

KRZYSZTOF HAMAN*

Naturalne i antropogeniczne przyczyny zmian klimatu^{**}

Na wstępie chciałbym możliwie precyzyjnie zdefiniować pojęcie klimatu w sensie, w którym zamierzam go używać, gdyż wbrew pozorom nie jest ono powszechnie jednoznacznie rozumiane. Jeżeli założymy, że wszyscy co najmniej intuicyjnie wiemy, czym jest pogoda obserwowana w określonym miejscu i czasie, to klimat danego miejsca określają statystyczne cechy pogody obserwowane w tym miejscu na przestrzeni pewnego okresu czasu, dostatecznie długiego, by ta statystyka mogła się ustabilizować. By można było mówić o zmianach klimatu, nie może to jednak być okres za długi; najczęściej przyjmuje się trzydzieści lat. Jeżeli statystyka uzyskana w jakimś okresie krótszym odbiega od tej z trzydziestolecia, to mówimy o anomalii klimatycznej, która nie musi oznaczać zmiany klimatu, choć może ją zapowiadać. Różnych możliwych cech statystycznych potencjalnie jest bardzo wiele, ale w praktyce używa się jedynie pewnych wybranych, o klarownej interpretacji fizycznej lub przyrodniczej, takich jak np. wartość średnia, odchylenie standardowe itp.

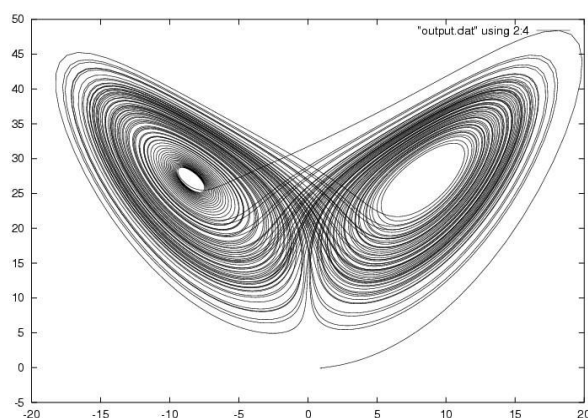
Pogodę jako stan atmosfery można scharakteryzować przy pomocy pewnego zestawu zmiennych liczbowych takich, jak: ciśnienie, temperatura, wilgotność, wysokość opadu itp., przypisanych do danego miejsca i zmieniających się w czasie. Do opisu pogody na całym globie potrzeba tych zmiennych bardzo wiele, zależnie od rozdzielczości przestrzennej tego opisu. Najlepsze współczesne modele pogody operują liczbą zmiennych rzędu dziesięciu miliardów, a i to okazuje się o wiele za mało z punktu widzenia potrzeb zarówno badawczych, jak i praktycznych. Zmienne te powiązane są licznymi sprzężeniami, tzn. związkami przyczynowo-skutkowymi, najczęściej zwrotnymi (np. pomiędzy ciśnieniem i wiatrem, który z kolei powoduje zmiany ciśnienia) i ewoluują w czasie pod wpływem tych sprzężeń, a także czynników zewnętrznych, niezależnych od stanu atmosfery. Są to głównie czynniki natury astrofizycznej lub geofizycznej (np. promieniowanie słoneczne, ruch obrotowy Ziemi, wybuchy wulkanów itp.); mówi się o nich często jako o „wymuszeniach”. Sprzężenia wewnętrzne są na ogół nieliniowe,

* Prof. dr hab. Krzysztof Haman, członek korespondent PAN, Instytut Geofizyki Uniwersytetu Warszawskiego

