

Globalne ocieplenie

**Czy globalne ocieplenie i efekt cieplarniany to jedno i to samo?
Czy człowiek jest w stanie wpływać na globalne zmiany klimatyczne?
A może są one wywołane wyłącznie czynnikami naturalnymi?
Na te i inne pytania stara się dać odpowiedź Autor w poniższym artykule.**

■ KRZYSZTOF KOŻUCHOWSKI

Po ogłoszeniu w lutym 2007 roku czwartego raportu IPCC (IPCC, 2007) na nowo ożyła dyskusja o globalnej zmianie współczesnego klimatu, o jej przyczynach i konsekwencjach, a także – o możliwości sterowania tym procesem. Okazuje się przy tym, że problem globalnego ocieplenia ma wiele odniesień, które wykraczają poza ramy klimatologii, ekologii i polityki ekologicznej. Być może równie istotna, jak sama zmiana klimatu, jest różnica, która dzieli poglądy i opinie ludzkie na temat natury tej zmiany...

Jak zwykle w takich sytuacjach, powstaje mieszanina wiedzy i emocji, kształtują się frazesy i hasła, podejrzania o manipulacje faktami i używanie nierzetelnych danych. Oponenty w sporze o klimat uczestniczą w niejasnej grze, w której ignorancja przeplata się z interesami globalnej polityki; można też zauważyć, że z postawami uczestników dyskusji korelują przekonania polityczne, a nawet światopoglądowe. Nastąpiła ideologizacja klimatologii: antropocentrycy występują przeciwko naturalistom, ekolodzy przeciw realistom, demokraci przeciw republikanom... Padają oskarżenia o spisek przeciwko rozwojowi gospodarczemu lub o lekkomyślną ignorancję i konserwatyzm.

Ze zdumieniem i pewnym zażenowaniem stwierdzamy, że klimat stał się przedmiotem politycznych i ideologicznych sporów. Historia nauki przypomina jednak, że nie jest to osobliwość XXI wieku: warto tu wskazać na zdarzenie sprzed około 400 lat,

gdy flamandzki chemik Baptista van Helmont spalił 62 funty węgla drzewnego, otrzymując 1 funt popiołu, a resztę masy, uwalniającej się z węgla – nazwał „nieokielznanym duchem”. Tworzenie „ducha” było jednak wówczas ryzykownym zajęciem – badaczem zajęli się inkwizytorzy, van Helmont resztę życia spędził w domowym areszcie, zaś w miejsce „ducha” wprowadził grecki termin *chaos*. Ponieważ jednak w języku flamandzkim „ch” czytano jak „g”, nazwą lotnej substancji został gaz. Ten sam gaz, dwutlenek węgla, w dzisiejszych okolicznościach, stał się przedmiotem kontrowersji w środowisku naukowym i nie tylko... Na czym ten spór polega i czy można go racjonalnie rozstrzygnąć? Poniższe uwagi, mam nadzieję, pozwolą Czytelnikowi odpowiedzieć na te pytania.

Na początek o pewnym fakcie z historii nauki, który może stanowić wprowadzenie do dalszych wyjaśnień. Ponad sto lat temu, szwedzki fizyk, chemik i astrofizyk, laureat nagrody Nobla – profesor Swante August Arrhenius (1859–1927), badając wymianę energii promieniowania w atmosferze, obliczył, że podwojenie zawartości dwutlenku węgla w powietrzu spowoduje podniesienie temperatury powierzchni Ziemi o 6°C. Wynik ten, choć być może obarczony pewnym błędem, wskazuje jednak na rolę składu atmosfery w kształtowaniu bilansu energetycznego naszej planety. Atmosfera reguluje warunki dopływu i odpływu promieniowania z powierzchni Ziemi – jest to tzw. transfer promieniowania – oraz określa

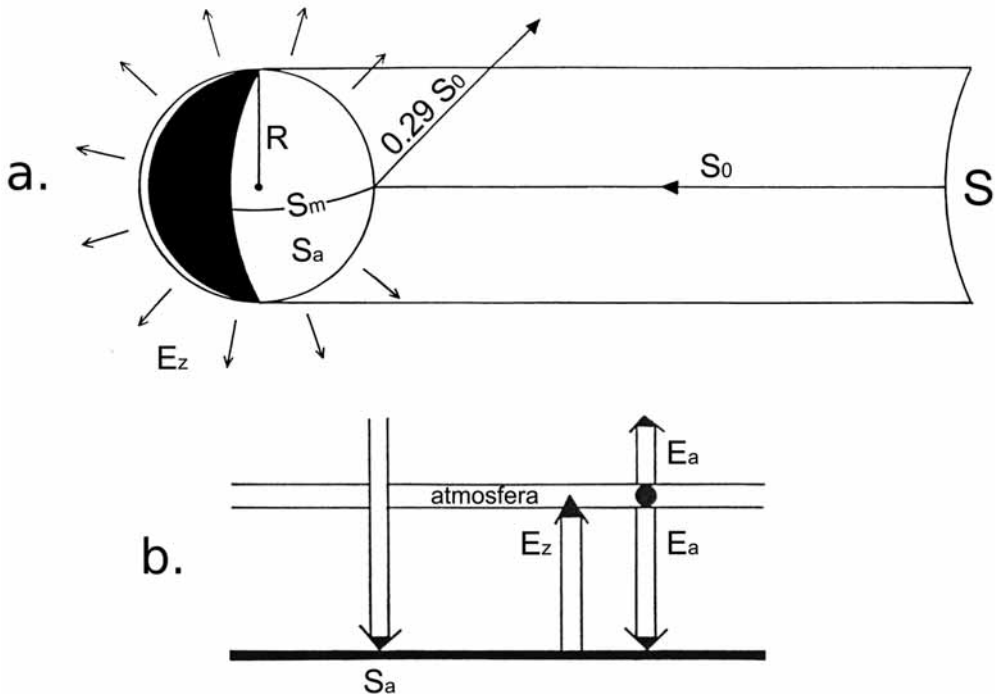
temperaturę zapewniającą równowagę składowych tej wymiany. Cały ten mechanizm nazywa się efektem cieplarnianym. Funkcjonuje on nieprzerwanie i tak długo, jak istnieje atmosfera ziemiska. W tym miejscu należy jednak dodać, że efekt cieplarniany bywa czasem mylony z samym ociepleniem, zwłaszcza z obserwowanymi współcześnie zmianami temperatury. Niezależnie oba terminy służą do opisu ewentualnych skutków działalności człowieka w środowisku przyrodniczym. Utrudnia to oczywiście rzetelną dyskusję na temat zmian klimatycznych.

