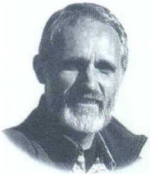


Czy klimat się zmienia?

Ciepłej czy chłodniej?



Prof. dr hab. Leszek Marks jest geologiem czwartorzędu, specjalizuje się w kartografii geologicznej oraz badaniu dawnych i obecnych lodowców. Wiele uwagi poświęca popularyzacji pogłębionego podejścia do problematyki zmian klimatu

LESZEK MARKS

Instytut Geologii Podstawowej
Uniwersytet Warszawski, Warszawa
Przewodniczący Komitetu Badań Czwartorzędu
Polska Akademia Nauk
leszek.marks@uw.edu.pl

Czy zmiany klimatu, które dziś obserwujemy, są naprawdę tak niezwykle? Badania nad systemem klimatycznym Ziemi dowodzą, że zmiany zachodzą cyklicznie od milionów lat

Pogoda i klimat to zjawiska przyrodnicze, które codziennie wpływają na nasze życie. Początek zmiany klimatu nie jest łatwy do zaobserwowania, chociaż ocieplenie może spowodować, że pogoda chłodna będzie występować rzadziej, ciepła zaś – częściej. W przeszłości geologicznej zmiany klimatu były wielokrotnie bardziej drastyczne niż obecne, lecz rozwinięte społeczeństwa ludzkie pojawiły się na Ziemi dopiero niedawno, w okresie stosunkowo stabilnym pod względem klimatycznym. Dlatego obserwowana w ostatnich latach wyraźna, choć niewielka zmiana klimatu może budzić niepokój i sprawia, że związane z nią zagadnienia zyskują na znaczeniu.

System klimatyczny jest złożony, sterowany przez zjawiska zachodzące w atmosferze, oceanach, kriosferze (lodowcach i wieloletniej zmarzlinie), litosferze (skorupie Ziemi) i biosferze. Poszczególne elementy systemu są powiązane licznymi sprzężeniami zwrotnymi o zasięgu nawet milionów lat, a przez to trudnymi do prognozowania.

Można powiedzieć w uproszczeniu, że klimat na Ziemi jest kształtowany przez wzajemne oddziaływanie jej powierzchni i atmosfery, przede wszystkim w reakcji na dość regularne zmiany natężenia promieniowania słonecznego. Zmiany klimatu zachodzą w wielu cyklach, od milionów do dziesiątków lat, przy czym dłuższe są zwykle wywoływane przez czynniki pozaziemskie, a krótsze – przez regionalne i lokalne. Nakładają się na

to skutki innych, nie zawsze w pełni rozpoznanych zjawisk naturalnych.

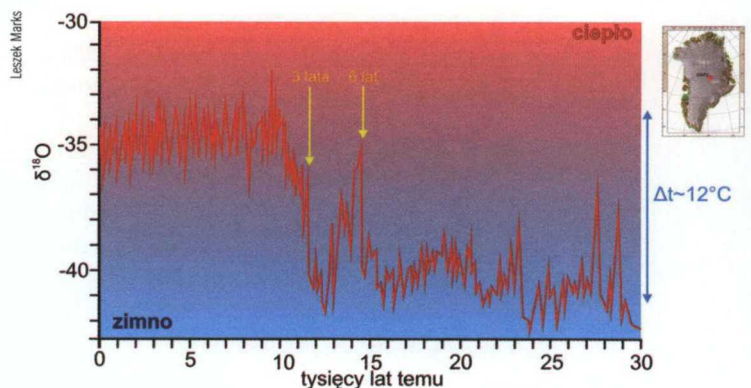
Na pograniczu stref

Wielkość radiacji słonecznej docierającej do powierzchni Ziemi zmienia się cyklicznie wskutek zmian jej orbity (tzw. *efekt Milankovicia*): cykl ekscentryczny (około 100 tysięcy lat) wynika ze zmiany kształtu orbity ziemskiej wokół Słońca, cykl skośny (około 41 tysięcy lat) jest spowodowany przez zmianę nachylenia równika ziemskiego do ekliptyki, cykl precesyjny (średnio około 23 tysięcy lat) wynika ze zmiany nachylenia osi ziemskiej.

