

## Człowiek a klimat

*Każdy zawsze narzeka na pogodę, ale nigdy nikt nic z tym nie robi.*

MARK TWAIN

### Lodowce topnieją, ale czy za naszą przyczyną?

Czy to naprawdę możliwe, aby działalność człowieka mogła zmieniać pogodę? Kiedy to piszę, jest rześki, pogodny jesienny dzień. Jaki mógłby być taki dzień za 100 lat, w świecie, w którym chemia atmosfery została zmieniona wskutek przemysłowej działalności człowieka?

Nie ma wątpliwości, że Ziemia się ociepla. Lodowce górskie zanikają. Lody na wybrzeżach Arktyki topnieją. Światowe rekordy średniej temperatury powietrza są przełamywane z roku na rok. Okres wegetacyjny wydłużył się. Istnieją też plany porzucenia niektórych wysp na Pacyfiku, które pogrążają się w wodach oceanu. Oczekując na stopienie się arktycznych lodów, morscy przewoźnicy liczą na otwarcie dla żeglugi Przejścia Północno-Zachodniego, którego dawni podróżnicy nadaremnie poszukiwali. Na Oceanie Atlantyckim wystąpiło w ostatnim sezonie tak wiele huraganów, że do kolejnego ich oznaczania zabrakło liter w alfabecie łacińskim i zaczęto stosować oznaczenia literami greckimi – obecnie do litery epsilon.

Oczywiście, pogoda na świecie jest zmienna sama w sobie. O ile prawdopodobne jest, że część naszej dzisiejszej pogody wynika ze zmian klimatu spowodowanych przez człowieka, o tyle nie wiemy, jak wiele z tych zmian zaszłoby samoistnie. Jeżeli ludzie rzeczywiście zmieniają klimat, skąd wiemy, że jest to złe? Jak ewolucja klimatu w przyszłości ma się do dzisiejszych czynników klimatycznych?

### Pogoda a klimat

Na początku powinniśmy dokonać rozróżnienia pomiędzy klimatem a pogodą. Pogoda jest chaotyczna, co znaczy, że nie można jej przewidywać zbyt daleko naprzód. Drobne błędy w prognozach krótkoterminowych nie mają wielkiego znaczenia. Jednak, gdy na ich podstawie opracowuje się prognozę długoterminową, to błędy rosną wraz z czasem przewidywanym w tej prognozie, aż w końcu cała prognoza jest wyłącznie błędem.



Pojęcie klimatu określa pewien rodzaj średniej pogody, powiedzmy uśrednionej mniej więcej z 10 lat. Nie możemy przewidywać szczegółowo deszczu i słonecznej pogody w konkretnych dniach zbyt daleko w przyszłości, ale można podać prognozę średniego opadu deszczu w jakimś miejscu w pewnym okresie roku. Pogoda jest chaotyczna, ale przez uśrednienie można otrzymać coś, co nie jest chaotyczne i jest do pewnego stopnia przewidywalne. Powrócimy do tego tematu w rozdziale 6.

Przewidywane zmiany klimatu spowodowane przez człowieka są małe w porównaniu ze zmiennością pogody. Przewiduje się, że temperatura powietrza w nadchodzącym stuleciu wzrośnie o kilka stopni Celsjusza (p. rozdz. 12). To mało w porównaniu z różnicami temperatury powietrza na równiku i na biegunach, między zimą a latem lub między dniem a nocą. Trudno jest zatem zauważyć zmianę wartości średniej, gdy duża rozpiętość wartości maskuje kierunek zmian. Obliczaniem zmian średniej globalnej temperatury z zapisów temperatury z ponad 100 lat zajmowało się wielu badaczy (p. rozdz. 11).

Jeżeli jakaś wielkość charakteryzuje się dużą zmiennością, powstaje pytanie, czy mała zmiana wartości średniej tej wielkości będzie w ogóle zauważalna. Średnia pogoda jest szczególnie ważna w przypadku opadów atmosferycznych. Poziom wód gruntowych odzwierciedla opad deszczu z minionych tygodni, miesięcy i lat. Dla rolnika może być bez znaczenia, czy deszcz pada we wtorek, czy w sobotę, ale jeśli zmienia się średni opad deszczu w rejonie, to może wpływać na opłacalność upraw. Zmiana klimatu wpłynie na długość okresu wegetacyjnego, częstość występowania upałów, zaleganie śniegu i lodu, intensywność burz oraz lokalizację optymalnych miejsc do wzrostu roślin i prowadzenie działalności rolniczej.