Efekt cieplarniany

Zjawisko to powoduje, że temperatura powierzchni Ziemi, przykrytej atmosferą, jest wyższa od (teoretycznie wyznaczonej) temperatury powierzchni Ziemi bez atmosfery. Od składu atmosfery, wpływającego na pochłanianie przenikającego przez nią

promieniowania, zależy wymiar termiczny efektu cieplarnianego, tj. przyrost temperatury ponad poziom odpowiadający temperaturze powierzchni Ziemi bez atmosferycznej otoczki. Spróbujemy obliczyć temperaturę powierzchni Ziemi bez atmosfery. Jest to tzw. temperatura efektywna, zapewniająca zrównoważenie dopływu energii promieniowania słonecznego do naszej planety z wypromieniowaniem własnym kuli ziemskiej.

Ziemia znajduje się w strumieniu promieniowania emitowanego przez Słońce; strumień ten ma przekrój koła o promieniu równym promieniowi kuli ziemskiej (R). Energia insolacji, zawarta w tym kole, rozkłada się na powierzchnię kuli o takim samym promieniu. Jeśli więc na jednostkę powierzchni koła przypada energia słoneczna S_0 , to na jednostkę powierzchni kuli pada $1/4 S_0$, bowiem pole kuli jest cztery razy większe od pola koła (ryc. 1a). Energia S_0 , a ściślej moc strumienia promieniowania, czyli tzw.



Ryc. 1. Uproszczony model efektu cieplarnianego; a – bilans promieniowania Ziemi bez atmosfery: S – Słońce, S_0 – promieniowanie słoneczne, E_z – promieniowanie Ziemi, S_m – insolacja Ziemi, S_a – energia pochłaniana przez powierzchnię Ziemi; b – bilans promieniowania idealnej szklarni: S_a – promieniowanie słoneczne, E_z – promieniowanie Ziemi, E_a – promieniowanie atmosfery.

stała słoneczna, wynosi 1368 W/m^2 . Insolacja kuli ziemskiej (S_m) jest więc równa $1/4 \cdot 1368 \text{ W/m}^2$, to jest 342 W/m^2 . Około 29% tej energii ulega odbiciu od powierzchni Ziemi i „ucieka” w kosmos, nie wpływając na bilans promieniowania. Resztę, tj. 71% z 342 W/m^2 ($S_a = \text{około } 243 \text{ W/m}^2$), pochłania powierzchnia Ziemi, która ogrzewa się tak, by własne promieniowanie kuli ziemskiej mogło zrównoważyć insolację. To wypromieniowanie musi więc mieć moc 243 W/m^2 . Temperatura zapewniająca takie promieniowanie wynika z prawa Stefana-Boltzmana, które mówi, że energia promieniowania ciała doskonale czarnego jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej. Obie wielkości (tj. energię i temperaturę) łączy jeszcze tzw. stała Boltzmana ($5,6697 \cdot 10^{-8}$). Ponadto, Ziemia nie jest „doskonale czarna” – przyjmuje się, że „stopień czarności” kuli ziemskiej wynosi około 95%.

Mamy więc równanie:

$$243 = 0,95 \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot T^4,$$

z którego możemy obliczyć T , tzn. temperaturę efektywną powierzchni Ziemi bez atmosfery. Wynosi ona $255,9 \text{ K}$, czyli około -17°C . Różnica między temperaturą rzeczywistą (średnia dla całej powierzchni kuli ziemskiej wynosi około $+15^\circ\text{C}$) a temperaturą efektywną (-17°C) wskazuje, jaki jest termiczny efekt istnienia atmosfery. To właśnie jest efekt cieplarniany. Jego wymiar termiczny wynosi około 32°C ! Jak więc powstaje ten efekt? Dlaczego na powierzchni Ziemi jest tak ciepło?

