

POGODOWE RÓWNANIA



Współczesne zagrożenie to globalne ocieplenie, wzrost temperatury na skutek antropogenicznej emisji CO₂ do atmosfery. W jaki sposób jest ono przewidywane?

Igor Niezgodzki

Instytut Nauk Geologicznych
Polska Akademia Nauk, Warszawa

Większość najnowszych badań naukowych stwierdza, że nasza planeta, a dokładniej jej klimat, podlega globalnemu ociepleniu. Doniesienia na temat wzmożonej emisji CO₂ i jej wpływu na wzrost temperatury wciąż są tematem burzliwych dyskusji, m.in. ze względu na alarmujące informacje związane z konsekwencjami ocieplenia, w tym wzrostem poziomu mórz, szybkim zanikiem permanentnej pokrywy lodowej (lodu morskiego, lodowców górskich i lądolodów), a także coraz częstszym występowaniem ekstremalnych zjawisk pogodowych. Regularnie słyszymy w mediach o gwałtownych powodziach, huraganach, suszach i pożarach.

Katastroficzne scenariusze związane ze zmianami klimatu wciąż budzą duże kontrowersje, a wielu z nas zastanawia się, na ile realistyczne są przewidywane zagrożenia w dłuższej skali czasowej. Dlatego, aby lepiej zrozumieć ten „gorący” temat, konieczne jest zazna-

jomienie się z metodami stosowanymi do poznania i przewidywania klimatu w bliskiej i dalekiej przyszłości, które ściśle wiążą się z badaniami odległych epok geologicznych.

Badania paleoklimatu pozwalają nam poznać mechanizmy odpowiadające za długotrwałe zmiany klimatyczne. Efekt działań niektórych procesów jest trudny czy wręcz niemożliwy do zaobserwowania w krótkiej skali czasowej. Dlatego musimy sięgnąć do przeszłości, by poznać całościowy efekt różnych mechanizmów i wykorzystać zdobytą wiedzę do przewidywania trendów klimatycznych. Do takich badań wykorzystuje się numeryczne modele systemu ziemskiego uruchamiane za pomocą superkomputerów, charakteryzujących się ogromną mocą obliczeniową. Sposób działania takich modeli jest bardzo podobny do numerycznych modeli pogodowych. Pierwsze modele klimatyczne rozwinięte w Instytucie Maxa Plancka zostały wręcz „przerobione” z modeli pogodowych i uwzględniały zjawiska, które nie mają wielkiego znaczenia w perspektywie krótkoterminowej (np. zmiany w zasięgu morskiej pokrywy lodowej czy stężenia gazów cieplarnianych). Jednak niedawno historia zatoczyła koło i to modele klimatyczne stały się podstawą rozwoju i unowocześnienia modeli pogodowych.



Igor Niezgodzki

zajmuje się modelowaniem paleoklimatu oraz porównaniem wyników modelowania z danymi geologicznymi. W szczególności bada wpływ paleogeografii oraz CO₂ na klimat regionu arktycznego w warunkach cieplarnianych.
ndniezgo@cyf-kr.edu.pl

Obliczyć pogodę

Modele systemu ziemskiego symulują klimat na Ziemi poprzez rozwiązywanie matematycznych równań opisujących znane nam zjawiska fizyczne zachodzące na kuli ziemskiej. Są to przede wszystkim równania opisujące procesy transportu promieniowania, procesy termodynamiczne oraz przepływ płynów z cyrkulacją oceaniczną oraz atmosferyczną. Należy tu uściślić, że modele systemu ziemskiego różnią się tym od modeli klimatycznych, że symulują dodatkowo obieg węgla, a mogą również symulować inne procesy chemiczne i biologiczne, których modele klimatyczne nie uwzględniają. Modele takie składają się z komponentów reprezentujących poszczególne sfery systemu Ziemi, w tym atmosferę, hydrosferę (morza, oceany i sieci rzeczne), powierzchnię Ziemi, kriosferę czy biosferę. W każdym z komponentów ląd lub ocean pokrywają kraty (czyli pojedyncze oczka siatki) razem tworzące siatkę pokrywającą cały glob. Równania symulujące zjawiska fizyczne są rozwiązywane dla każdej kraty osobno, a następnie wyniki z poszczególnych krat są łączone w całość.