** Artykuł jest rozwinięciem tez przedstawionych na sesji naukowej *Globalne zmiany klimatyczne* podczas 109. Sesji Zgromadzenia Ogólnego PAN, 13 grudnia 2007 w Warszawie

co w wielkim uproszczeniu oznacza, że skutki nie muszą być proporcjonalne do przyczyn, a łączny skutek działania kilku przyczyn nie jest prostym złożeniem skutków tych przyczyn rozpatrywanych oddzielnie. Należy pamiętać, że procesy atmosferyczne powiązane są z procesami zachodzącymi w oceanach i na powierzchni Ziemi, zwłaszcza w biosferze, i sprzężenia w tym zakresie także powinny być uwzględniane. Układ atmosfera–reszta Ziemi jest więc przykładem bardzo złożonego tzw. nieliniowego układu dynamicznego, jakich wiele spotykamy nie tylko w przyrodzie, ale także w życiu społecznym i gospodarczym. Podział źródeł zmienności układu na czynniki (wymuszenia) zewnętrzne i sprzężenia wewnętrzne jest w pewnym stopniu umowny i może nieco się różnić w różnych ujęciach modelowych.

Szereg ważnych cech procesów atmosferycznych determinujących klimat i jego ewolucję wynika z ogólnych własności pewnej szerszej klasy nieliniowych układów dynamicznych, tzw. układów chaotycznych, do których układ atmosfera–reszta Ziemi należy. Spróbuję je przedstawić na przykładzie pewnego bardzo prostego układu, tzw. układu Lorenza. Posiada on tylko trzy zmienne, a więc jego ewolucję można przedstawić graficznie jako tor punktu w przestrzeni (ryc. 1).



Ryc. 1. Jedna z trajektorii ilustrującej rozwiązanie układu Lorenza. Widoczne dwa „skrzydła” atraktora, na których ta trajektoria leży, oraz nagłe przeskoki z jednego skrzydła na drugie; można je interpretować jako nagłe zmiany „klimatu” w wyniku działania jedynie wewnętrznych sprzężeń układu

Nie występują w nim czynniki zewnętrzne, co dodatkowo upraszcza jego strukturę. Jest to, nawiasem mówiąc, najstarszy model stworzony w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku do badań klimatologicznych, jeszcze bardzo prymitywnych. Warto też wspomnieć, że przy okazji stał się on załącznikiem tzw. teorii chaosu deterministycznego, o której zapewne wszyscy słyszeli, choć może nie wszyscy wiedzą, o co w niej dokładnie chodzi.

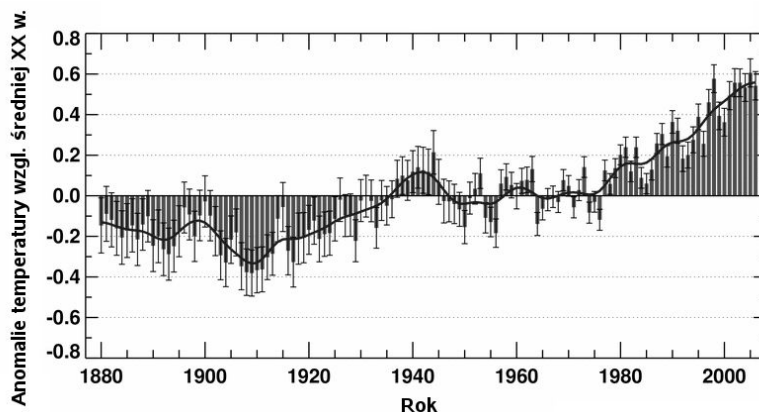
Jak widać na rycinie tor ten leży na pewnej figurze geometrycznej (tzw. atraktorze), złożonej jakby z dwóch części podobnych do liścia czy skrzydła motyla. Jeżeli przyjmie-
my, że odpowiednikiem klimatu jest statystyka położenia punktów na pewnym odcinku
toru, to widać, że klimat ten jest w zasadzie zdeterminowany przez statystykę punktów
na danym „liściu”. Przez większość czasu podlega on niewielkim wahaniom, na pewnych
odcinkach w przybliżeniu okresowym. Od czasu do czasu następuje jednak nagły
przeskok do zupełnie innego „klimatu” zdeterminowanego przez punkty drugiego „liś-
cia”. Dzieje się to pod wpływem jedynie sprzężeń wewnętrznych, bez udziału czynników
zewnętrznych! Odpowiednik tego zjawiska znany jest w paleoklimatologii w postaci nag-
łych zmian klimatu widocznych w śladach zachowanych w osadach z dawnych epok geo-
logicznych. Gdybyśmy obejrzeli tory, których punkty startowe różniłyby się choćby
dowolnie mało od punktu startowego toru przedstawionego na rycinie, okazałoby się,
że tory te wprawdzie szybko się rozchodzą (tzw. efekt motyla – dowolnie małe błędy
w określeniu stanu początkowego mogą prowadzić do dużych błędów w prognozie
dalszej ewolucji układu), lecz statystyki przez nie generowane są na ogół podobne, choć
czasem zdarzają się niespodzianki – np. nieoczekiwany przeskok na drugi liść. W ana-
logii atmosferycznej daje to nadzieję na w miarę skuteczne, choć nie do końca pewne,
prognozowanie ewolucji klimatu, nawet jeżeli prognoza pogody na więcej niż kilkadzie-
siąt dni naprzód okazuje się, na skutek „efektu motyla”, niemożliwa, nawet teoretycz-
nie. Widać też, że opieranie prognozy klimatu na ekstrapolacji zaobserwowanych pozor-
nych okresowości może okazać się zdradliwe.