Wyjaśnieniem są tu radiacyjne właściwości składników atmosferycznych. Są one różne w odniesieniu do promieniowania słonecznego (insolacji, promieniowania krótkofalowego) i promieniowania ziemskiego – podczerwonego. Atmosfera ma zdolność pochłaniania selektywnego. I tak, dla promieniowania słonecznego jest niemal przezroczysta, natomiast promieniowanie podczerwone – pochłania bardzo skutecznie, niemal w całości. Pochłaniając uchodzące z powierzchni Ziemi promie-

niowanie długofalowe atmosfera nagrzewa się i staje się źródłem własnego promieniowania, które rozchodzi się zarówno ku górze, przenikając poza jej granicę, jak i w dół, do powierzchni naszej planety. W ten sposób, poza promieniowaniem słonecznym, powierzchnia Ziemi zyskuje dodatkowy strumień promieniowania zwrotnego atmosfery. Bilans promieniowania powierzchni Ziemi powiększa się, temperatura wzrasta, a wraz z tym rośnie wypromieniowanie, pochłaniane następnie przez atmosferę. Temperaturę powierzchni Ziemi przykrytej atmosferą można obliczyć układając równanie bilansu atmosfery. Na to równanie składa się przychód promieniowania ziemskiego (E_z), promieniowanie zwrotne (E_a) oraz promieniowanie skierowane poza górną granicę atmosfery (E_e). To ostatnie ma energię równoważącą insolację i zapewniającą równowagę energetyczną układu Ziemia–atmosfera względem przestrzeni kosmicznej. Temperaturę efektywną atmosfery już znamy z poprzedniego modelu – wynosi ona około -17°C ($255,9 \text{ K}$) i zapewnia wypromieniowanie w kosmos równe insolacji. Jeśli założyć, że taką samą energię niesie ku powierzchni Ziemi promieniowanie zwrotne, a oba strumienie czerpią energię z wypromieniowania powierzchni Ziemi, to równanie bilansu atmosfery będzie miało postać:

$$\begin{aligned} & (0,95 \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot 255,9^4) + \\ & + (0,95 \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot 255,9^4) = \\ & = 2 \cdot 0,95 \cdot 5,6697 \cdot 10^{-8} \cdot T_z^4, \end{aligned}$$

stąd temperatura powierzchni Ziemi T_z wyniesie $304,5 \text{ K}$ (około 31°C).

Ten wynik odpowiada modelowi „idealnej szklarni” z szybą przepuszczającą bez strat promienie słoneczne i zatrzymującą całkowicie wypromieniowanie gruntu (ryc. 1b). W rzeczywistości atmosfera nie jest tak doskonałą szybą. Niemniej, wyliczona temperatura 31°C pokazuje, jakie są możliwości efektu cieplarnianego.

Realna atmosfera pochłania i traci wskutek rozpraszania promieniowania w kosmos około 25% energii słonecznej. Natomiast

pochłanianie w atmosferze promieniowania ziemskiego wynosi około 96% jego mocy. Sama atmosfera promieniuje więcej ku Ziemi niż w kosmos. W rezultacie powierzchnia naszej planety emituje promieniowanie podczerwone o mocy 408 W/m^2 , a więc znacznie większe od średniej insolacji kuli ziemskiej (243 W/m^2). Emisji takiego promieniowania odpowiada temperatura 291 K, tzn. około 18°C (zob. Kozuchowski K., 1998, s. 31–32). Jest to realna temperatura radiacyjna powierzchni Ziemi.

Jak widać, jest ona nieco wyższa od średniej temperatury obserwowanej na powierzchni Ziemi (15°C). Różnica pochodzi stąd, że w wyliczeniach nie uwzględniamy innych, nieradiacyjnych strumieni energii. Z powierzchni Ziemi uchodzi nie tylko 408 W/m^2 w postaci promieniowania. Ponadto 16 W/m^2 energii Ziemia przekazuje atmosferze drogą przewodzenia, tracąc jednocześnie 81 W/m^2 na skutek parowania. Dlatego temperatura, która panuje na powierzchni Ziemi, jest nieco niższa od temperatury radiacyjnej.

Pochłanianie promieniowania w atmosferze, stanowiące pierwotną przyczynę podniesienia temperatury Ziemi ponad poziom temperatury efektywnej, czyli powstawania omawianego tu efektu cieplarnianego, zachodzi wskutek obecności w powietrzu substancji szklarniowych, absorbujących poszczególne pasma promieniowania zarówno podczerwonego, jak i ultrafioletowego. I tak na przykład tlen (O_2) pochłania fale ultrafioletowe w zakresie 0,01–0,2 mikrometrów (μm), ozon (O_3) – fale ultrafioletowe w zakresie 0,2–0,3 μm oraz podczerwień w zakresie około 9,6 μm , dwutlenek węgla – fale podczerwone w zakresie: 2,3–3,0, 4,2–4,4 i 12,5–16,5 μm , zaś para wodna – fale podczerwone w zakresie: 0,81, 0,93, 1,13, 1,37–2,66, 6,26 i 9–34 μm . Skuteczność poszczególnych substancji szklarniowych zależy jednak nie tylko o liczby pasm pochłaniania, ale i od energii promieniowania związanej z określoną długością fal. Ziemskie promieniowanie podczerwone ma największą energię fal o długości około

10 μm . Pasma pochłaniania ułożone blisko tego maksimum są więc najbardziej znaczące. Istotna jest również koncentracja substancji szklarniowych w atmosferze. Z powyższych względów, największy udział w powstawaniu efektu cieplarnianego ma para wodna, a w dalszej kolejności – dwutlenek węgla, ozon, podtlenek azotu, metan i freony. W literaturze naukowej pojawiają się dość rozbieżne oceny „wkładu” poszczególnych gazów w efekt cieplarniany. Niewątpliwie jednak para wodna ma tu wielokrotnie większe znaczenie niż dwutlenek węgla. Obecność pary wodnej i chmur w atmosferze podnosi temperaturę powierzchni Ziemi o ponad 20°C , podczas gdy dwutlenek węgla – o około 7°C . Trzeba jednak zauważyć, że para wodna osiąga stężenia 3–4%, podczas gdy CO_2 występuje w atmosferze w stężeniu zaledwie 379 cząstek na milion cząstek powietrza (*ppm*). Jeszcze bardziej skuteczne są takie domieszki, jak metan czy freony, występujące w śladowych ilościach.