Pogoda zmienia się z dnia na dzień, ale zmiany klimatu są bardziej długotrwałe. Jednym z takich zdarzeń była mała epoka lodowa, obejmująca w przybliżeniu lata 1650–1800, która przyniosła w Europie zmienną pogodę i, według niektórych danych, oziębienie o  $1^{\circ}\text{C}$ . Przed tym wydarzeniem nastąpiło optimum średniowieczne, ze średnią temperaturą powietrza w Europie ok.  $0,5^{\circ}\text{C}$  wyższą niż obecnie. W tym samym czasie na obszarze południowo-zachodnich Stanów Zjednoczonych wystąpiła długotrwała susza. Przyczyny tych zmian klimatu omówimy w rozdziale 11, tu wystarczy zauważyć, że pozornie niewielkie zmiany średniej temperatury powietrza spowodowały znaczne zmiany w zamożności ludzi i wpłynęły na historię. Klimat ostatniego maksimum glacialnego, 20 000 lat temu, był tak odmienny od dzisiejszego, że byłoby to widoczne nawet z przestrzeni kosmicznej, gdy tymczasem średnia różnica temperatury między tamtym okresem a obecnym wynosi tylko ok.  $5\text{--}6^{\circ}\text{C}$  (p. rozdz. 8). Trudno jest zatem stwierdzić, czy dzisiejsze ocieplenie jest naturalne, czy też spowodowane narastającym stężeniem gazów cieplarnianych w atmosferze i innymi oddziaływaniami człowieka na klimat.

## Prognozowanie zmian klimatu

Podstawowym parametrem określającym temperaturę Ziemi jest bilans energii między tą docierającą ze Słońca a energią wysyłaną przez Ziemię w przestrzeń kosmiczną. Utrata ciepła przez Ziemię zależy między innymi od jej temperatury (p. rozdz. 2). Jeżeli inne czynniki same się nie zmieniają, cieplejsza Ziemia traci ciepło szybciej niż chłodniejsza. Ziemia bilansuje swój budżet energetyczny, ocieplając się lub ochładzając do



temperatury, w której równoważą się strumienie energii przychodzącej i wychodzącej. To sprzężenie zwrotne przypomina zlew, do którego napływa woda z kranu. Kran napełnia zlew w pewnym stałym tempie, podczas gdy odpływ ze zlewu zależy od poziomu wody w zlewie. Zlew wypełnia się do momentu, kiedy woda wypływa w takim samym tempie, w jakim napływa (p. rozdz. 3).

Wraz ze wzrostem temperatury Ziemi rośnie energia wypromieniowywana, co stanowi sprzężenie zwrotne stabilizujące temperaturę (p. rozdz. 7) na poziomie, przy którym bilans energetyczny się równoważą. Średnią temperaturę Ziemi można zmienić, modyfikując przychodzący albo wychodzący strumień energii. Jednym ze sposobów podniesienia poziomu wody w zlewie jest szersze otwarcie kranu i odczekanie kilku minut. Woda podniesie się do momentu, kiedy znajdzie nową głębokość wody, przy której szybszy odpływ zrównoważy zwiększony dopływ. Można także zmienić poziom wody przez częściowe przytkanie odpływu. Dobrze w tej roli się sprawdzają skorupki jajek i skórki pomarańczy – jeżeli zlew jest częściowo niedrożny, poziom wody się podniesie.

Energia przychodząca do Ziemi może się zmienić, jeśli Słońce zmieniłoby swą jasność. Niewielkie zmiany jasności Słońca są związane z liczbą plam słonecznych. Niekiedy plamy słoneczne całkowicie zanikają, czemu towarzyszy zmiana mocy Słońca. Minimum Maundera w latach 1650–1700 było jednym z takich okresów i skorelowało się z małą epoką lodową.

Część światła słonecznego docierającego do Ziemi jest odbijana w przestrzeń kosmiczną i nigdy nie zostaje zaabsorbowana (p. rozdz. 7). Jeśli więc jakimś sposobem uczynilibyśmy Ziemię jaśniejszą, bardziej odbijającą światło, wystąpiłoby ochłodzenie. Światło odbijają chmury, a także śnieg. Naga gleba na pustyni odbija więcej światła niż roślinność. Również dym wyemitowany przez elektrownie węglowe zawiera cząsteczki, które mogą odbijać światło. A zatem zmiany w zachmurzeniu, pokryciu terenu i zadymienieniu mogą zmieniać klimat.