Procesy atmosferyczne mogą, podobnie jak inne nieliniowe układy dynamiczne, na
okresowe (periodyczne) wymuszenia zewnętrzne reagować okresowo (np. cykl dobowy
lub roczny). Czasem wymuszenia zewnętrzne (okresowe lub nie) są przez sprzężenia
wewnętrzne wzmacniane. Oznacza to, że nawet pozornie słabych wymuszeń nie należy
a priori lekceważyć tylko dlatego, że są małe w porównaniu z innymi czynnikami wcho-
dzącymi w grę.

Czynniki zewnętrzne (wymuszenia) mogą oddziaływać albo bezpośrednio na pewne
zmienne układu (np. siły grawitacyjne Księżyca oddziałujące na pływy oceaniczne), albo
lub zmieniać charakter sprzężeń wewnętrznych (np. pośredni wpływ wybuchów wulka-
nów na cyrkulację atmosfery poprzez jej zapylenie i redystrybucję dopływu energii sło-
necznej). Czynniki antropogeniczne należą głównie do tej drugiej kategorii.

Jak widać z powyższych rozważań, naturalne przyczyny zmian klimatu są bardzo
skomplikowane. Bada się wprawdzie związki i sprzężenia pomiędzy pojedynczymi czy
nawet kilkoma zmiennymi wchodzącymi w opis klimatu (np. między wysokością opadów
przelotnych a wilgotnością gruntu), ale proste złożenie wyników takich badań ani się
nie da przedstawić w 20-minutowym wykładzie, ani nie daje kompleksowego obrazu
tych przyczyn.

Klimat ewoluował w sposób naturalny od początku istnienia atmosfery, a człowiek wpływał na tę ewolucję niemal od początku istnienia ludzkości (głównie przez zmiany szaty roślinnej w toku działalności rolniczej oraz emisję rozmaitych zanieczyszczeń – na ogół szkodliwych), ale do początku XIX wieku, a nawet i później, wpływ ten miał charakter głównie lokalny, bez znaczących skutków globalnych. Te ostatnie pojawiły się, a raczej zostały zauważone, dopiero w drugiej połowie ubiegłego stulecia, gdy przybrały niepokojącą skalę. Pierwszym było niszczenie ozonu stratosferycznego (powyżej ok. 20 km) przez pewne gazy pochodzenia przemysłowego, co skutkowało zwiększonym dopływem szkodliwego promieniowania ultrafioletowego; drugim był wzrost temperatury powietrza w warstwie przyziemnej, szczególnie wyraźny na przestrzeni ostatnich trzech dekad (ryc. 2).