Jako pierwsze obliczane są tak zwane zmienne prognostyczne. Są to zmienne wyliczane bezpośrednio z równań opisujących zjawiska fizyczne. Przykładowo temperatura jest obliczana ze wzorów opisujących bilans energetyczny Ziemi. Po obliczeniu zmiennych prognostycznych na ich podstawie są obliczane zmienne diagnostyczne, na przykład takie jak opady (które są między innymi funkcją temperatury czy wilgotności). Zatem w rzeczywistości symulowanie klimatu polega na numerycznym rozwiązywaniu skomplikowanych układów równań różniczkowych, opisujących typowe i znane nam prawa fizyczne.

Wyzwaniem w modelach systemu ziemskiego jest symulacja zjawisk o skali mniejszej niż wielkość jednej kraty, czyli tzw. procesy podskalowe. Przykładami takich zjawisk są chmury czy pływy morskie. Chmury mają istotny wpływ na klimat, chociaż mogą zajmować tylko niewielką „powierzchnię” nad danym obszarem lądowym lub morskim. Są one w modelach parametryzowane, tzn. opisywane przez uproszczone procesy i statystyczne relacje parametrów wpływających na ich tworzenie (takich jak temperatura i wilgotność). Warto w tym miejscu wspomnieć, że niepewności związane ze zjawiskami podskalowymi (takimi jak chmury), a także ze zjawiskami z nimi powiązanymi (np. opady czy wpływ zachmurzenia na odbijanie promieniowania słonecznego i ziemskiego) są najmniej doskonałą częścią modeli systemu ziemskiego.

Uruchomić model

Modele systemu ziemskiego są uruchamiane na znacznie dłuższy okres niż modele prognozujące pogodę; symulują one zmiany zachodzące w perspektywie mi-

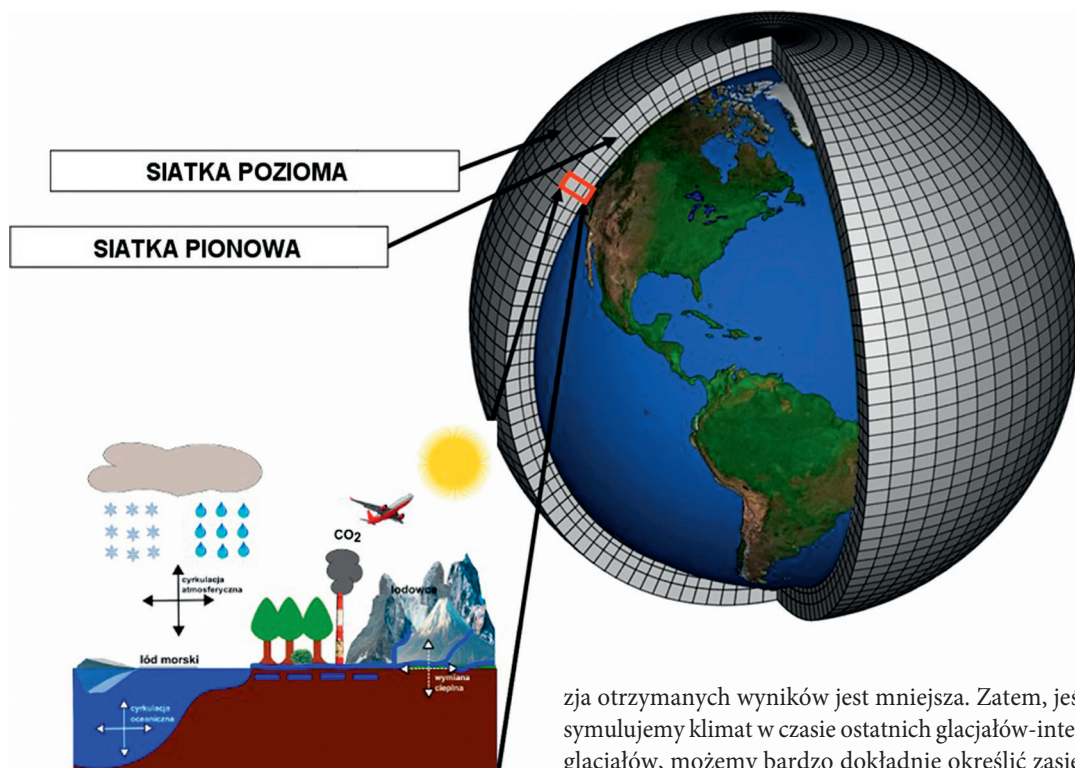
nimum kilku miesięcy, a zdarza się, że i nawet wielu tysięcy lat. Z kolei modele pogodowe zazwyczaj symulują zmiany w perspektywie nie dłuższej niż kilkanaście dni. Zatem koszt czasowy obliczeń w modelach klimatycznych musi być rekompensowany przez mniejszą rozdzielczość przestrzenną niż w modelach pogodowych.