W globalnym ociepleniu największe znaczenie ma efekt cieplarniany związany z rosnącym stężeniem  $\text{CO}_2$  w atmosferze.  $\text{CO}_2$  jako gaz cieplarniany utrudnia ucieczkę energii z Ziemi. Gazami cieplarnianymi są także para wodna i metan, przy czym większość gazów w atmosferze nie jest gazami cieplarnianymi; są całkowicie przezroczyste dla światła podczerwonego. Energia wychodząca z Ziemi przechodzi przez nie tak, jak gdyby ich nie było. Gazy cieplarniane mają zdolność absorbowania i emisji światła podczerwonego. Ich wpływ na klimat zależy od stężenia w atmosferze, ponieważ im więcej jest gazu, tym więcej światła jest absorbowane (p. rozdz. 4). Siła efektu cieplarnianego zależy także od struktury termicznej atmosfery (p. rozdz. 5).

Szczególnym gazem cieplarnianym jest para wodna, ponieważ jej ilość w atmosferze jest określona przez klimat. Woda paruje, gdy powietrze jest ciepłe, i ulega kondensacji w postaci kropel wody lub kryształków lodu, gdy powietrze jest zimne. Okazuje się, że para wodna wzmacnia efekt ocieplenia spowodowany przez inne gazy cieplarniane. Podwaja lub nawet potraja efekt zmiany temperatury wzrostu spowodowany wzrostem stężenia  $\text{CO}_2$  w atmosferze. Chmury bardzo skutecznie absorbują i emitują światło podczerwone, działając jak całkowicie nieprzenikalny gaz cieplarniany. Zmiany w zachmurzeniu także wpływają na przychodzący strumień światła widzialnego (p. rozdz. 7).

Działalność człowieka przyczynia się do zmiany klimatu na kilka sposobów. Największym i najdłużej trwającym czynnikiem zmiany klimatu spowodowanym przez



człowieka jest wzrost stężenia  $\text{CO}_2$  wskutek spalania paliw kopalnych. Ilość innych gazów w atmosferze, takich jak metan ( $\text{CH}_4$ ) i inne węglowodory, tlenki azotu i ozon, zmienia się na skutek działalności człowieka. Cząsteczki dymu z kominów i silników o spalaniu wewnętrznym odbijają przychodzące światło widzialne i w ten sposób wpływają na bilans ciepła. Występowanie tych cząsteczek w czystym powietrzu na rozległych obszarach może zmieniać średni rozmiar kropli wody w chmurach, co ma ogromny, lecz bardzo słabo poznany wpływ na odbijanie światła słonecznego (p. rozdz. 10).

Wiele czynników zmieniających klimat zależy od samego klimatu, co prowadzi do sprzężeń zwrotnych stabilizujących lub destabilizujących. Można przytoczyć wiele przykładów, że dane o klimacie z czasów prehistorycznych wskazują na większą zmienność klimatu, niż przewidują modele, prawdopodobnie na skutek istnienia w rzeczywistości dodatknych sprzężeń, których zabrakło w modelach. Na przykład, gdy klimat się ochładza, las zamienia się w tundrę, umożliwiając tym samym odbijanie w przestrzeń więcej przychodzącego światła słonecznego, co jeszcze bardziej ochładza klimat. Uproszczony model zakładający brak zmiany zalesienia w wyniku zmiany klimatu zaniżyłby całkowitą wielkość ochłodzenia. Przy prognozie globalnego ocieplenia właśnie sprzężenia zwrotne decydują o wszystkim. Prognoza byłaby znacznie prostsza, gdyby świat był prostszy (p. rozdz. 7).

Opracowanie prognozy dla nadchodzącego stulecia jest trudne również z tego powodu, że zmiana niektórych składników systemu klimatycznego, np. stopień pokrywy lodowej albo ogrzanie głębokiego oceanu, zajmuje dużo czasu. Powracając do naszej analogii ze zlewem, nie tylko musimy ocenić możliwą zmianę poziomu wody w zlewie, lecz także przewidzieć, jak szybko się on podniesie. W wypadku zlewu nie jest to trudne, natomiast znacznie trudniejsze w wypadku prognoz klimatycznych (p. rozdz. 12).

