

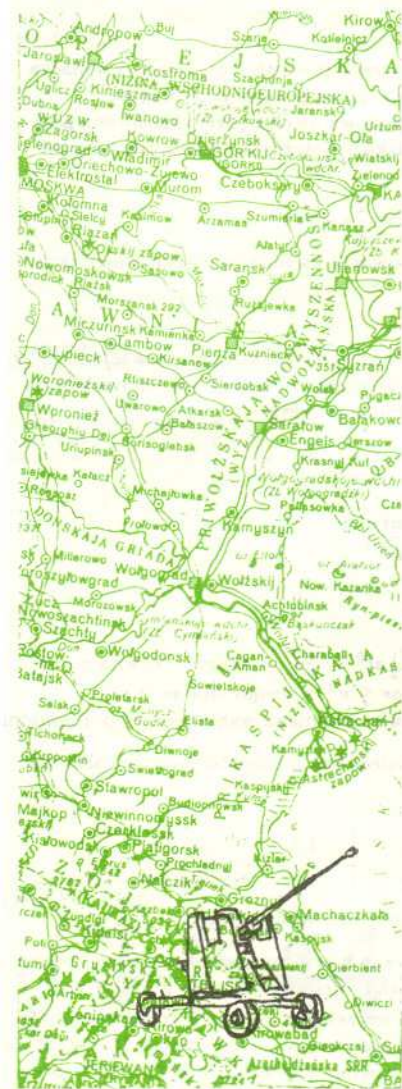
Dziś nie trzeba już chyba nikogo przekonywać, że działalność człowieka niesie ogromne zagrożenia dla niego samego i dla naturalnego środowiska. Aż nadto dobrze możemy obserwować efekty zanieczyszczenia atmosfery i wód. A przecież świadomość zagrożeń jest – w skali historycznej – bardzo świeżej daty. Od zarania dziejów człowiek „czynił sobie Ziemię poddaną” i zawsze mógł liczyć na przychylną ocenę takiego działania. Jeszcze w latach pięćdziesiątych naszego stulecia panował nieklamany entuzjazm dla „ujarzmiania przyrody”. Teraz przyrody już nie ujarzmiamy. Przeciwnie, chcemy ją chronić. Wiemy więc i widzimy, że jest źle, naukowcy zaś raczą nas przewidywaniami, że będzie jeszcze gorzej. Najbardziej znane z tych przewidywań dotyczą rozwoju dziury ozonowej oraz efektu cieplarnianego. O obydwu problemach pisaliśmy już wielokrotnie na łamach *Delty* prezentując często sprzeczne doniesienia. W bieżącej artykule – na przykładzie efektu cieplarnianego – zastanowimy się, jak powstają takie prognozy i na ile są one wiarygodne.