Współczesne ocieplenie

Już na początku XX wieku, kiedy m.in. nastąpiło znaczne ocieplenie w Arktyce, zwrócono uwagę na niestabilność klimatu. Klimat przestał być postrzegany jako trwała cecha jakiegoś miejsca na Ziemi. Właściwsze stało się nazwanie go statystycznym stanem atmosfery, a więc zbiorowością zdarzeń atmosferycznych, zjawisk i wszystkich fizycznych cech powietrza o dość chaotycznym przebiegu. Wśród nieregularnych wahań, ciągłej zmienności elementów klimatu, zauważono jednak pewne tendencje – tzw. trendy. Ocieplenie na przykład stało się ogólnym trendem temperatury w całym XX wieku i na początku bieżącego stulecia. Mimo przejściowych załamań, m.in. w latach 1940 i 1960, średnia temperatura na powierzchni Ziemi podnosiła się. Wzrost ten w globalnej skali wyniósł w latach 1906–2005 $0,74^\circ\text{C}$ (IPCC, 2007). Podczas 12 ostatnich lat (tj. 1995–2006) aż 11 należało do najcieplejszych od początku globalnej serii pomiarów temperatury powietrza, tj. od 1850 roku. Ocieplenie o 3/4

stopnia w skali wieloletniej i w odniesieniu do całej powierzchni Ziemi ma istotne, odczuwalne w ekosystemie ziemskim znaczenie, zwłaszcza, że w niektórych regionach przyrosty temperatur średnich, a w jeszcze większym stopniu – skrajnych, są dużo poważniejsze. Skutkiem tych zmian jest na przykład gwałtowny zanik trwałej zmarzliny na ogromnych przestrzeniach Eurazji i Ameryki Północnej, kurczenie się tundry, regresja lodowców górskich i zmniejszanie się lodów morskich w Arktyce, a także na Bałtyku (ostatnie pełne zlodzenie Morza Bałtyckiego miało miejsce zimą 1947 roku).

Wzrost temperatury nie ominął Polski. Był on u nas nawet większy niż w innych regionach. Średnia temperatura w drugiej połowie XX wieku wzrosła w Polsce o 0,9°C.

Ocieplenie zaczęło się w wysokich szerokościach geograficznych półkuli północnej, ale przebiegało bardzo nierównomiernie. Dopiero pod koniec XX wieku temperatury w Arktyce osiągnęły poziom z pierwszej połowy stulecia. Wydaje się – bo wciąż nie ma w tym regionie gęstej sieci pomiarowej – że wewnątrz Arktyki, a może i centralna Grenlandia pozostają nadal tak samo zimne, jak przed laty...

Wzrost temperatury nie ominął Polski. Był on u nas nawet większy niż w innych regionach. Średnia temperatura w drugiej połowie XX wieku wzrosła w Polsce o 0,9°C. Coraz częściej w wielu miejscach naszego kraju średnia roczna zbliża się, a nawet przekracza 10°C. Na przykład w 2000 roku średnia dla całej Polski wyniosła 10,1°C. Spośród 10 najcieplejszych lat drugiego półwiecza XX wieku, aż 6 przypadło na okres lat dziewięćdziesiątych. XXI wiek, w tym poprzedni rok, przyniósł kolejne rekordy ciepła. W zachodniej części kraju coraz częściej „brakuje zimy” – średnie temperatury miesięczne w ciągu całego roku są dodatnie.

W Łodzi średnia liczba dni z pokrywą śnieżną w styczniu zmalała do 11 w ostatniej dekadzie XX wieku, podczas gdy przed 1990 rokiem było ich 22. Obliczono, że na wzrost średniej temperatury stycznia (o 1,7°C) składa się wpływ sprzyjającej ociepleniu cyrkulacji atmosferycznej (+1,1°C) oraz wpływ sprzężenia zwrotnego temperatury i pokrywy śnieżnej (+0,2°C). Za pozostałe 0,4°C wzrostu temperatury odpowiedzialne jest prawdopodobnie globalne ocieplenie.

Zmiany klimatu według IPCC

Pojawiające się coraz powszechniej oznaki zmiany klimatu Ziemi, a także rozwój technik i metod numerycznych symulacji systemu klimatycznego, wskazujących na możliwe dalsze zmiany klimatyczne z niepokojącymi konsekwencjami, spowodowały, że w końcu lat osiemdziesiątych powstał Międzyrządowy Zespół do spraw Zmian Klimatu – IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Zespół ten zrzesza setki specjalistów z całego świata, a jego głównym zadaniem jest ocena naukowych teorii na temat natury zmian klimatu, konstruowanie scenariuszy przyszłych zmian, a także przygotowywanie sposobów oddziaływania na klimat globalny oraz adaptacji społeczeństw i gospodarki do oczekiwanych zmian.

