne cząstki pochodzenia kosmicznego itd. Czy jednak ma to znaczenie dla klimatu? Jeżeli nawet kroniki zanotują, że były lata chłodne i gorące, to nie nazwiemy tego zmianami, lecz fluktuacjami klimatu, bo 11 lat to za mało, by już orzekać o zmianie klimatu.

Czy na Słońcu zachodzą zmiany o dłuższym okresie? Tu już sprawa nie jest prosta, bo nawet to, co najłatwiej zaobserwować, czyli plamy, ludzkość śledzi (w każdym razie systematycznie) nie dłużej niż od wynalezienia teleskopu, czyli od niecałych 400 lat. Wiadomo, że w tym okresie wystąpiło jedno bardzo długie minimum aktywności Słońca (tzw. minimum Maundera) w latach 1640–1700, któremu towarzyszyło dość istotne oziębienie, przynajmniej w Europie. Nie ma też żadnych wzmianek o zorzach z tego okresu, podczas zaćmień praktycznie nie było widać korony słonecznej,

(i później) ciągle pojawiały się twierdzenia o niezależności różnych zdań od teorii mnogości ZFC. Istnieje jednak bardziej pozytywna strona badań w teorii mnogości: niemal wszystkie te zdania niezależne dają się jednak udowodnić lub obalić w dwóch naturalnych poduniwersach, mianowicie poduniwersum zbiorów konstruowalnych  $L$  oraz (przy użyciu hipotez o istnieniu dużych liczb kardynalnych) we wspomnianym wyżej poduniwersum  $L[\mathbf{R}]$ .

W związku z tym motywem przewodnim badań teorii mnogości stały się tzw. duże liczby kardynalne. Różnych klas takich liczb jest wiele – skoncentrujemy się tutaj na dyskusji jednego ich rodzaju, mianowicie liczb mierzalnych. Oto mianowicie liczbę kardynalną  $\kappa$  nazywamy mierzalną, jeśli dla zbioru  $X$  mocy  $\kappa$  w rodzinie wszystkich podzbiorów zbioru  $X$  istnieje taka miara o wartościach  $0, 1$ , że miara każdego zbioru jednoelementowego jest równa  $0$ , miara całego zbioru  $X$  jest  $1$ , suma zaś mniej niż  $\kappa$  zbiorów miary  $0$  ma miarę  $0$ . Na granice teorii mnogości ZFC nie można udowodnić istnienia liczb mierzalnych, dlatego że w uniwersum  $L$  nie ma odpowiednich miar. Ale założenie istnienia liczb mierzalnych, lub innych dużych liczb kardynalnych, ma liczne ciekawe i głębokie konsekwencje w analizie rzeczywistej i kombinatoryce, szczególnie jej części dotyczącej zbiorów nieskończonych.

Praktykujący matematyk, algebraik albo analityk, nieczęsto styka się z problemami niezależnymi od teorii mnogości ZFC. Fakt ten jest zadziwiający, bowiem teoria mnogości została odkryta przez Cantora ponad 100 lat temu. Mimo że matematyka jest stale inspirowana przez nauki przyrodnicze (opisy rzeczywistości fizycznej), prawie nigdy nie prowadzi nas do zdań niezależnych od ZFC lub do nowych aksjomatów. Co więcej, w ostatnich latach wiele słynnych problemów (np. hipotezy Fermata oraz Bieberbacha) zostało rozwiązanych przy użyciu bardzo słabych podteorii teorii ZFC. Zważmy, że sama niezależność jakiegoś zdania od teorii mnogości nie mówi nam nic o prawdziwości tego zdania. Mówi ona tylko, że takie zdanie jest fałszywe w jakimś uniwersum będącym modelem teorii ZFC. Tak więc wyniki o niezależności różnych zdań zazwyczaj mówią tylko o tym, co się dzieje w pewnych poduniwersach. Jeśli ograniczymy się do uniwersum zbiorów konstruowalnych, to otrzymamy zupełnie inny obraz struktury zbiorów liczb rzeczywistych, niż w uniwersum złożonym

ze zbiorów konstruowalnych z miary o wartościach 0, 1 na liczbie mierzalnej. Natomiast budowanie uniwersum wszystkich zbiorów jest procesem, który nie zakończył się (i prawdopodobnie nigdy się nie zakończy).

Szczególnie jasno widać rolę różnych uniwersów, gdy spojrzeć na konsekwencje aksjomatu determinacji. W latach 60. Mycielski i Steinhaus rozważali zdanie o istnieniu strategii zwycięskich dla klasy gier pozycyjnych należących do  $L[\mathbf{R}]$ , zwane *aksjomatem determinacji*. Istnienie takich strategii okazało się bardzo silnym założeniem (przeczącym aksjomatowi konstruowalności). Co więcej, aksjomat determinacji daje wiele konsekwencji zgodnych z intuicją fizyczną i pozwala rozwiązać wiele problemów dotyczących struktury zbioru liczb rzeczywistych i jego podzbiorów. Determinacja dostarczyła nowego impetu badaniom deskryptywnej teorii mnogości (tj. teorii definiowalnych podzbiorów tzw. przestrzeni polskich, czyli przestrzeni metrycznych ośrodkowych i zupełnych). W ostatnich latach Martin, Woodin i Steele wykazali, że istnienie owych strategii dla gier w  $L[\mathbf{R}]$  wynika z aksjomatów istnienia „dużych” liczb kardynalnych.