Najważniejszą rolę spośród czynników ziemskich sterujących pogodą i klimatem odgrywiają prądy oceaniczne. W strefie równikowej Oceanu Spokojnego i Oceanu Indyjskiego powstaje potężny prąd powierzchniowy, który transportuje ku zachodowi ogromne masy ciepłej wody i dociera aż do północnego Atlantyku. Na skraju Arktyki wody tego prądu ochładzają się i zagłębiają w oceanie, wędrując z powrotem w postaci prądów głębinowych. Taka cyrkulacja oceaniczna prowadzi do redystrybucji ciepła na kuli ziemskiej, a ogrzewanie dolnych warstw atmosfery w strefie występowania ciepłych prądów sprzyja utrzymywaniu się łagodniejszych warunków klimatycznych na otaczających lądach.

Zmiany klimatu można identyfikować w różny sposób, zależnie od skali zjawiska, odległości w czasie i pożądanej dokładności. Są one szczególnie wyraźnie odczuwane

Stosunek izotopów tlenu ($\delta^{18}\text{O}$) w rdzeniu lodowym GISP2 na Grenlandii wskazuje na gwałtowne zmiany temperatury pod koniec plejstocenijskiej epoki lodowej (według Broecker, 1997; znacznie zmodyfikowane)





Leszek Marks

Ocieplenie klimatu może doprowadzić do powiększenia się obszarów pustynnych. Na zdjęciu fragment pustyni Negew w Izraelu

na pograniczu różnych stref klimatycznych. Zjawiska długotrwałe mogą zaznaczać się bardzo słabo, natomiast te o ogromnym natężeniu, ale trwające krótko, mogą mieć efekt dominujący. Ślady zmian są zapisane w osadach oraz w szczątkach organicznych, można je interpretować na podstawie różnych wskaźników środowiskowych, między innymi takich jak zmiany zasięgu lodowców i poziomu morza, rozprzestrzenienia stref roślinnych, granicy wiecznego śniegu oraz intensywności ruchów masowych i erozji.

Pierwsza stacja meteorologiczna powstała w Bawarii w 1781 roku i dopiero od tego czasu dysponujemy wynikami podstawowych pomiarów instrumentalnych. Wieloletnie wyniki pomiarów nie są jednak w pełni porównywalne, ponieważ część z nich pochodzi ze stacji meteorologicznych położonych niegdyś na obrzeżach miast, a obecnie znajdujących się w ich centrach, które stały się „miejskimi wyspami ciepła”.

Odczytywanie historii

Dla stwierdzenia zmian klimatu w przeszłości można korzystać z informacji zawar-

tych w dokumentach historycznych. Są to nie tylko bezpośrednie opisy pogody, ale między innymi również daty rozpoczęcia zbiorów, zamarzania i rozmarzania portów, długość sezonu wegetacyjnego, zmiany wielkości połowów ryb i cen zbóż oraz wzmianki o modlitwach o deszcz.

Ogólnoświatowe zmiany poziomu morza są ściśle powiązane ze zmianą ilości wody gromadzonej w lodowcach podczas ochłodzenia i jej uwalnianiem w czasie ocieplenia. W ciągu ostatnich 100 lat poziom oceanu światowego podnosił się średnio o 1-2 mm rocznie, powodując zalewanie nisko położonych wybrzeży oraz niszczenie klifów nadbrzeżnych.

Powierzchnia gruntu nagrzewa się wskutek radiacji słonecznej, co wpływa również na temperaturę głębiej położonych warstw. Wprawdzie intensywność tego procesu zależy od pokrywy roślinnej, ale można w ten sposób określić zmiany temperatury powierzchni gruntu w ciągu ostatnich kilkadziesiąt tysięcy lat.

Najważniejszym źródłem informacji geologicznej o zmianach klimatu w ciągu ostatnich

Czy klimat się zmienia?

milionów lat są osady głębokomorskie i rdzenie lodowe uzyskane z wierceń w lądolodach Grenlandii i Antarktydy. Szczególnie istotny jest pomiar stosunku zawartości izotopów tlenu ^{18}O i ^{16}O w cząsteczkach wody oraz w szczątkach organizmów morskich i osadach węglanowych. Podczas parowania wody morskiej do atmosfery nieco łatwiej przechodzi izotop lżejszy – tym łatwiej, im niższa jest temperatura. Gdy woda pod postacią pary dotrze w zimne rejony świata, jest magazynowana w wiecznych śniegach i lodowcach. Tym samym w wodzie morskiej jest większa zawartość izotopu cięższego, w lodzie lodowcowym zaś – lżejszego.