## Węgiel, energia i klimat

Zmiana klimatu na skutek spalania paliw kopalnych jest dla ludzi niezaprzeczalnie największym wyzwaniem ze strony środowiska, ponieważ emisja  $\text{CO}_2$  stanowi sedno produkcji energii, a ta warunkuje wysoki poziom życia. Sednem rewolucji rolnej, która umożliwia wyżywienie 6 mld ludzi – i zapewne więcej w przyszłości – jest przemysłowa produkcja nawozów sztucznych, która wymaga bardzo dużych ilości energii. Nie jest łatwo zatrzymać emisję  $\text{CO}_2$ , gdyż państwa i korporacje, które emitują wiele  $\text{CO}_2$ , są bardzo zainteresowane dalszym zwiększaniem produkcji (p. rozdz. 9).

Energia, którą uzyskujemy z paliw kopalnych, powstała w procesach jądrowych w Słońcu. Została przyniesiona na Ziemię przez promieniowanie słoneczne, a następnie zamieniona w energię chemiczną przez rośliny w procesie fotosyntezy, zatrzymana w chemicznych wiązaniach węgla, wodoru, tlenu i innych pierwiastków. Rośliny czynią tak z dwóch powodów, jednym jest magazynowanie energii, drugim wbudowywanie węgla pochodzącego z  $\text{CO}_2$  z atmosfery w swoją strukturę (p. rozdz. 8).

Większość organicznych związków węgla występujących w paliwach kopalnych jest produktem fotosyntezy sprzed milionów lat. W geologicznej skali czasu część tych biologicznych związków węgla została zamieniona na paliwa kopalne, takie jak ropa,



gaz ziemny czy węgiel kamienny. Największe są zasoby węgla kamiennego, natomiast zasoby ropy i gazu zostaną wyczerpane w ciągu kilku dziesięcioleci (p. rozdz. 9). Energia zawarta w węglu, zużywana przez rośliny, zwierzęta, a obecnie przez samochody, jest uzyskiwana podczas reakcji węgla z tlenem, wytwarzającej  $\text{CO}_2$ . W wypadku istotnych proces ten nazywa się respiracją, co tłumaczy, dlaczego musimy oddychać (aby uzyskać tlen i usunąć  $\text{CO}_2$ ) i jeść (aby uzyskać niezbędne związki węgla) (p. rozdz. 8).

$\text{CO}_2$  jest uwalniany do atmosfery i włącza się w wiele procesów składających się na obieg węgla w biosferze. Drzewa, gleby pobierają i uwalniają węgiel, wchłania go także ocean. Wycinanie lasów równikowych uwalnia  $\text{CO}_2$  do atmosfery, podczas gdy lasy w wysokich szerokościach geograficznych pobierają  $\text{CO}_2$  z atmosfery. Większość  $\text{CO}_2$  uwalnianego do atmosfery ostatecznie rozpuści się w oceanie, ale proces ten zajmie kilka stuleci. Niewielka część, ok. 10% z uwolnionego  $\text{CO}_2$  będzie stale wpływała na klimat przez setki tysięcy lat (p. rozdz. 10).

## Ocena zagrożenia

Czy ludzkość wpływa na globalny trend ocieplenia? Można spróbować odpowiedzieć na to pytanie, porównując historię temperatury Ziemi z występowaniem różnych czynników, które mogły spowodować zmiany, zwanych bodźcami klimatycznymi. Słońce w niektórych okresach jest silniejsze niż w innych. Wulkany niekiedy wyrzucają do stratosfery pył, który odbija światło słoneczne. Gazy cieplarniane i aerozole z kominów są z kolei czynnikami antropogenicznymi. Wnioski, jakie można wysnuć, są następujące: po pierwsze – robi się cieplej, po drugie – łatwo jest wytłumaczyć ocieplenie zwiększonym stężeniem gazów cieplarnianych, a nie można ich wytłumaczyć przyczynami naturalnymi (p. rozdz. 11).