Teoria mnogości odgrywa dziś rolę analogiczną do tej, jaką geometria Euklidesa grała przez ponad półtora tysiąca lat – do odkryć Newtona i Leibniza, mianowicie jest teorią uniwersalną dla współczesnej matematyki. Ale jej aksjomatyka nie jest zupełna. Niekiedy w trakcie rozwoju matematyki napotykały nowe zasady dotyczące zbiorów, na przykład aksjomat determinacji dla klasy  $L[\mathbf{R}]$ . Rozwój matematyki zadecyduje, które z tych i innych nowych aksjomatów, jakie niechybnie się pojawiają, będą powszechnie akceptowane w końcu XXI wieku.

Na zakończenie omówienia teorii mnogości podkreślimy raz jeszcze, że teoria mnogości ZFC wystarcza do wyprowadzenia całej niemal współczesnej matematyki. Nie wiemy, dlaczego tak się dzieje, aksjomatyka pochodzi z początku wieku (z roku 1908), a mimo to po dziś dzień 99% wyników matematycznych nie wymaga środków spoza ZFC. Wzmocnienia ZFC aksjomatami istnienia dużych liczb kardynalnych nie są inspirowane przez zastosowania, lecz raczej przez pojęcia tworzone w wyobraźni ludzkiej i nie mające interpretacji fizycznych. Tylko aksjomat determinacji dla  $L[\mathbf{R}]$  inspirowany jest przez intuicje fizyczne.

Część trzecia ukaże się w *Delcie* 1/2000.

a obecne pomiary zawartości węgla  $^{14}\text{C}$  dowodzą jego zwiększonej ilości w substancjach organicznych z tamtych czasów, bowiem słabe słoneczne pole magnetyczne nie chroniło Ziemi przed cząstkami promieniowania kosmicznego, produkującymi w atmosferze promieniotwórczy węgiel z azotu. Informacje o temperaturze na Ziemi są jeszcze uboższe, rzetelne obejmują ostatnie 250 lat, ale chyba do dziś trudno mówić, że dotyczą całej Ziemi. Wynika z nich, że temperatura jest skorelowana nie z fazą cyklu, lecz z jego długością, przy czym w okresie długich cykli (około lat 1800, 1855 i 1900) następowało obniżenie się średniej temperatury na półkuli Ziemi, zresztą zaledwie o mniej niż jeden stopień. Jest nawet gorzej, gdyż minimum temperatury czasem następowało po najdłuższych cyklach aktywności Słońca, a czasem przed. Jest więc korelacja, ale czy także związek fizyczny?

Badanie tych zagadnień stwarza chyba więcej nowych pytań niż daje odpowiedzi na dawne pytania. Próby odtwarzania związków Ziemia-Słońce choćby w czasach historycznych są jeszcze bardziej zawodne. Wiadomości o klimacie są wrywkowe, a płam i tak nikt nie obserwował. W odniesieniu do czasów dawniejszych niepewność jest jeszcze większa. O temperaturze na danym obszarze próbuje się wnioskować np. na podstawie śladów roślinności w odpowiednich warstwach geologicznych, nigdy jednak nie ma pewności, czy pyłki roślin znajdujące w tych warstwach pochodzą akurat z tego terenu, czy zostały przywiane przez wiatr. Dlatego wyciąganie wniosków z takich obserwacji pośrednich jest i trudne, i niepewne.

Rzecz jasna, nonsensem byłoby twierdzić, że ziemski klimat nie zależy od Słońca. Jednak udokumentowane zmiany aktywności Słońca powodują bardzo niewielkie zmiany stałej słonecznej i – jak widzimy – bardzo niewielkie zmiany temperatury na Ziemi. Zapewne jedno z drugim wiąże się, chcielibyśmy jednak umieć oddzielić wpływ Słońca od innych czynników określających ziemski klimat. Wydaje się, że nastanie i ustąpienie epok lodowcowych wywoływane są zmianami w przebiegu wielkich prądów morskich, a te z kolei wypiętrzaniem się lub zanikaniem łądów, czyli ogólnie ruchem płyt tektonicznych. Ale np. wyginięcie dinozaurów 65 mln lat temu nastąpiło chyba z innych przyczyn. Coraz bardziej przebija się hipoteza upadku wielkiego meteorytu – prawdopodobnie na skraj Jukatanu – co doprowadziło do takiego zapylenia atmosfery, że z braku światła wyginęła roślinność, a w konsekwencji z głodu dinozaury. Jednak według innej hipotezy Słońce przechodziło w owym czasie przez gęstsze obszary ramienia spiralnego naszej Galaktyki i to oddziaływanie Słońca z gęstą materią międzygwiazdową mogło spowodować znaczne oziębienie klimatu Ziemi. Wreszcie może w ogóle nie ma powodów do przejmowania się zmiennością Słońca, a bardziej drastyczne zmiany klimatu może wywołać wzmożona aktywność wulkaniczna Ziemi lub nawet działalność człowieka, systematycznie zanieczyszczającego środowisko naturalne. Niektórzy twierdzą, że już obserwujemy ocieplenie klimatu, co przypisuje się wzbogaceniu atmosfery w dwutlenek węgla i zwiększenie przez to efektu szklarniowego. Konkurencja z kolei dowodzi, że jest to niemożliwe, gdyż oceany i tak wchłoną każdą (powiedzmy – do pewnych granic), wyprodukowaną przez człowieka, ilość dwutlenku węgla, tak że skład atmosfery jeszcze długo się nie zmieni. Badanie tych zjawisk na pewno jest nie tylko zaspokajaniem naukowej ciekawości, gdyż może dać człowiekowi bardzo konkretne wskazówki co do postępowania w przyszłości. Niestety, jak dotąd wniosek jest raczej pesymistyczny, mianowicie zbyt wiele jest tu niewiadomych. Nie zmienia to faktu, że przyjemnie jest, jeżeli powietrzem daje się oddychać, a wody ze źródła można się napić, więc lepiej zbyt intensywnie z naszą planetą nie eksperymentować.