

Wprowadzenie do zmian klimatu

Prawie wszędzie na powierzchni Ziemi można znaleźć ślady życia. Nawet w tych regionach, które dziś wydają się jałowe, natrafiamy na dowody jego istnienia w przeszłości: skamieniałości, węgiel lub kredę. I prawie zawsze pozostałości organizmów sprzed dziesiątków, tysięcy lub milionów lat są odmienne od tych, które możemy spotkać dzisiaj. Dlaczego? Istnieje wiele przyczyn, a jedną z nich jest ewolucja. Jednakże głównym powodem, dla którego pewne gatunki (np. drzewa liściaste, a nie iglaste) występują w jednym miejscu, a nie pojawiają się w innym, jest klimat – podstawowy czynnik decydujący o procesach biologicznych. Dlatego główną przyczyną, dla której na danym obszarze 5000, 50 000, 500 000 lub 5 000 000 lat temu występowały różne gatunki, była zmienność warunków klimatycznych.

Można też odwrócić tok rozumowania i wykorzystać ślady dawnego życia biologicznego do badania klimatu w przeszłości. Biosfera oddziałuje na klimat: na przykład ekspansja lasów deszczowych zwiększa parowanie i zmienia bilans wody w zlewni, co czyni klimat tego obszaru innym niż byłby, gdyby nie roślinność. Klimat i biosfera kształtują się nawzajem.

Spójrzmy na to z innej strony. Wszystkie żywe organizmy rozwijają się w określonych warunkach termicznych i tolerują w swoim cyklu życiowym temperaturę z pewnego zakresu. Ponadto wymagają odpowiedniej ilości wody, a jej dostępność na kontynentach zależy od warunków klimatycznych. Już te dwa elementy: temperatura i dostępność wody, pokazują, jak ważny jest klimat dla przestrzennego rozkładu występowania, zarówno poszczególnych gatunków, jak i całych zbiorowości.

Jeśli klimat jest tak istotny, to jego zmiany mogą być czynnikiem decydującym o prawdopodobieństwie napotkania określonych gatunków na danym terenie. Fakt występowania pewnych zbiorowości, obecnie lub w przeszłości, można również wykorzystać jako wskaźnik panujących tam warunków klimatycznych. Ta współzależność biosfery i klimatu ma fundamentalne znaczenie. Dotyczy wszystkich gatunków, łącznie, o czym czasem zapominamy, z naszym własnym *Homo sapiens*. Nie zawsze pamiętamy, że na wszystkich kontynentach, oprócz Antarktydy, możemy napotkać pozostałości opuszczonych osad i ślady zaniku dawnych

cywilizacji. Te społeczności rozkwitły, a potem zniknęły, głównie z powodu zmian klimatu.

Jeśli nie zawsze rozumieliśmy, jak bardzo organizmy żywe, także społeczności ludzkie, są poddane kaprysom zmian klimatu, to teraz uświadamiamy sobie, że obecnie człowiek wpływa na klimat w sposób, którego skutki środowisko odczuwa w skali zarówno regionalnej, jak i globalnej, a to z kolei odbija się na człowieku. Dlatego nasza uwaga koncentruje się na badaniu, jak organizmy żywe, w tym człowiek, oddziałują na klimat. W dalszej części książki zobaczymy, że biologia i nauki o środowisku, nawiązujące do ekologii i klimatu, dostarczają nam wiedzy o klimacie w przeszłości i jego zmienności (tę naukę nazywamy paleoklimatologią), która może rzucić światło na to, jaki wpływ mają nasze obecne działania na klimat w przyszłości. Jeśli chcemy zadbać o przyszłość człowieka na Ziemi, może to być informacja bezcenna.