Zmiany proporcji izotopów tlenu w lodzie lodowcowym wskazują, że zmiany temperatury były okresowo i lokalnie bardzo szybkie, nawet $5\text{--}7^\circ\text{C}$ w ciągu około 100 lat. Natomiast skład pęcherzyków powietrza uwiecznionego w lodzie lodowcowym wykazał, że w ciągu ostatnich 800 tysięcy lat istniała ścisła zależność pomiędzy zmianami temperatury a zwiększoną ilością gazów cieplarnianych w atmosferze.

Krótkotrwałe zmiany klimatu mogą być efektem silnych wybuchów wulkanicznych, kiedy pyły wulkaniczne docierają nawet do stratosfery i są w niej rozprowadzane. Ogranicza to radiację słoneczną, a jednocześnie utrudnia wypromieniowywanie ciepła

w przestrzeń kosmiczną. Przykładowo wybuch wulkanu Laki na Islandii w 1783 roku spowodował znaczne obniżenie temperatury na półkuli północnej, a wybuch wulkanu Tambora w Indonezji w 1815 roku doprowadził do tak znacznego pogorszenia pogody w Europie, że rok następny określano jako „rok bez lata”.

Gazy cieplarniane, wśród których dominuje para wodna, a mniejsze znaczenie mają dwutlenek węgla, metan, tlenki azotu i ozon, powstają w wyniku wielu procesów naturalnych, a w ostatnich dziesięcioleciach także jako produkt uboczny gospodarczej działalności człowieka. Gazy cieplarniane przepuszczają znaczną część promieniowania słonecznego do Ziemi, lecz ograniczają wypromieniowywanie ciepła z jej powierzchni. Dzięki temu średnia temperatura przy powierzchni Ziemi wynosi obecnie $15,5^\circ\text{C}$ (bez nich wynosiłaby -18°C), a życie w obecnej formie nie mogłoby istnieć. Zmiany ilości gazów cieplarnianych w atmosferze odgrywają znaczącą rolę klimatotwórczą. Głównym długoterminowym czynnikiem wpływającym na zawartość CO_2 w atmosferze jest temperatura wody w oceanach: w wodzie morskiej CO_2 rozpuszcza się i jest wiązany chemicznie, a utworzony osad opada na dno. Zanim uwieczniony przy dnie CO_2 powróci do wód przypowierzchniowych, może upłynąć

Jednym ze skutków zwiększonego parowania może być powiększenie obszarów pokrytych lodowcami i wiecznym śniegiem w strefie polarnej (Mt. Cook w Alpach Południowych, Nowa Zelandia)



Leszek Marks

nawet 1000 lat. Podniesienie temperatury wody morskiej powoduje zmniejszenie rozpuszczalności dwutlenku węgla i w związku z tym jego wydzielanie do atmosfery.