Do niedawna typowa rozdzielczość w modelu atmosfery wynosiła około $3,75^\circ$, co powodowało, iż szerokość jednej kraty na równiku wynosiła około 415 km. W okolicach biegunów rozmiar ten znacząco maleje, gdyż południki zbiegają się. Natomiast rozdzielczość pionowa to 19 lub 31 poziomów, co pozwala symulować zjawiska zachodzące w troposferze i dolnej stratosferze. Nowsze modele atmosferyczne, używane w symulacjach klimatu, mają obecnie rozdzielczość ok. 1.875° (200 km) lub nawet ok. 0.9° (100 km) oraz 47 lub 95 poziomów w pionie. Symulują one zjawiska obejmujące całą masę atmosferyczną. Modele oceaniczne mają rozdzielczość ok. $3^\circ \times 1.8^\circ$ (nowsze ok. 1.5°) i są podzielone na 40 nierównych poziomów pionowych. Ponieważ większość kluczowych zjawisk w oceanach zachodzi blisko ich powierzchni, zatem tam rozdzielczość pionowa jest największa. Pierwszych 20 warstw (ok. 600 m) znajduje się w najpłytszych warstwach mórz i oceanów, natomiast pozostałych 20 warstw obejmuje głębokie partie oceanów poniżej 600 m.

Chociaż można uruchamiać pojedyncze komponenty modelu, np. tylko atmosferyczny lub tylko oceaniczny, to znacznie bardziej wartościowe jest uruchamianie ich w konfiguracjach „połączonych”. Wówczas parametry klimatyczne wpływające na siebie są przekazywane z jednego komponentu do drugiego. Na przykład wiatry wiejące nad oceanami wpływają na prędkość i kierunek prądów morskich, a temperatura oceanu wpływa na temperaturę powietrza. Dlatego w połączonych symulacjach odpowiednie parametry, takie jak temperatura czy siła i kierunek wiatrów są przekazywane między komponentami oceanicznymi i atmosferycznymi. Dodatkowo często uwzględnia się również model dynamicznej wegetacji, w której szata roślinna zmienia się w zależności od zmian klimatu. Obecnie modele systemu ziemskiego są niezwykle zaawansowane i mogą uwzględniać w swoich obliczeniach również dynamikę lądolodu, obieg różnych pierwiastków w przyrodzie oraz biogeochemiczne zjawiska zachodzące w atmosferze i oceanach.

Odtworzyć warunki

Zaimplementowane modele muszą być przetestowane, tzn. należy sprawdzić, czy dobrze symulują zjawiska obserwowane współcześnie. Były one bardzo dokładnie testowane dla warunków obserwowanych dzisiaj na Ziemi. Jednak konieczne jest również sprawdzenie ich efektywności dla klimatu innego od tego, który panuje obecnie. Niestety, zapis historycznych



Uproszczony schemat modelu klimatycznego. Przykład siatki pokrywającej glob oraz zjawisk opisywanych w każdej kracie za pomocą równań. Źródło: NOAA.

obserwacji klimatycznych panujących na Ziemi wykonany przez człowieka jest bardzo krótki i wynosi zaledwie około 100 lat. Dlatego musimy sięgnąć po inne metody rekonstrukcji dawnego klimatu.