W 1990 roku IPCC opracował i opublikował pierwszy obszerny raport, w którym znalazły się m.in. następujące stwierdzenia:

- efekt cieplarniany jest naturalnym zjawiskiem, dzięki któremu temperatura na powierzchni Ziemi utrzymuje się w granicach zapewniających istnienie życia;
- emisja w wyniku działalności człowieka gazów szklarniowych, zwłaszcza dwutlenku węgla i metanu, stale wzrasta i powoduje postępujące ocieplenie; w ciągu stulecia globalna temperatura wzrosła o 0,3–0,6°C;
- dwutlenek węgla jest w 50% odpowiedzialny za ocieplenie;
- koncentracja gazów szklarniowych w atmosferze bardzo wolno reaguje na zmiany emisji, co oznacza, że wzrostowa tenden-

cja utrzyma się jeszcze długo, niezależnie od stabilizacji emisji;

- w celu ustabilizowania koncentracji należałoby niezwłocznie zredukować emisję dwutlenku węgla o 60%, a metanu – o 15%;
- w przypadku utrzymania współczesnej emisji CO₂ do atmosfery – temperatura globalna do końca XXI wieku wzrośnie o około 3°C, a poziom oceanu światowego – o 0,65 m.

Negatywne konsekwencje globalnego ocieplenia

IPCC zwraca uwagę na negatywne konsekwencje ocieplenia dla środowiska przyrodniczego, przede wszystkim ze względu na nieznaną dotąd tempo zmian klimatu i brak możliwości stopniowej adaptacji ekosystemów do takich zmian. W kolejnych raportach – II i III – IPCC dawał coraz bardziej precyzyjne oceny obserwowanych i prognozowanych zmian. Podano m.in., że wpływ antropogenicznej emisji gazów szklarniowych na bilans energetyczny Ziemi jest równoważny 1% energii słonecznej pochłanianej przez Ziemię. Część tej dodatkowej energii promieniowania zamienia się w energię kinetyczną atmosfery, stąd możliwe stają się coraz gwałtowniejsze zjawiska pogodowe – sztormy, cyklony tropikalne itp.

W raporcie z 1994 roku próbowano oszacować ogólny bilans emisji i pochłaniania dwutlenku węgla w ekosystemie ziemskim (tab. 1). Bilans ten niestety „nie zamyka się” – szacunki emisji są większe od ocen pochłaniania, co „jest miarą naszej niewiedzy na temat obiegu dwutlenku węgla w przyrodzie” (Sadowski, Olecka 1998).

Ostatni, czwarty już raport IPCC, ogłoszony w Paryżu w lutym 2007 roku, podtrzymuje i uściśla wcześniej głoszone opinie i oceny. Do ważniejszych można zaliczyć:

1. Stężenie dwutlenku węgla w atmosferze nadal rośnie – w 2005 roku wyniosło już 379 ppm, podczas gdy na początku regularnych pomiarów w 1958 roku osiągnęło ok. 310 ppm. Całkowita emisja roczna na skutek

Tabela 1. Bilans antropogenicznego dwutlenku węgla (IPCC, za Sadowskim i Olecką, 1998)

Składniki bilansu dwutlenku węgla	Ocena (gigatony C/rok)
Emisja ze spalania surowców energetycznych i produkcji cementu	5,5±0,5
Zmiany użytkowania ziemi w tropikach (wylesianie)	1,6±1,0
Całkowita emisja antropogeniczna (a)	7,1±1,1
Pochłanianie w atmosferze	3,2±0,2
Pochłanianie w oceanie	20,0±0,8
Gromadzenie w biosferze (m.in. zalesianie na półkuli północnej)	0,5±0,5
Razem pochłanianie (b)	5,7±1,5
Różnica (a – b)	1,4

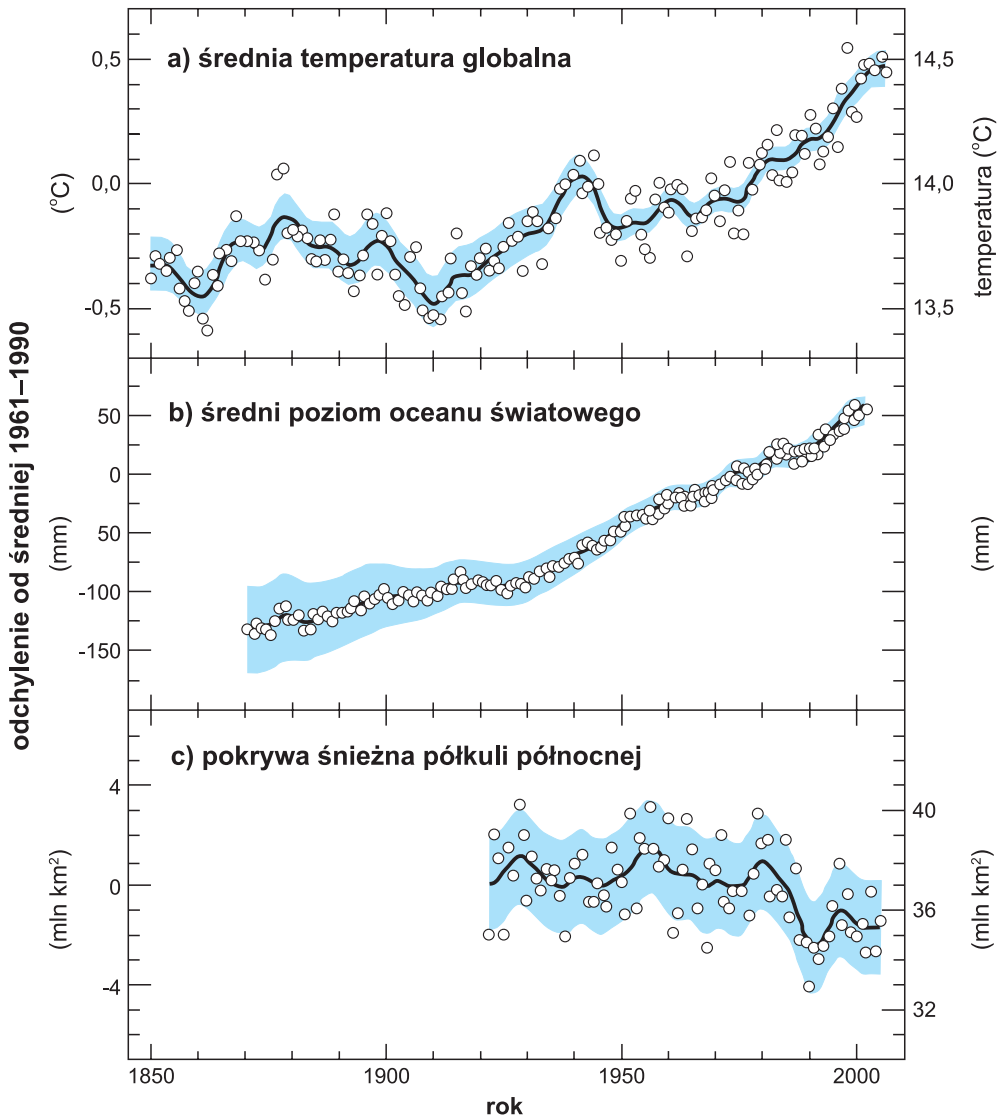
działalności człowieka dochodzi w ostatnich latach do 7,2 Gt C (gigaton węgla).