Prognozowanie zmian

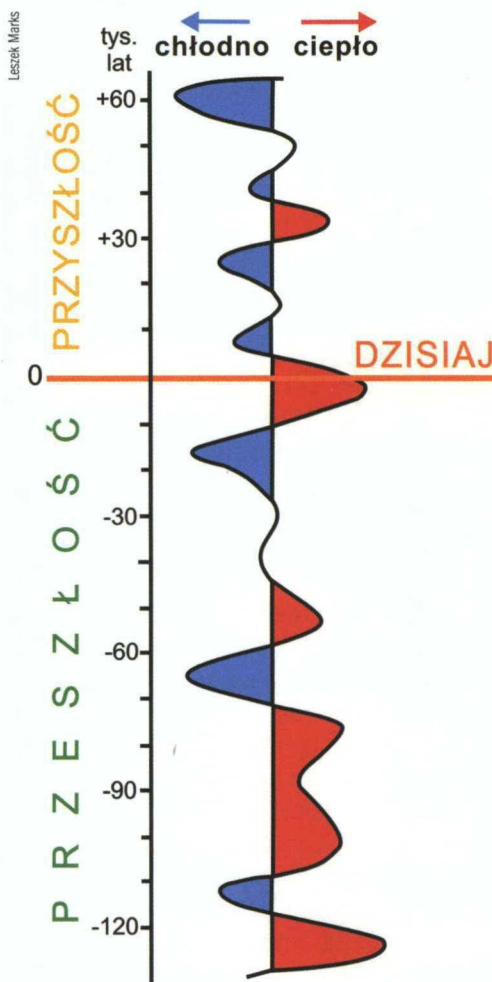
Kluczem do prognozowania zmian klimatu są badania geologiczne, umożliwiają bowiem wyodrębnienie rytmu naturalnych zmian klimatu, zjawisk ekstremalnych oraz tych spowodowanych przez działanie człowieka. Pokazują perspektywę przyszłych zmian klimatu oraz potwierdzają kruchą równowagę pomiędzy różnymi czynnikami, które go determinują. Mimo że w historii Ziemi panował na ogół klimat znacznie cieplejszy od współczesnego, to kilkakrotnie dochodziło do znacznego ogólnosiwiatowego ochłodzenia, kiedy kontynentalne pokrywy lodowe sięgały od biegunów do strefy podzwrotnikowej. Najmłodsza, czwartorzędowa epoka lodowa rozpoczęła się zaledwie 3 miliony lat temu. Wystarczyły małe zmiany w radiacji słonecznej zachodzące w cyklach trwających po około 100 tysięcy lat, by wpłynąć na rozrost i kurczenie się lądolodów.

W ciągu ostatnich 100 milionów lat klimat na Ziemi stopniowo (choć niejednostajnie) ochładzał się, a zawartość gazów cieplarnianych w atmosferze zmniejszała się. Wygląda na to, że obecnie ta tendencja uległa odwróceniu. Nie ma jednak jednoznacznych dowodów, że jest to tendencja trwała oraz że jest to wyłącznie efekt działalności człowieka. Jeśli utrzymałby się obecny trend zmian klimatu, to za kilkaset (?) lat klimat na Ziemi przypominałby ten, jaki panował 5 milionów lat temu. Temperatura była wtedy wyższa od obecnej, a zawartość gazów cieplarnianych w atmosferze – znacznie większa.

Globalne ochłodzenie?

Prognozowanie zmian klimatu jest możliwe dzięki poznaniu ewolucji klimatu w przeszłości geologicznej Ziemi. Opiera się na przewidywaniu cyrkulacji atmosferycznej, uruchamianej przez energię słoneczną. Pozostałych czynników wpływających na klimat jest tak wiele, że w prognozowaniu zakłada się, że jeden z nich zaczyna dominować.

Stosowane są dwa podejścia do prognozowania zmian klimatu. Jedno z nich jest zbliżone do prognozy pogody i dotyczy wystąpienia specyficznych wydarzeń klimatycznych



Prognoza klimatu na najbliższe 60 tysięcy lat, wynikająca ze zmiany promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni Ziemi

nych o bardzo ograniczonym czasie trwania, np. zjawisko El Niño. Drugi rodzaj prognozowania jest związany z obliczaniem struktury statystycznej klimatu, a to oznacza, że nie da się prognozować dokładnego czasu wydarzeń klimatycznych, ale tylko prawdopodobieństwo ich wystąpienia.

Na podstawie spodziewanych zmian w radiacji słonecznej spowodowanych zmianami orbity Ziemi można oczekiwać, że znaczne ochłodzenie wystąpi za około 5, 24 i 40 tysięcy lat, a za około 60 tysięcy lat – ochłodzenie porównywalne z ostatnim zlodowaczeniem plejstocenskimi. Niewielkiego ocieplenia można oczekiwać za około 16, 31 i 50 tysięcy lat. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

<http://www.33igc.org> – Lectures available as webcasts: Themes of the Day *Climate Change: Past, present, future - How much is anthropogenic?* Friday 8th August 2008.

<http://www.ipcc.ch> – IPCC Fourth Assessment Report (AR4) *Climate Change 2007*.