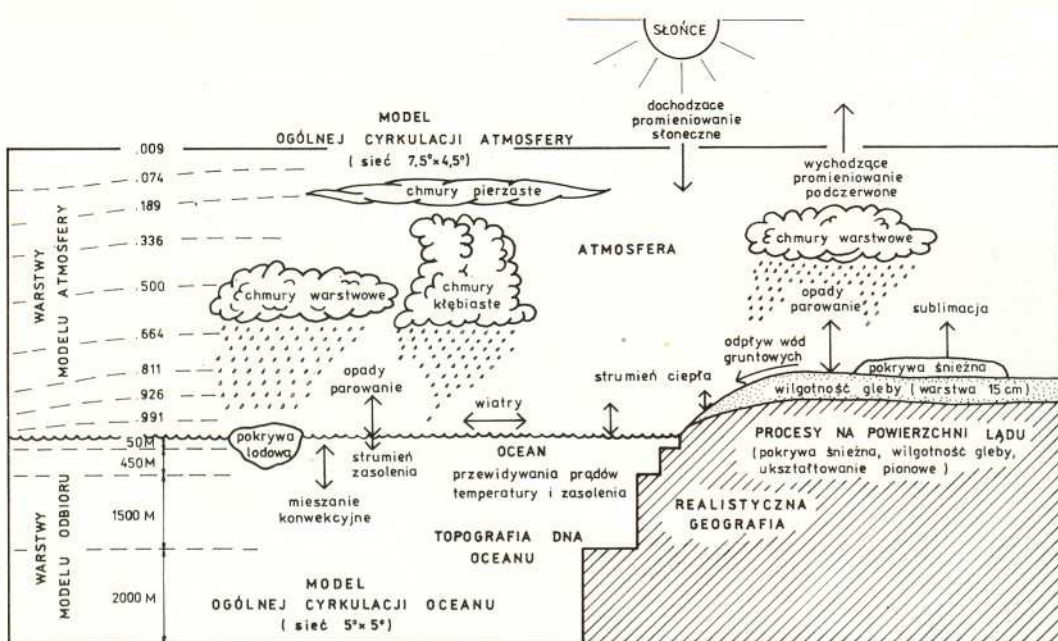
Bezpośrednie pomiary wykazują, że zawartość dwutlenku węgla w atmosferze ziemskiej systematycznie wzrasta. Przyczyną jest najprawdopodobniej industrializacja (spalanie ogromnych ilości paliw kopalnych) oraz zmniejszanie się powierzchni lasów. Przykładowo, od 1958 r. koncentracja  $\text{CO}_2$  w atmosferze wzrosła o 15% (osiągając poziom  $3,52 \times 10^{-4}$ ). Różne teoretyczne modele atmosfery sugerują, że wzrost zawartości dwutlenku węgla powinien pociągnąć za sobą ogólne ocieplenie klimatu Ziemi. Zjawisko to nosi nazwę efektu cieplarnianego. Jednakże, w chwili obecnej, dane meteorologiczne nie pozwalają na jednoznaczne stwierdzenie, czy ocieplenie rzeczywiście zachodzi lub, jeśli nawet ma to miejsce, czy ocieplenie ma związek z koncentracją  $\text{CO}_2$ . W tej sytuacji pozostaje albo cierpliwie odczytywać temperaturę z termometru czekać, aż Natura sama przeprowadzi eksperyment, albo też dokonać eksperymentu komputerowego.

Komputerowe modelowanie procesów zachodzących w atmosferze nie jest bynajmniej zadaniem łatwym. Przede wszystkim należy uwzględnić w nim dynamikę poziomych i pionowych ruchów mas powietrza, koniecznie pamiętając o roli sił Coriolisa powstających na skutek ruchu obrotowego Ziemi wokół własnej osi. Procesy termodynamiczne (np. wymiana ciepła między warstwami powietrza) można przybliżyć traktując powietrze jako gaz doskonały. Kolejnym czynnikiem o pierwszoplanowym znaczeniu jest wilgotność atmosfery i ruchy mas pary wodnej. Poprawny model musi uwzględniać procesy parowania, formowania chmur, opady (lokalne i wielkoskalowe). Rola opadów jest szczególnie istotna, gdyż wnoszą one własny wkład do bilansu pędu, wilgotności i ciepła, nie uwzględniany w równaniach opisujących dynamikę powietrza. Innym elementem wpływającym na klimat są oceany, działające nie tylko jako ogromne zbiorniki ciepła i źródła pary wodnej, ale również mogące mieć swoją własną dynamikę, z poziomym i pionowym transportem ciepła, zmianami zasolenia itp. Ważnym elementem w opisie oddziaływania oceanów z atmosferą jest pokrywa lodowa: morza pokryte lodem są praktycznie odizolowane od atmosfery. Podobne uwagi dotyczą także powierzchni lądów, dla których należy uwzględnić takie czynniki, jak wilgotność gleby, pokrywa lodowa, śnieg itd. Wreszcie, nie można zapominać, że Ziemia jest układem otwartym otrzymującym codziennie dawkę promieniowania słonecznego i pozbywającym się ciepła przez promieniowanie w podczerwieni.

Modelowanie klimatu za pomocą komputera wymaga rozwiązywania zespołu równań opisującego powyższe zjawiska na dyskretnej siatce przestrzennej. Wobec wielkiej liczby czynników, które należy wziąć pod uwagę (zostały one schematycznie zaznaczone na rysunku 1) ograniczenia w szybkości obecnie dostępnych komputerów sprawiają, że siatka ta musi być dość rzadka. I tak w jednym z ważnych eksperymentów komputerowych, przeprowadzonym przed dwoma laty w Narodowym Centrum Badań Atmosfery w Boulder, USA, użyto siatki o rozdzielczości  $4,5^\circ$  w szerokości i  $7,5^\circ$  w długości geograficznej i dziewięciu warstwach w pionie. W doświadczeniu tym zbadano 19-letnią ewolucję klimatu dla dwóch stanów początkowych różniących się jedynie koncentracją dwutlenku węgla. W pierwszym przypadku przyjęto ilość  $\text{CO}_2$  taką, jak w rzeczywistości, w drugim dwukrotnie większą. Całość symulacji zabrała przeszło 400 godzin pracy procesora superkomputera CRAY-1.