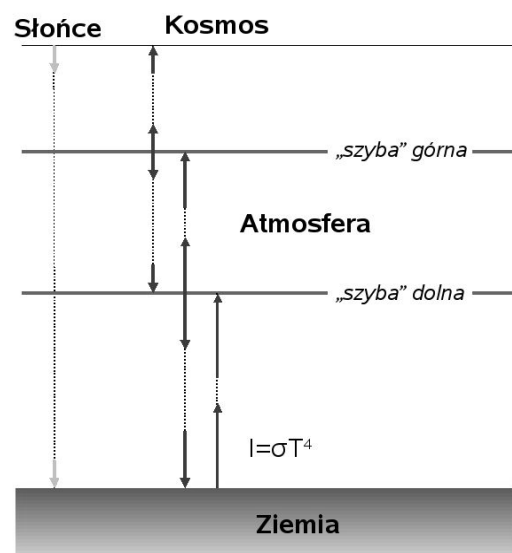


Ryc. 2. Średnie roczne globalne temperatury przyziemne w okresie 1880-2006 jako odchylenie od średniej za okres 1901-2000 (pionowe słupki), szacowany przedział błędów (cienkie pionowe kreski) i przebieg wygładzony bieżącą średnią pięcioletnią (gruba linia); według [1]

O ile ten pierwszy proces został dość wcześnie rozpoznany i, jak się wydaje, w znacznej mierze zahamowany, dzięki ustaleniom tzw. Protokołu Montrealskiego, to ten drugi wciąż kryje liczne niejasności. Za jego pierwotną przyczynę większość współczesnych klimatologów (choć bynajmniej nie wszyscy!) uważa tzw. efekt cieplarniany, a ściślej jego antropogeniczne nasilenie.

Efekt cieplarniany polega na tym, że gazy atmosferyczne są w znacznej mierze przezroczyste dla krótkich fal elektromagnetycznych (głównie światła widzialnego) dominujących w ogrzewającym Ziemi promieniowaniu słonecznym, natomiast pochłaniają znaczną część promieniowania podczerwonego dominującego w promieniowaniu ciepłym Ziemi i wypromieniowują je z powrotem, częściowo w kierunku powierzchni Ziemi, podnosząc jej temperaturę. W znacznym uproszczeniu poszczególne warstwy atmosfery

możemy sobie wyobrazić jako szyby cieplarni przepuszczające promieniowanie słoneczne, lecz pochłaniające promieniowanie podczerwone, ogrzewające się pod jego wpływem, a następnie wypromieniowujące uzyskane ciepło po połowie w kierunku Ziemi i przestrzeni kosmicznej. Oznacza to, że powierzchnia Ziemi otrzymuje w sumie strumień promieniowania znacznie silniejszy niż ten, który otrzymałaby bez atmosfery. W stanie równowagi radiacyjnej, zarówno powierzchnia Ziemi, jak i wszystkie warstwy atmosfery muszą wypromieniować tyle, ile otrzymują, a ponieważ natężenie promieniowania jest w przybliżeniu proporcjonalne do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej (mierzonej w kelwinach), temperatura powierzchni Ziemi i poszczególnych warstw atmosfery musi być wyższa niż gdyby efekt cieplarniany nie występował. Dopiero promieniowanie najwyższej „szyby” w kosmos równoważy strumień samego promieniowania słonecznego (ryc. 3).



Ryc. 3. Schemat bilansu promieniowania przy powstawaniu efektu cieplarnianego. Natężenie (I) promieniowania podczerwonego powierzchni Ziemi i poszczególnych warstw atmosfery (pionowe strzałki) jest w przybliżeniu proporcjonalne do czwartej potęgi temperatury bezwzględnej (T)

Przedstawiony tu model jest oczywiście przesadnie uproszczony, jakkolwiek dobrze ilustruje pierwotną przyczynę efektu cieplarnianego. W szczególności nie uwzględnia on, że temperatura powierzchni Ziemi kształtuje się nie tylko w drodze promieniowania, ale także w wyniku wymiany ciepła z podłożem (zwłaszcza nad oceanami) oraz jego unoszenia przez poziome i pionowe ruchy powietrza połączone w dodatku z pochłanianiem i uwalnianiem ciepła utajonego w toku parowania i kondensacji wody. Należy też