2. Stężenia w atmosferze takich gazów szklarniowych, jak CO₂, metan i tlenki azotu, są najwyższe od 10 000 lat.

3. **Oddziaływania człowieka na atmosferę i powierzchnię Ziemi powodują per saldo nasilanie się efektu cieplarnianego**, choć występują też oddziaływania zmniejszające ten efekt; dominuje więc antropogeniczna emisja CO₂ (zob. tab. 2 na s. 12). Udział czynników antropogenicznych w efekcie cieplarnianym oceniono na 1,6 W/m² (to zaledwie 0,6% insolacji Ziemi). Zauważono też przyrost insolacji rzędu 0,12 W/m².

4. Skutkiem nasilania się cieplarnianych właściwości atmosfery jest dalszy przyrost temperatury, podnoszenie się poziomu mórz i oceanów oraz redukcja zasięgu pokrywy śnieżnej na lądach (por. ryc. 2). Podnoszenie się poziomu wód jest uwarunkowane przede wszystkim przez tzw. ekspansję termiczną (rozszerzalność cieplną wód), a w dalszej kolejności – przez topnienie lodowców.

5. Na koniec XXI wieku przewidywane ocieplenie na powierzchni Ziemi wyniesie 0,6°C, jeśli uda się utrzymać koncentrację gazów szklarniowych na poziomie z 2000 roku, lub 1,8–4°C – zależnie od rozwoju gospodarczego świata i związanych z nim oddziaływań na środowisko.



Ryc. 2. Współczesne zmiany temperatury powierzchni Ziemi, poziomu oceanu światowego i powierzchni pokrywy śnieżnej na półkuli północnej (w marcu i kwietniu). Odchylenia od średniej z okresu 1961–1990 (wg IPCC, 2007)

6. Poziom oceanu światowego, w zależności od rozpatrywanych scenariuszy zmian, podniesie się o 0,18–0,59 m.

7. Istnieje wiele niepewności dotyczących rozwoju procesów zapoczątkowanych przez antropogeniczne ocieplenie. W szczególności topnienie lodowców i lądolodów może przybrać gwałtowny charakter, gdy odsłaniający się grunt zacznie nagrzewać

się od Słońca. Zwłaszcza Grenlandia narażona jest na taki rozwój ablacji. Stopnienie grenlandzkiej czapy lodowej spowodowałoby wzrost poziomu mórz i oceanów o 7 m! Koncentracja dwutlenku węgla może żywiołowo wzrastać na skutek ogrzania wód oceanu i zmniejszającej się dzięki temu zdolności wchłaniania CO_2 przez wody. Metanu może być jeszcze więcej w wyniku

Tabela 2. Czynniki oddziaływań na bilans promieniowania powierzchni Ziemi (IPCC, 2007)

Czynniki		Moc oddziaływania (W/m ²)
Antropogeniczne	dwutlenek węgla	1,66
	metan	0,48
	tlenki azotu	0,16
	węglowodory	0,34
	ozon stratosferyczny	-0,05
	ozon troposferyczny	0,35
	para wodna w atmosferze	0,07
	zmiana albedo wskutek użytkowania ziemi	-0,2
	zmiana albedo pokrywy śnieżnej	0,1
	aerosol atmosferyczny	-0,5
	zmiana albedo chmur	-0,7
	„efekty liniowe” (samoloty, autostrady i in.)	0,01
Naturalne	wzrost insolacji	0,12
Sumaryczne oddziaływanie antropogeniczne (przedział ufności oceny)		1,6 (0,6–2,4)

rozmarzania regionów subpolarnych i uwalniania tego gazu z gleb tundrowych. Ale można widzieć także scenariusze, w których topnienie lodowców zostanie zrównoważone przez zwiększające się opady śniegu, a rosnąca koncentracja dwutlenku węgla będzie „wyhamowana” przez rozwijającą się asymilację w biosferze...