Prognozy zmian klimatu na skutek efektu cieplarnianego, wysnute z modeli atmosfery, zawsze obarczone są pewną dozą niepewności. Nie ma przecież możliwości obiektywnego ich zweryfikowania. Jeśli jednak model poprawnie odtwarza obserwowane własności klimatu, nabieramy do niego zaufania. W przypadku



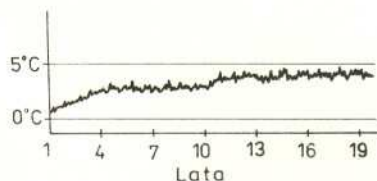


Rys. 1

wspomnianego wcześniej eksperymentu model ze zwykłą zawartością CO<sub>2</sub> przeszedł ten test pomyślnie. Rysunki A i B z tylnej okładki przedstawiają rozkłady temperatury przy powierzchni Ziemi w lutym i sierpniu pierwszego roku symulacji. Widoczne są zmiany temperatur związane z porą roku. Łatwo można też zauważyć obecność frontu polarnego oddzielającego chłodne i gorące powietrze na średnich szerokościach geograficznych. Widać również, że na obszarach morskich wahania temperatur są mniejsze niż na lądzie. Bardziej szczegółowe badania wykazały, że model odtwarza poprawnie także wielkoskalowe ruchy atmosfery. Wszystko to, oczywiście, nie udowadnia, że model jest bezbłędny, sugeruje jednak, że podstawowe cechy klimatu symulowane są poprawnie.

Wróćmy teraz do pytania o efekt cieplarniany. Przebieg symulacji klimatu dla stanu wyjściowego z podwojoną zawartością CO<sub>2</sub> dostarcza kolejnego argumentu za jego istnieniem. Średnia temperatura przy powierzchni wykazuje stały wzrost, aż do osiągnięcia po około 10 latach stanu równowagi o 4 – 4,5 C wyższej od początkowej (patrz rys. 2). To globalne ocieplenie wykazuje szereg ciekawych własności lokalnych. Na rysunku C z tylnej okładki widzimy w szczególności, że wzrost temperatury następuje przede wszystkim na dużych szerokościach geograficznych. Związane jest to z topnieniem czap polarnych. Na mniejszych szerokościach wzrost temperatury nie jest tak drastyczny i występuje głównie na obszarach lądowych. Tam jednak mogą pojawić się również rejon lokalnego spadku temperatury średniej (np. okolice Teksasu na rys. C). Odnośnie ich lokalizacji model – pomimo wszystkich swoich zalet – nie może być traktowany jako wiarygodny. Powodem jest rozdzielczość przestrzenna. Wobec przyjętych rozmiarów sieci różnice w ukształtowaniu terenu zostały niemal całkowicie rozmyte. Realistyczne prognozowanie lokalnego klimatu wymagałoby co najmniej 10-krotnego zwiększenia rozdzielczości, a co za tym idzie – przedłużenia czasu działania programu symulującego 100 razy...

Przed stawianiem prognoz szczegółowych powstrzymuje również świadomość braków modelu. Ostatnie badania wskazują, że najprawdopodobniej niewłaściwie opisuje on rolę rozwoju powłoki chmur (na skutek wzrostu wilgotności) w zmniejszeniu strumienia ciepła docierającego do powierzchni Ziemi. Efekt ten hamowałby wzrost temperatury. Z drugiej strony, model nie uwzględnia procesów biogeochemicznych prowadzących do uwalniania znacznych ilości gazów, takich jak metan, które wzmagają efekt cieplarniany. Wreszcie, należy pamiętać, że w dotychczasowych badaniach ocean światowy był traktowany w dalece uproszczony sposób. Np. zaniedbane zostały niezwykle istotne klimatycznie prądy morskie. Wszystkie te zastrzeżenia nie zmieniają prawdopodobnie konkluzji, że zwiększenie koncentracji CO<sub>2</sub> prowadzi do globalnego ocieplenia klimatu. Jednakże rozmiar i zakres tego ocieplenia musi pozostać wciąż jeszcze przedmiotem badań.



Rys. 2

Na podstawie *Computers in Physics* May/June 1990  
opracował Paweł KRAWCZYK