1.1. Pogoda i klimat

Badania natury zmian klimatu wymagają wyjaśnienia, czym różni się on od pogody. Pogoda jest codziennym przejawem klimatu. Klimat danego regionu jest określony przez średnie wieloletnie warunki pogodowe z uwzględnieniem zmian sezonowych. Pogoda jest ze swej natury bardzo zmienna: gdyby była bardziej stabilna, nie mielibyśmy tylu problemów z jakością długoterminowych prognoz. Jeśli klimat danego obszaru ulega zmianie, to te zmiany jesteśmy w stanie zauważyć dopiero po długim czasie, potrzebnym do odróżnienia długoterminowych przekształceń klimatu od naturalnej zmienności pogody. Fizycy i inżynierowie definiują ten problem jako stosunek sygnału do szumu, istotny również w przypadku prądów elektrycznych lub fal elektromagnetycznych w pasmach nadawania stacji radiowych lub widmach promieniowania ciał niebieskich. W przypadku zmian klimatu trudność polega na odróżnieniu sygnału klimatycznego od szumu wynikającego ze zmienności pogody. Na przykład, jedno bardzo gorące lato (lub susza, lub silny monsun, lub...) nie świadczy jeszcze o zmianie warunków klimatycznych. Inaczej, gdy gorące lata powtarzają się przez dziesięć lub więcej lat.

Zanim przystąpimy do badania zmian klimatu, zwłaszcza w kontekście współczesnych problemów, musimy wyjaśnić pewne terminy i opisać procesy prowadzące do współczesnego ocieplenia.

1.2. Efekt cieplarniany

Efekt cieplarniany nie jest zjawiskiem ubocznym związanym jedynie ze współczesnym ociepleniem. Jest on mechanizmem napędowym naturalnego ziemskiego systemu klimatycznego, konsekwencją istnienia atmosfery, a atmosfera jest miejscem, w którym przejawia się klimat.

Odkrycie efektu cieplarnianego przypisuje się francuskiemu matematykowi, Janowi Baptyscie Józefowi Fourierowi (nie mylić ze współczesnym mu chemikiem o tym samym nazwisku). W swoich dwóch artykułach (Fourier, 1824, 1827) opisał

on, jak atmosfera przyczynia się do ocieplenia planety. O mały włos artykuły te nie powstałyby. Podczas rewolucji francuskiej Fourierowi groziło zgilotynowanie i jedynie fakt, że zgilotynowano tych, którzy na niego donieśli, pozwolił mu uniknąć śmierci.