pamiętać, że znaczny ułamek promieniowania słonecznego jest odbijany lub rozpraszany przez powierzchnię Ziemi, chmury, pyły i gazy atmosferyczne w kierunku przestrzeni kosmicznej i nie bierze udziału w dalszych procesach fizycznych na Ziemi. Ułamek ten, tzw. albedo, wynosi średnio ok. 30% i jest szczególnie duży dla niskich chmur oraz powierzchni pokrytych śniegiem. Również własności radiacyjne atmosfery nie są jednorodne ani w poziomie, ani w pionie. W rezultacie naturalny efekt cieplarniany, wynoszący średnio ok. 30° C, nie jest równomiernie rozłożony w atmosferze. Jeżeli równowaga radiacyjna zostaje naruszona, w układzie atmosfera–reszta Ziemi pojawiają się procesy zmierzające do jej przywrócenia, być może już na innym poziomie, jednak ze względu na bezwładność cieplną różnych części tego układu mogą one przebiegać z różnymi czasami charakterystycznymi, niekiedy bardzo powoli, np. dla oceanów czas ten może sięgać kilkuset i więcej lat.

Najważniejszym gazem cieplarnianym jest para wodna występująca w bardzo zmiennej koncentracji (lokalnie od niemal zera do ok. 4% masy powietrza) i jest odpowiedzialna za ok. 97% efektu cieplarnianego obserwowanego w pobliżu powierzchni Ziemi (na większych wysokościach ten udział jest mniejszy). Na drugim miejscu jest dwutlenek węgla (koncentracja ok. 0,04%), a dalej metan, podtlenek azotu i kilka innych tzw. gazów śladowych. Na przestrzeni dwudziestego wieku zaobserwowano ok. 25-procentowy wzrost zawartości dwutlenku węgla w atmosferze; wzrosła również koncentracja metanu, tlenków azotu i innych gazów cieplarnianych. Wprawdzie gazy te uczestniczą w szeregu naturalnych procesów przyrodniczych i wzrost ich koncentracji może w zasadzie mieć przyczyny naturalne (na co wskazują przeciwnicy tezy o antropogenicznym pochodzeniu obecnego ocieplania), wiele jednak przemawia za tym, że w znacznym stopniu jest on skutkiem działalności człowieka. Na przykład, w odniesieniu do dwutlenku węgla, zmiany izotopowego składu zawartego w nim węgla dowodzą, że duża część tego przyrostu jest wynikiem spalania paliw kopalnych – węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego. Z kolei o wzrost zawartości metanu (ostatnio nieco przyhamowany) i tlenków azotu podejrzewa się głównie intensyfikację produkcji rolnej i hodowli.

Fakt, że udział innych niż para wodna gazów w ogólnym przyziemnym efekcie cieplarnianym nie przekracza 4%, może nasuwać wątpliwości, czy stosunkowo niewielki przyrost ich koncentracji w wyniku działalności człowieka może spowodować zmiany temperatury wykraczające poza naturalny zakres jej zmienności, w szczególności ten spowodowany naturalnymi fluktuacjami koncentracji pary wodnej i wahaniami albedo. Jest to jeden z głównych argumentów podnoszonych przez sceptyków. Należy jednak pamiętać, że para wodna jest gazem wyjątkowym, którego obieg w przyrodzie w cyklu kondensacja – opad – parowanie jest stosunkowo bardzo szybki (trwa zaledwie kilka do kilkunastu dni) i prędko osiąga stan równowagi, podczas gdy czas rezydencji w atmosferze pozostałych gazów cieplarnianych mierzony jest latami i dekadami. Niewielkie, ale dłu-