IV raport IPCC ponownie zwrócił uwagę opinii publicznej, mediów, a także rządów na zagadnienie zmian klimatu. W Wielkiej Brytanii globalna zmiana klimatu uważana jest za jeden z najważniejszych problemów współczesności. Warto zauważyć, że berlińska deklaracja Unii Europejskiej – choć ograniczona do najogólniejszych i bardzo „ostrożnych” opinii – zalicza ochronę klimatu do wiodących zadań współpracy międzynarodowej.

Już w 1994 roku weszła w życie Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie Zmian Klimatu (UNFCCC). Została ona podpisana przez ok. 150 krajów, w tym

przez Polskę. Głównym celem Konwencji jest *stabilizacja gazów cieplarnianych w atmosferze na poziomie, który zapobiegłby niebezpiecznemu oddziaływaniu człowieka na system klimatyczny* (Art. 2. Konwencji). Naukowe zaplecze Konwencji stanowi wspomniany zespół IPCC. Realizacją zadań Konwencji zajęła się zorganizowana w grudniu 1997 roku w Kyoto (Japonia) III Konferencja stron UNFCCC, na której część uczestniczących w niej państw (w tym także Polska) podpisała protokół, zobowiązujący do działań na rzecz ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Uczestniczący w Konferencji politycy, m.in. ówczesny wiceprezydent St. Zjednoczonych Ameryki Al Gore – znany zwolennik ochrony klimatu, postulowali, by zahamować globalne ocieplenie, ale... dbając jednocześnie o interesy własnych krajów, starali się, by ich zobowiązania nie ograniczały gospodarki. Jak pisze uczestnik Konferencji prof. M. Sadowski: *Ostateczne przyjmowanie protokołu odbywało się w sposób chaotyczny, z ogromną liczbą poprawek oraz przerw na uzgadnianie kompromisowych zapisów. Doprowadziło to do sytuacji, że w protokole znalazły się postanowienia zdecydowanie nie dopracowane (...)*.

Polska zobowiązana jest m.in. do redukcji emisji dwutlenku węgla, metanu i podtlenku azotu w latach 2008–2012 o 6% w stosunku do roku 1988. Nie mamy z tym na razie większych kłopotów, bo w wyniku znacznego wzrostu energooszczędności gospodarki oraz zmian struktury przemysłu podczas przemian ustrojowych po 1989 roku produkujemy mniej gazów cieplarnianych niż w roku bazowym (1988).

Naturalne zmiany klimatu

W przeciwieństwie do raportów IPCC i ufających mu badaczy czy polityków, część uczonych traktuje obserwowane zmiany jako przejaw naturalnych fluktuacji wynikających z działania systemu klimatycznego, w którym człowiek ma niewiele do powiedzenia...

Publikacja z 2000 roku nieformalnego zreszczenia „niezależnych naukowców”,

tworzących tzw. *George C. Marshall Institute*, podaje 19 krytycznych opinii o najważniejszych tezach IPCC. Podobny wydźwięk miała tzw. petycja oregońska, w której liczni specjaliści – geofizycy, meteorolodzy i klimatolodzy – zaprotestowali przeciw nadużywaniu autorytetu nauki w forsowaniu koncepcji, wedle której klimat zmienia się pod wpływem działalności człowieka, a ludzie są w stanie kontrolować i powstrzymać tempo tych zmian.

Główne zastrzeżenia dotyczące koncepcji antropogenicznego ocieplenia klimatu są następujące:

1. Rola dwutlenku węgla w atmosferze nie jest tak wielka. Gaz ten ustępuje pod względem właściwości cieplarnianych parze wodnej, która jest podstawowym regulatorem wymiany energii w atmosferze. Para wodna i związane z nią zachmurzenie mają decydujące znaczenie dla przychodów energii słonecznej i dla transferu promieniowania podczerwonego w atmosferze. Modelowanie obiegu, zmian i rozkładu wilgoci w atmosferze jest dotąd mało dokładne.

2. Przyrost zawartości dwutlenku węgla w atmosferze może być zarówno przyczyną, jak i skutkiem ocieplenia. Ogrzewające się oceany oddają rozpuszczony w ich wodach CO₂ do atmosfery, powodując dalszy wzrost zarówno temperatury, jak i stężenia tego gazu w powietrzu.

3. Rekonstrukcje zawartości dwutlenku węgla w przeszłości, wykorzystujące analizy składu zakonserwowanego w pęcherzykach powietrza w lodowcach są wątpliwe – współczesne maksimum wcale nie musi stanowić rekordowej wartości.

4. Obserwowany wzrost temperatury globalnej wykazuje szereg fluktuacji, które nie znajdują wyjaśnienia w zmianach stężenia dwutlenku węgla.

5. Rozkład geograficzny obserwowanego ocieplenia nie odpowiada modelom

zakładającym największe zmiany temperatury w wysokich szerokościach geograficznych.

6. Skala ocieplenia klimatu w XX wieku nie jest tak wielka, jak się powszechnie sądzi. Okres tzw. ciepłego średniowiecza, gdy Grenlandia była prawdopodobnie „zielonym lądem”, a Wikingowie hodowali tam bydło – to przykład ocieplenia zainicjowanego przez czynniki naturalne i większego, niż rzekomo antropogeniczne ocieplenie XX/XXI wieku.

7. Nadzieja związana ze strategią powstrzymania ocieplenia poprzez kilkuprocentowe ograniczenie emisji gazów cieplarnianych do atmosfery jest co najmniej

wątpliwa. Spodziewany efekt tego ograniczenia nie jest większy od błędu oceny składników bilansu energetycznego atmosfery.