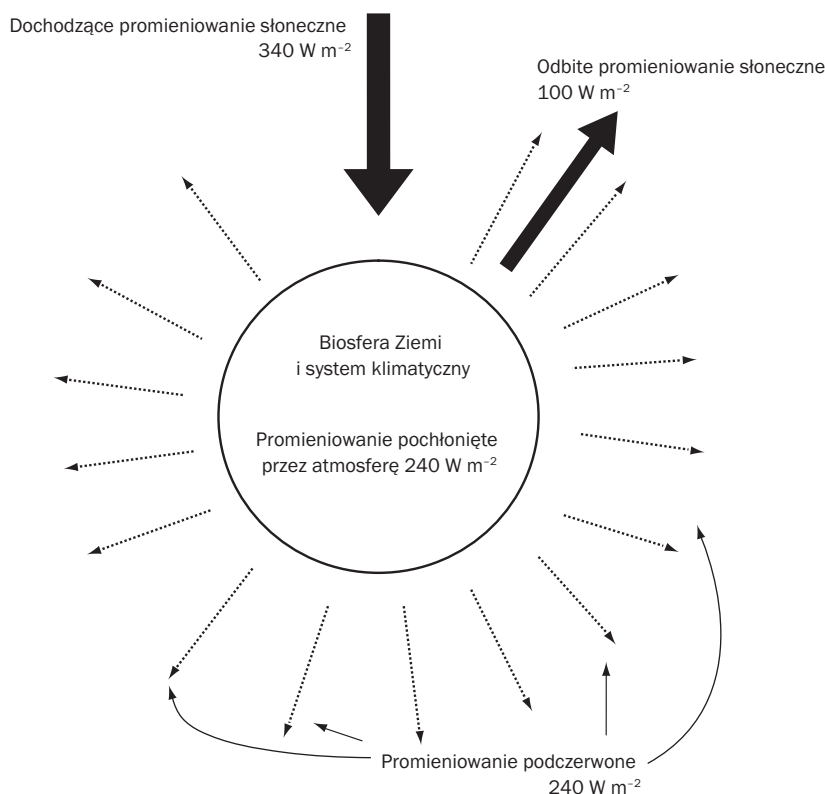
Dobrym sposobem na zilustrowanie efektu cieplarnianego jest rozważenie, jakie warunki panowałyby na Ziemi pozbawionej atmosfery. To jest dużo prostsze, niż się wydaje na pierwszy rzut oka. Musimy jedynie przebyć 384 400 km (lub 238 856 mil) dzielących nas od Księżyca i przyrzeć się panującym tam warunkom. W pozbawionym powietrza środowisku (ciśnienie atmosferyczne na powierzchni Księżyca wynosi jedną bilionową – 10^{-12} ciśnienia przy powierzchni Ziemi) temperatura w ciągu dnia osiąga 390 K (117°C), a w nocy spada do 100 K (–173°C), dając średnią około 245 K (–28°C). Podczas księżycowego dnia promieniowanie słoneczne jest częściowo odbijane od powierzchni skał, a częściowo przez nią absorbowane, ogrzewając skały, które następnie wypromieniowują energię w przestrzeń kosmiczną. Całkowity dopływ energii równa się całkowitemu odpływowi. Jednakże średnia temperatura powierzchni Ziemi jest wyższa i wynosi około 288 K (15°C). Atmosfera ziemska powoduje, że temperatura powierzchni Ziemi jest wyższa prawie o 43 K (43°C). Ogrzanie to jest skutkiem istnienia atmosfery ziemskiej. Jest to naturalne zjawisko, które, choć z różną intensywnością, występowało w atmosferze ziemskiej zawsze, ponieważ nie cała energia promieniowania dochodząca do powierzchni naszej planety od Słońca odbija się z powrotem i ucieka w przestrzeń kosmiczną. Atmosfera pochłania pewną część tej energii, podobnie jak skały na Księżycu. Pochłanianie w atmosferze jest znacznie większe, ponieważ jest ona przezroczysta dla promieniowania o wyższych częstotliwościach, a nieprzezroczysta dla innych, niższych częstotliwości. Skały na Księżycu są całkowicie nieprzezroczyste dla promieniowania słonecznego, dlatego ogrzewa się jedynie powierzchnia skał, a nie ich grubsza warstwa.

Część promieniowania odbitego od powierzchni lub wyemitowanego w postaci promieniowania podczerwonego w dolnej atmosferze zostaje uwięziona w atmosferze dlatego, że promieniowanie z takiego, dla którego atmosfera jest przezroczysta, przekształca się w takie, dla którego atmosfera nie jest w pełni przezroczysta. Fotony mają różne energie. Energia (E) promieniowania elektromagnetycznego (światła, promieniowania cieplnego lub innych typów promieniowania) jest proporcjonalna do jego częstotliwości (ν) lub barwy, przy czym współczynnikiem proporcjonalności jest stała Plancka (h , równa $6,626 \times 10^{-34}$ J s). Atmosfera jest przezroczysta dla światła o pewnych wartościach częstotliwości, a nieprzezroczysta dla innych, zatem promieniowanie o wyższej energii może opuścić atmosferę i uciec w przestrzeń kosmiczną dużo łatwiej niż niskoenergetyczne promieniowanie podczerwone (cieplne). Matematyczna relacja między energią fotonu światła (lub promieniowania elektromagnetycznego o innej długości) a jego częstotliwością została sformułowana, długo po śmierci Fouriera, w 1902 r. przez niemieckiego fizyka, Maxa Plancka. Przedstawia ją następujące proste równanie:

$$E = h \nu$$

gdzie E (energia) w dżulach, a ν (częstość) w hercach.