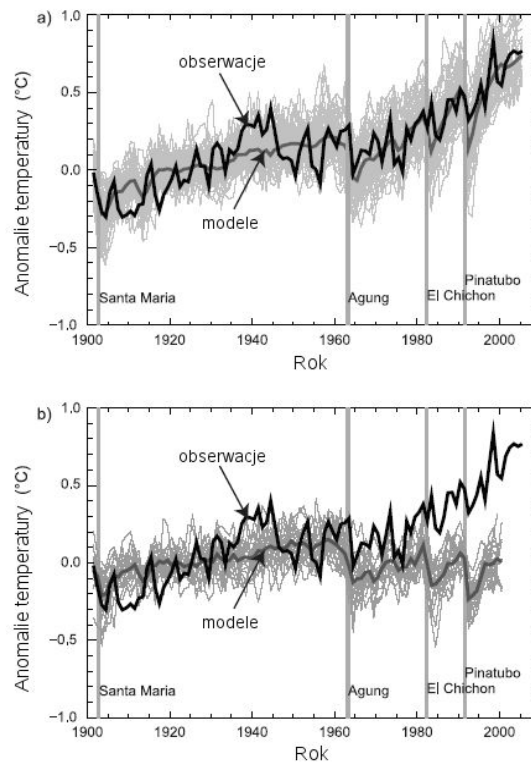
gotrwałe podgrzanie atmosfery przez te ostatnie zwiększa jej pojemność na parę wodną, uruchamiając dodatnie sprzężenie zwrotne mogące silnie wzmacniać pierwotny efekt.

Tabela 1. Udział różnych czynników antropogenicznych w wymuszeniu radiacyjnym [Wm^{-2}], dodatnim (ogrzewanie) i ujemnym (chłodzenie). Podano wartość prawdopodobną i przedział niepewności [] oraz szacowany stopień wiedzy o mechanizmach działania danego czynnika – niski (N), średni (S) i wysoki (W); według [1]

Antropogeniczne gazy cieplarniane o długim czasie rezydencji (bez pary wodnej)	
Dwutlenek węgla	1,56 [1,49÷1,83] W
Metan	0,48 [0,43÷0,53] W
Podtlenek azotu	0,16 [0,14÷0,18] W
Freony	0,34 [0,31÷0,47] W
Ozon stratosf.	-0,05 [-0,15÷-0,05] S
Ozon troposf.	0,35 [0,25÷0,65] S
Inne czynniki antropogeniczne	
Zmiany albedo powierzchni Ziemi:	
Gospodarka rolna i leśna	-0,2 [-0,4÷0,0] S-N
Zanieczyszczenie pokrywy śnieżnej	0,1 [0,0÷0,2]
Aerozol antropogeniczny:	
Efekt bezpośredni	-0,5 [-0,9÷0,1] S-N
Efekt pośredni (albedo chmur)	-0,7 [-1,8÷-0,3] N
Smugi kondensacyjne	0,01 [0,003÷0,03] N
Wymuszenie łączne netto	1,6 [0,6÷2,4]
Naturalna zmiana promieniowania słonecznego	0,12 [0,06÷0,30] N

Ponadto, na co zwracałem już uwagę, bilans promieniowania nie jest jedynym czynnikiem kształtującym temperaturę powietrza. W grę wchodzi też procesy cyrkulacji atmosfery i oddziaływania z powierzchnią Ziemi, które mogą efekty radiacyjne lokalnie nasilać lub osłabiać. Globalnemu wzrostowi temperatury mogą lokalnie odpowiadać nawet jej spadki! Większe wątpliwości budzi sprawa zmienności albedo, za które odpowiadają głównie aerozole (pyły), chmury i pokrywa śnieżna. Mechanizmy ich ewolucji są bowiem od strony ilościowej bardzo słabo zbadane i ich odwzorowanie w obecnych matematycznych modelach klimatu może nasuwać różne zastrzeżenia. Szczególnie duża niepewność związana jest z aerozolami, które zmieniają bilans promieniowania zarówno bezpośrednio, odbijając i rozpraszając promieniowanie słoneczne, jak i pośrednio, modyfikując albedo chmur. Udział różnych czynników antropogenicznych w wymuszeniu radiacyjnym (mierzonym odchyleniem bilansu promieniowania na górnej granicy

troposfery od hipotetycznej równowagi z okresu przedindustrialnego) według najnowszych danych, przedstawia tabela 1. Zwraca uwagę, że jest on w sumie o rząd wielkości większy niż szacowany wzrost natężenia promieniowania słonecznego związany z ewolucją naszej gwiazdy.