Prognoza klimatu na najbliższe stulecie mówi o wzroście temperatury o 2–5 °C do 2100 r. Stopień ocieplenia zależy nie tylko od sprzężeń zwrotnych z parą wodną i chmurami, ale także od ewolucji systemu klimatycznego. Sprzężenia zwrotne wpływają zarówno na wielkość, jak i na czas wystąpienia zmian klimatu pod wpływem nowych stężeń gazów cieplarnianych. Wzrost temperatury o kilka stopni nie brzmi katastrofalnie i dla niektórych części świata istotnie tak może być. Skutki takiej zmiany temperatury można rozpatrywać poprzez rozważenie naturalnych zmian klimatu, jakie występowały w ciągu ostatnich 1000 lat – być może o 0,5–1,0 °C, albo pod koniec ostatniego maksimum glacialnego, gdy nastąpiło średnie ocieplenie w skali globalnej o ok. 6 °C. Zmiany temperatury tak małe jak 0,5 °C w czasie średniowiecznego ocieplenia w Europie i w południowo-zachodniej części Stanów Zjednoczonych wywołały długotrwałą suszę, która położyła kres cywilizacji Majów (p. rozdz. 12).

Gdy rozważamy wpływ globalnego ocieplenia na ludzkość, wkraczamy do królestwa nauk społecznych, szczególnie ekonomii. Ekonomisci, podobnie jak meteorolodzy czy klimatolodzy, na podstawie modeli, potrafią prognozować przyszłość. Jedną z metod jest porównanie przewidywanych kosztów zmiany klimatu z przewidywanymi kosztami uniknięcia tej zmiany. Oczywiście, przypisanie wartości pieniężnej przyrodzie jest trudne, ale wszystko ma swoją cenę i przewidywania uwzględniające znaczną redukcję emisji  $\text{CO}_2$  wiążą się z kilkuprocentowym spadkiem światowego produktu narodowego



brutto (PNB). W formie materialnej byłaby to ogromna góra pieniędzy, lecz dla gospodarki, która wzrasta o kilka procent rocznie, koszt kilku procent w ciągu roku jedynie opóźniłby rozwój produkcji o rok lub dwa (p. rozdz. 13).

Ekonomia jest jednak niewłaściwym narzędziem do podejmowania decyzji związanych z globalnym ociepleniem. Wydaje się, że takie postępowanie świata dzikiej przyrody i bioróżnorodności przez ich wycenę w formie pieniędzy jest barbarzyństwem. Ekonomia nie jest dobrym narzędziem do porównywania kosztów w długiej skali czasu z powodu stopy dyskontowej. Wreszcie prognozy ekonomiczne są trudniejsze niż prognozy klimatyczne, ponieważ prawa ekonomii nie są tak proste ani niezmiennie jak prawa w świecie fizycznym. W ostatecznym rozrachunku, problem zmiany klimatu może w równym stopniu podlegać ocenie w kategoriach etyki i sprawiedliwości, co zysków i strat.

Emisja gazów cieplarnianych jest przykładem sytuacji zwanej tragedią wspólnego pastwiska. Korzyści ze spalania paliw kopalnych dotyczą poszczególnych jednostek, natomiast koszty zmiany klimatu ponoszą wszyscy. Zachodzi wówczas naturalna skłonność każdej jednostki do wykorzystywania ogółu. Rozwiązaniem może być jakaś forma zbiorowej regulacji. Międzynarodowe negocjacje doprowadziły do porozumienia zwanego Protokołem z Kioto, którego celem jest ograniczenie emisji CO<sub>2</sub>. Protokół z Kioto, gdyby był skuteczny, ograniczyłby emisję ok. 6% poniżej poziomu z 1990 r., podczas gdy modele obiegu węgla wskazują, że aby naprawdę ustabilizować stężenie CO<sub>2</sub> w atmosferze, potrzebne byłyby cięcia rzędu 50%.

Emisja węgla mogłaby być znacznie zmniejszona przez oszczędność i polepszenie wydajności. Coraz częściej są wykorzystywane źródła energii niewymagające węgla, takie jak wiatr i energia słoneczna. Prognoza zapotrzebowania na energię w nadchodzącym stuleciu zakłada, że w przyszłości będą niezbędne nowe, duże źródła energii. Energia jądrowa jest zasadniczo niezależna od węgla, ale aby sprostać przewidywanemu zapotrzebowaniu na energię, trzeba by codziennie przez najbliższe 100 lat budować kilka elektrowni jądrowych o obecnych parametrach. Są też pomysły umieszczenia baterii słonecznych na Księżycu i przesyłania energii na Ziemię za pomocą promieniowania mikrofalowego, a także umieszczenie wiatraków na latawcach utrzymywanych w strefie prądów strumieniowych na dużych wysokościach.

Wraz ze zwiększającą się technologiczną i intelektualną odwagą, jak również szybko rosnącą populacją, nieuchronnie przejmujemy zadanie zarządzania biosferą. Obyśmy czynili to mądrze!