Gdy promieniowanie słoneczne pada na cząstki pyłów lub kropelki wody w atmosferze lub powierzchnię ziemi, jest przez nie pochłaniane. Z kolei promieniowanie emitowane przez pyły, kropelki, czy powierzchnię ziemi ma niższą energię (i niższą częstotliwość). Atmosfera przezroczysta dla dużych częstotliwości jest nieprzezroczysta dla niższych, cieplnych częstotliwości, pochłania je i w ten sposób ogrzewa się. W rezultacie atmosfera działa jak koc zatrzymujący promieniowanie o niskich częstotliwościach (p. rys. 1.1). Jej działanie jest takie jak szyby w szklarni – pozwala na przenikanie światła o wysokich częstotliwościach, a zatrzymuje niskoenergetyczne promieniowanie ciepłe; stąd termin efekt cieplarniany. Dlatego te składniki atmosfery, które pochłaniają promieniowanie o małych częstotliwościach noszą nazwę gazów cieplarnianych (lub szklarniowych). Irlandzki badacz, John Tyndall w 1861 r., opisał efekt cieplarniany wywierany przez pewne gazy (Tyndall, 1861) i z sukcesem oszacował ich własności pochłaniania ciepła.



RYSUNEK 1.1. Dopływ energii słonecznej i jej bilans w atmosferze. Nie całe promieniowanie słoneczne padające na powierzchnię Ziemi jest odbijane z powrotem w przestrzeń kosmiczną. Część jest emitowana w postaci promieniowania podczerwonego o mniejszej energii i pochłaniana przez atmosferę, czego skutkiem jest jej ogrzanie. Uwaga: Promieniowanie słoneczne dociera do górnej granicy atmosfery z natężeniem 1370 W m^{-2} . Jednak Ziemia jest obracającą się kulą, a nie płaską powierzchnią, więc średnio na jednostkę powierzchni Ziemi natężenie promieniowania słonecznego wynosi 340 W m^{-2}

Znamy wiele gazów cieplarnianych. Niektóre występują w atmosferze w stężeniach zależnych od procesów zachodzących naturalnie w przyrodzie. Wśród nich można wymienić parę wodną (H_2O), metan (CH_4), tlenek azotu (N_2O). Jednak najczęściej wymienianym gazem cieplarnianym jest dwutlenek węgla (CO_2). Istnieją też inne gazy cieplarniane, które nigdy nie były naturalnymi składnikami atmosfery. Należą do nich freony (np. CFC – chloroflourowęglowodory), które są produktem działalności człowieka, wytwarzane przez przemysł chemiczny jako substancje chłodzące i wytwarzające piankę. Wskutek działalności człowieka znacznie wzrosło również stężenie niektórych naturalnie występujących gazów cieplarnianych.

Tyndall nie tylko rozpoznał, że atmosfera zawiera gazy cieplarniane, ale także rozważał, co się stanie, jeśli ich stężenie w atmosferze ulegnie zmianie. Zastanawiał się, jaka byłaby sytuacja, gdyby nie efekt cieplarniany (jak w przypadku Księżyca). Wywnioskował, że spadek zawartości gazów cieplarnianych mógłby spowodować pojawienie się nowej epoki lodowcowej. Jednakże *nigdy* nie pytał, co się stanie, gdy na skutek działalności człowieka zawartość gazów cieplarnianych w atmosferze wzrośnie. Innymi słowy, co się stanie, gdy efekt cieplarniany nasili się pod wpływem działalności człowieka?

Gdy mówimy o globalnym ociepleniu, to w centrum uwagi jest różnica między naturalnym a dodatkowym, generowanym przez człowieka efektem cieplarnianym. Już w 1896 r., szwedzki chemik i laureat nagrody Nobla, Svante August Arrhenius, przedstawił ideę, że dwutlenek węgla wyemitowany do atmosfery na skutek działalności człowieka spowoduje ocieplenie, choć nie użył jeszcze terminu efekt cieplarniany.

Dziś atmosfera rzeczywiście zmienia swój skład w sposób, o jakim myślał Arrhenius, a stężenie dwutlenku węgla wzrasta w dużej mierze dzięki spalaniu paliw kopalnych. W 1765 r., przed rewolucją przemysłową, atmosfera zawierała średnio 280 ppm (cząstek na milion) dwutlenku węgla. Około 1990 r. zawartość dwutlenku węgla wyniosła 354 ppm i stała się wzrastała. W 2005 r. osiągnęła 380 ppm i nadal rośnie.