Ryc. 4. Porównanie obserwowanego przebiegu średniej rocznej globalnej temperatury przyziemnej i odpowiednich przebiegów uzyskanych z symulacji za pomocą 11 najlepszych matematycznych modeli klimatu (wiązka szarych krzywych), a także ich średniej arytmetycznej, z uwzględnieniem czynników antropogenicznych (górny wykres) oraz z ich pominięciem (dolny wykres). Pionowymi kreskami zaznaczone najsilniejsze wybuchy wulkanów emitujące pyły do górnych warstw atmosfery; według [1]

Ze społecznego punktu widzenia kluczowe znaczenie ma prognoza ewolucji klimatu w perspektywie najbliższych stu lat. Opieranie się w niej na analogach z przeszłości może być bardzo zawodne, gdyż po pierwsze, nasza wiedza o globalnym klimacie w czasach dawniejszych niż ostatnie sto lat jest wysoce niepewna, a po drugie, zachowania tak skomplikowanego i w dodatku chaotycznego układu dynamicznego, jakim jest układ atmosfera–reszta Ziemi, nie muszą być powtarzalne. Jak już wspomniałem, bada się wprawdzie związki i sprzężenia pomiędzy pojedynczymi zmiennymi wchodzącymi w opis klimatu, ale zakres wyciąganych w ten sposób wniosków prognostycznych jest bardzo ograni-

czony. Jediną szansę na w miarę wiarygodną prognozę klimatu dają zaawansowane modele matematyczne, w których przynajmniej najważniejsze sprzężenia są kompleksowo i wystarczająco dokładnie reprezentowane. Pomimo ogromnego i szybkiego postępu trudno aktualny stan w tej dziedzinie uznać z zadowalający. Nie mniej kilkanaście najlepszych modeli jest w stanie dość poprawnie odtworzyć przebieg średniej temperatury Ziemi na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat, dla których dysponujemy w miarę wiarygodnymi porównawczymi danymi obserwacyjnymi (choć wiele innych charakterystyk klimatu odtwarzanych jest już gorzej). Pozwala to przypuszczać, że również prognoza dalszej ewolucji tej temperatury jest w miarę wiarygodna. Fakt, że żaden z tych modeli nie jest w stanie odtworzyć ocieplenia z ostatnich dekad bez uwzględnienia antropogenicznego przyrostu koncentracji gazów cieplarnianych, uważam za najmocniejszy argument przemawiający za antropogenicznym pochodzeniem tego zjawiska (ryc. 4).

Z kolei fakt, że wszystkie te modele prognozują dla nadchodzącego stulecia wzrost tej temperatury, jeżeli antropogeniczna emisja gazów cieplarnianych będzie kontynuowana (o ok. 1,5 do 4°C, w zależności od modelu i scenariusza tej kontynuacji) jest, mimo wszystkich obiektywnych wątpliwości (a także bardziej subiektywnych zastrzeżeń sceptyków, kwestionujących zarówno jakość obecnych danych obserwacyjnych, jak i założeń teoretycznych modeli) sygnałem alarmowym, którego lekceważyć nie można. Ocieplenie to bowiem pociągnie za sobą szereg innych zmian w układzie atmosfera–reszta Ziemi, z których część może okazać się katastrofalna.

Dziękuję p. mgr Marcinowi Kurowskiemu za pomoc przy przygotowaniu rycin do tego artykułu.

Literatura

- [1] Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R. B. Alley et al. (2007): *Technical Summary*. [w:] *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen et al. (red.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
<http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>

Natural and anthropogenic causes of climate changes

The paper gives a short review of the basic physical mechanisms responsible for climate changes with particular attention paid to the structure of the Atmosphere–the Rest of the Earth dynamical system and its chaotic nature. The essence of "greenhouse effect" is explained and input of various natural and anthropogenic factors into it is presented. Problems, difficulties and uncertainties connected with reconstruction of past climates and forecasting the future are discussed. Particular role of mathematical modelling in understanding and predicting the evolution of climate is emphasized.

Key words: climate change, greenhouse effect, climate forecasting