8. **Wahania klimatyczne są nadal regulowane przez czynniki naturalne**, takie jak aktywność Słońca, erupcje wulkaniczne, krążenie wód w oceanach itp. Biosfera stanowi formę termostatu, reagującego wzmoczoną roślinnością i fotosyntezą

w epizodach ciepłych. W tych okresach następuje przyjmowanie nadmiaru dwutlenku węgla z atmosfery, co osłabia efekt cieplarniany i hamuje przyrost temperatury.

9. Propagowanie obaw przed zmianami klimatu oraz forsowanie ograniczeń w spalaniu tradycyjnych paliw leży w interesie państw wysoko rozwiniętych, zdolnych do zmian technologii przemysłowych i obawiających się konkurencji tradycyjnie rozwijających się krajów.

Głównym argumentem zwolenników naturalnego charakteru procesów atmosferycznych jest historia klimatu Ziemi. Zmieniał się on wielokrotnie i bardzo gwałtownie bez ingerencji człowieka. Szereg raptownych zmian wystąpiło przy końcu plejstocenu, kolejne fazy ociepleń i oziębień trwały tylko setki lat, a może nawet

Głównym argumentem zwolenników naturalnego charakteru procesów atmosferycznych jest historia klimatu Ziemi. Zmieniał się on wielokrotnie i bardzo gwałtownie bez ingerencji człowieka.

krócej. Potem nastąpiło wielkie optimum holocenu, następnie ochłodzenie epoki żelaza, wreszcie ciepłe średniowiecze i mała epoka lodowa, zakończona w połowie XIX wieku. Skala tych zmian z pewnością była większa od współczesnego przyrostu temperatury, który nie jest czymś wyjątkowym w historii klimatu.

Wnioski końcowe

Ocieplenie współczesne, niezależnie od tego, czy uznamy je za wielkie czy małe, jest **empirycznym faktem**. Spór idzie o jego przyczynę. Jak wszystkie zmiany temperatury na powierzchni Ziemi, tak i obecna zmiana odbywa się w ramach mechanizmu zwanego efektem cieplarnianym. Czy więc działalność człowieka w istotny sposób zakłóciła funkcjonowanie tego mechanizmu? Nie można wykluczyć, że tak się właśnie stało. Zbieżność współczesnego i nasilającego się ocieplenia z antropogeniczną emisją gazów cieplarnianych do atmosfery oraz widocznym wzrostem ich koncentracji w powietrzu może być nieprzypadkowa.

Z drugiej strony – skala obecnych zmian i ocena wkładu antropogenicznych oddziaływań na klimat globalny najprawdopodobniej mieści się w zakresie znanej z historii klimatu jego naturalnej zmienności i zmian naturalnych czynników klimatotwórczych.. Można mieć nadzieję, że system klimatyczny „poradzi sobie” z dodatkową dawką energii, aplikowanej mu przez człowieka. Niewielka zmiana bilansu radiacyjnego nie musi oznaczać radykalnej przebudowy systemu.

Skuteczność hamowania ocieplenia przez redukcję emisji gazów cieplarnianych – o ile taka redukcja we współczesnym świecie jest w ogóle możliwa – wydaje się być bardzo problematyczna, chyba, że... nie o ocieplenie tu chodzi, ale o sterowanie gospodarką światową, o przebudowę technologii przemysłowych, o oszczędność surowców energetycznych itd. Bardziej „ekologiczna”, zrównoważona gospodarka jest lepsza od niepoohamowanej eksploatacji zasobów przyrody, a energooszczędność – jak

najbardziej pożądana. Rozpowszechnienie zasad zrównoważonego rozwoju w tym kontekście można by więc uznać za dobrodziejstwo globalnego ocieplenia.

Byłoby też dobrze, gdybyśmy w dyskusji o zmianie klimatu powrócili do racjonalnych postaw. Przyzwyczailiśmy się już do błędów zdarzających się przy prognozowaniu pogody na najbliższe dni. Dlaczego więc mamy bezwzględnie upierać się przy takim czy innym scenariuszu klimatycznym na całe stulecie? Licząc się z możliwością omyłki, wysłuchujemy z uwagą prognoz pogody. Podobną wskazówkę na przyszłość stanowią scenariusze klimatu.

prof. dr hab. **KRZYSZTOF KOZUCHOWSKI**

Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych,
Katedra Geografii Fizycznej,
ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź,
e-mail: geogrfriz@geo.uni.lodz.pl.

PIŚMIENNICTWO

- *A Guide to Global Warming*, 2000, George C. Marshall Institute, s. 1–21
- Gore A., 1998, *Ziemia na krawędzi*, Wyd. ETHOS, Warszawa
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Basis*, IPCC-Sec@wmo.int
- Kozuchowski K., 1998, *Atmosfera, klimat, ekoklimat*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa
- Kozuchowski K., 2002, *Efekt cieplarniany – realny proces czy science fiction?*, „Geografia w Szkole” nr 2, s. 80–84
- Kozuchowski K., 2004, *Ocieplenie klimatu – mit czy rzeczywistość?*, (w:) *Klimat – środowisko – człowiek*, Polski Klub Ekologiczny, Wrocław, s. 11–23
- Sadowski M., Olecka A., 1998, *Zmiany klimatu – problem globalny i regionalny*, „Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych”, z. 14, s. 21–31
- Sadowski M., Olecka A., 1998, *Kolejne fazy naukowej i politycznej ewolucji poglądów na problem zmian klimatu*, „Przegląd Geofizyczny”, XLIII, z. 3–4, s. 133–146