Jednocześnie Ziemia uległa ogrzaniu. Wzrost temperatury nie był tak regularny jak wzrost zawartości gazów cieplarnianych, ale zarówno ślady biotyczne, jak i abiotyczne (o których więcej powiemy później), oraz bezpośrednie pomiary wskazują na postępujące ocieplenie. Co więcej, dziś wiemy, że Tyndall miał rację. Gdy w atmosferze jest mniej gazów cieplarnianych, ulega ona ochłodzeniu. Tak było podczas epok lodowcowych. Jak zobaczymy później (w rozdz. 3), podczas ostatniego zlodowacenia, gdy Ziemia była zimniejsza, atmosfera zawierała mniej dwutlenku węgla.

Mimo to nadal toczy się dyskusja, czy to współczesny wzrost zawartości dwutlenku węgla w atmosferze przyczynił się do ocieplenia. Alternatywny pogląd głosi, że ocieplenie jest bardzo nieregularne i mieści się w granicach naturalnej zmienności klimatu. By rozstrzygnąć ten problem ONZ i Światowa Organizacja Meteorologiczna (WMO) powołały Międzyrządowy Zespół do spraw Zmian Klimatu (IPCC). W trzech raportach (IPCC, 1990, 1995, 2001a, b) IPCC ustaliło, że „emisja gazów cieplarnianych i aerozoli na skutek działalności człowieka powoduje zmianę składu atmosfery w sposób, który może wywołać zmiany klimatu”.

Współczesny (zachodzący w ciągu ostatnich trzystu lat) wzrost ilości gazów cieplarnianych w atmosferze jest dobrze udokumentowany (tab. 1.1).

TABELA 1.1. Zestawienie informacji o podstawowych gazach cieplarnianych (z wyjątkiem troposferycznego ozonu O_3 , z powodu braku aktualnych danych). Czas życia w atmosferze jest liczony jako stosunek zawartości do szybkości zaniku

Gaz cieplarniany	CO_2	CH_4	CFC-11	CFC-12	N_2O
Stężenie w atmosferze w końcu XVIII w.	280 ppm	0,7 ppm	0	0	288 ppb
Stężenie w atmosferze w 2001 r.	371 ppm	1,75 ppm	252 ppt	480 ppt	315 ppb
Czas życia w atmosferze (w latach)	50–200	12	45	130	114

ppm – cząstki na milion; ppb – cząstki na miliard; ppt – cząstki na bilion.

Jak zobaczymy, każdy z wymienionych w tabeli gazów cieplarnianych w różnym stopniu przyczynia się do antropogenicznego ocieplenia, ale najbardziej dwutlenek węgla. Istnieją dwie przyczyny, dla których wkład różnych gazów do ogólnego efektu cieplarnianego jest odmienny. Po pierwsze, naturalne stężenie i dodatek antropogeniczny każdego z gazów jest różny, po drugie, z powodu fizykochemicznych właściwości, każdy z nich ma inny potencjał ocieplający.

Po rewolucji przemysłowej, na skutek różnorodnej aktywności człowieka, stężenia niektórych gazów w atmosferze istotnie się zmieniły. Na przykład, ilość dwutlenku węgla w atmosferze wzrosła z powodu spalania paliw kopalnych, wylesiania i zmian sposobu użytkowania ziemi. Przyrost zawartości metanu jest wynikiem zarówno systematycznego zwiększania powierzchni pól ryżowych, jak i rozwoju przemysłu paliwowego oraz spalania biomasy. Będzie o tym mowa szerzej w dalszej części, przy omawianiu obiegu węgla. W przeszłości wzrost zawartości metanu (lub spadek w czasach prehistorycznych) miały bardziej złożone przyczyny, np. zmiany klimatu, z powodu których zmieniała się wielkość powierzchni mokradł, będących naturalnym źródłem atmosferycznego metanu.