Z pomocą przychodzą nam wskaźniki (ang. proxies) paleoklimatyczne, czyli dane kopalne, z jakich możemy dowiedzieć się o panującym klimacie w sposób pośredni. Pochodzą one np. z rdzeni lodowych czy skał, które są naturalnymi świadkami warunków panujących kiedyś na Ziemi. Zawierają one pyłek, mikroskopijne szkieleciki organizmów, szczątki roślin oraz zwierząt sprzed milionów lat typowych dla danych stref klimatycznych. Skały lub skamieniałości mogą (tak samo jak rdzenie lodowe) zostać poddane badaniom geochemicznym i paleoekologicznym. Za ich pomocą możemy odtworzyć warunki paleośrodowiskowe takie jak zmiany poziomu morza, wahania ilości dwutlenku węgla w atmosferze, a nawet temperaturę oceanu. Takie „punktowe” rekonstrukcje geologiczne porównuje się z wynikami symulacji komputerowych.

Aby uruchomić symulacje paleoklimatu, musimy wcześniej zdefiniować pewne czynniki, od których klimat zależy. Są to paleogeografia (batymetria i orografia), zasięg lądolodów, stężenie gazów cieplarnianych w atmosferze, parametry orbity słonecznej (precesja, ekscentryczność, nachylenie osi obrotu Ziemi), a także wegetację, jeśli nie używamy modelu dynamicznej roślinności oraz stałą słoneczną dla bardzo dawnego klimatu. Dodatkowo na podstawie orografii specjalne algorytmy wyznaczają dawne systemy rzeczne. I dopiero po zdefiniowaniu wszystkich wymienionych warunków początkowych (znanych z danych geologicznych) model może zostać uruchomiony.

Przyjąć kontrowersje

Oczywiście im dawniejszy klimat symulujemy, tym definiowane warunki są mniej pewne, a zatem precy-

zja otrzymanych wyników jest mniejsza. Zatem, jeśli symulujemy klimat w czasie ostatnich glacjałów-interglacjałów, możemy bardzo dokładnie określić zasięg lądolodu w określonym czasie. Natomiast dla dawnych okresów geologicznych jak np. dla najpóźniejszej kredy (ok. 66 mln lat temu) istnieją spore kontrowersje czy lądolód w ogóle istniał, czy nie, nie wspominając nawet o jego zasięgu. Ponieważ często otrzymane wyniki są rozbieżne z rekonstrukcjami na podstawie danych geologicznych, razem z geologami staramy się te rozbieżności zbadać i rozwiązywać narosłe kontrowersje. Jeszcze do niedawna uważano je za niedoskonałość modeli, które nie potrafiły symulować klimatu w warunkach zupełnie innych od dzisiejszych, bądź nieznanymi mechanizmami fizycznymi, którymi nie był uwzględniany w modelach. Było to podstawą zarzutów, że modele błędnie i zbyt katastroficznie przewidują skutki dzisiejszego globalnego ocieplenia. Obecnie jednak bierze się pod uwagę, że przyczyną tych rozbieżności mogą być nie tylko modele, ale również rekonstrukcje paleoklimatu. Nie ulega jednak wątpliwości, że obie metody, czyli numeryczna i geologiczna, wzajemnie na siebie oddziałują, a wyniki pochodzące z jednej z metod mogą stać się impulsem do poszukiwania rozwiązań bądź udoskonalenia drugiej.

Modele systemu ziemskiego mają wiele zastosowań w badaniach historii Ziemi oraz wspierają poszukiwania złóż naturalnych. Są wyjątkowo przydatne choćby do określania panującego paleoklimatu w miejscach słabo rozpoznanych pod kątem geologicznym. Dane geologiczne są pobierane „punktowo”, natomiast modele numeryczne umożliwiają nam badanie globalnych mechanizmów, które doprowadziły do zmian klimatu. Podsumowując, symulowanie zjawisk paleoklimatycznych i paleoceanograficznych stanowi test dla badań geologicznych oraz modeli klimatycznych. Daje nam również możliwość głębszego zrozumienia mechanizmów odpowiedzialnych za złożoną dynamikę i zmiany klimatu. Możliwe jest, że dzięki tego typu badaniom przeszłość i teraźniejszość staną się swego rodzaju „kluczem do przyszłości”.

IGOR NIEZGODZKI

Chcesz wiedzieć więcej?

Nauka o klimacie: <http://naukaoklimacie.pl/>

Marshall J. & Plumb R.A. (2016). Atmosphere, ocean and climate dynamics: an introductory text (Vol. 21). Academic Press.

Ruddiman W. F. (2001). Earth's Climate: past and future. Macmillan.