Zarówno dwutlenek węgla, jak i metan, stanowią ogniwa globalnego obiegu węgla w przyrodzie (p. następny rozdział). Tlenek azotu (N_2O) jest jednym z ogniw obiegu azotu w przyrodzie i podobnie do dwutlenku węgla i metanu pochodzi zarówno ze źródeł naturalnych, jak i antropogenicznych. Naturalnie tlenek azotu powstaje podczas rozkładu materii organicznej w glebie, szczególnie w glebach lasów tropikalnych, w których proces obiegu azotu jest bardziej intensywny, a także w oceanach. Źródła związane z działalnością człowieka obejmują spalanie biomasy i stosowanie nawozów. Podstawowym czynnikiem usuwającym tlenek azotu z atmosfery jest fotoliza – proces zachodzący pod wpływem promieniowania słonecznego i prowadzący do powstania azotu (N_2) i tlenu (O_2).

Drugim czynnikiem powodującym różny udział gazów w globalnym ociepleniu są odmienne własności fizykochemiczne. Na ich podstawie określa się dla każdego gazu tzw. globalny potencjał ocieplający (GWP, *global warming potential*), który wyraża udział jednostki masy danego gazu w ociepleniu w stosunku do efektu wywieranego przez jednostkę masy dwutlenku węgla w wybranym czasie. W myśl tej definicji potencjał ocieplający dwutlenku węgla wynosi 1. Czynnikiem komplikującym ocenę jest różny czas przebywania gazów w atmosferze (p. tab. 1.1). GWP jest wyrażane w stosunku

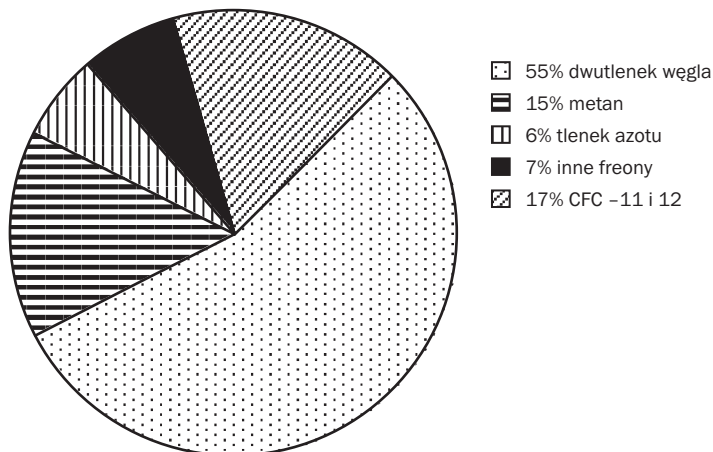
TABELA 1.2. GWP dla podstawowych gazów cieplarnianych w atmosferze w trzech horyzontach czasowych (IPCC, 2001a)

Gaz	Czas życia w atmosferze (w latach)	GWP w ciągu	20 lat	100 lat	500 lat
Dwutlenek węgla	50–200		1	1	1
Metan	12		62	23	7
Tlenek azotu	114		275	296	156

do określonego czasu. Ocena GWP bez określenia ram czasowych traci sens. Można to wyjaśnić na przykładzie metanu, którego połowiczny czas życia w atmosferze wynosi 12 lat. Z 1 kilograma metanu po roku pozostaje w atmosferze jeszcze prawie cały kilogram, po 12 latach będzie jeszcze około połowy kilograma, i zakładając eksponencjalny zanik, po 24 latach pozostanie go jeszcze jedna czwarta. Dla porównania, połowiczny czas życia tlenu azotu wynosi ponad 100 lat. Porównując GWP tlenu azotu i metanu w ciągu dziesięciu lat, otrzymamy inny wynik niż w ciągu 100 lat. Ponadto, z powodu niepewności w określaniu połowicznego czasu rozpadu dwutlenku węgla w atmosferze, różni badacze odmiennie szacują potencjał ocieplający różnych gazów. Może to być irytujące, gdy szacunki zmieniają się z powodu różnych teorii na temat dominującego efektu, na przykład, w przypadku obiegu węgla GWP jest różnie oceniany przez różne zespoły naukowe, a nawet w kolejnych raportach IPCC. Co więcej, ponieważ raport IPCC prezentuje uzgodnione opinie różnych zespołów, nie można ich wyników po prostu pominąć. Przeciwnie, analizując różne modele klimatyczne, widzimy, że szacunki GWP mają zastosowanie zarówno do tworzenia samego modelu, jak i do porównywania wyników.

Tabela 1.2 prezentuje dane zawarte w raporcie IPCC (2001a) dotyczące potencjałów ocieplających dwutlenku węgla, metanu i tlenu azotu. Freony (CFC) i halony (HFC) nie zostały uwzględnione, ponieważ potencjały ocieplające ich związków bardzo się różnią. Typowe freony mają GWP rzędu kilku tysięcy (przy 1 dla dwutlenku węgla) w horyzoncie czasowym około 500 lat. Szczęśliwie, z powodu ich znikomej zawartości, freony i halony łącznie przyczyniają się do mniej niż 1/4 współczesnego ocieplenia (rys. 1.2).

Istnieje jeszcze jeden gaz cieplarniany, o którym tylko wspomniano – para wodna. Jej udział w naturalnym efekcie cieplarnianym jest dominujący, lecz przy niewielkim udziale człowieka. W troposferze i wyższych warstwach atmosfery jest wystarczająco dużo pary wodnej, by absorbować promieniowanie podczerwone w tych pasmach, które mogą być pochłonięte przez parę wodną. Jeśli popatrzymy na Ziemię z przestrzeni kosmicznej, to w częstościach absorbowanych przez parę wodną nasza planeta, nawet tak suche obszary jak Sahara, jest spowita mgłą jak Wenus. Zawartość pary wodnej w atmosferze nie jest jednak stała. Jej ilość w troposferze, warstwie położonej najbliższej powierzchni Ziemi, znacznie zmienia się wraz z wysokością. W dwukilometrowej warstwie bezpośrednio przylegającej do Ziemi zawartość pary wodnej



RYSUNEK 1.2. Udział głównych gazów antropogenicznych w efekcie cieplarnianym w latach 1980–1990 (bez ozonu, którego znaczenie ogrzewające jest trudne do oszacowania). Dane IPCC (1990)

wzrasta wraz z temperaturą powietrza. Wyżej efekt cieplarniany związany z parą wodną jest najsilniejszy, ale i trudniejszy do oszacowania. Co więcej, współczesne modele klimatu uwzględniają wiele sprzężeń zwrotnych, w których para wodna odgrywa istotną rolę. Przy większym ociepleniu można spodziewać się zwiększonego parowania z powierzchni oceanów, co przyczyni się do wzrostu zawartości pary wodnej w atmosferze, a to z kolei zwiększy, może nawet podwoi, efekt cieplarniany, jakiego spodziewalibyśmy się przy niezmięnionej zawartości pary wodnej w atmosferze. Zdolność dzisiejszych (z początku XXI w.) modeli klimatu do określenia spodziewanego efektu pary wodnej w okresie globalnego ocieplenia ocenił w 2005 r. zespół amerykańskich naukowców pod przewodnictwem Briana Sodena. Porównali oni obserwacje satelitarne z lat 1982–2004 w pasmie $6,3 \mu\text{m}$, które leży w zakresie częstotliwości pochłanianych przez parę wodną i jest wykorzystywane do porównania jej zawartości w górnych warstwach atmosfery, z wynikami modelowymi i okazało się, że istnieje między nimi znaczna korelacja.

Chmury (skupiska drobniutkich kropelek wody w nasyconym powietrzu) komplikują nieco ten obraz. Ze względu na silne odbijanie promieni słonecznych przez kropelki, chmury przyczyniają się do ochłodzenia w porze dziennej, w nocy natomiast działają ocieplająco. Bilans między dziennym ochłodzeniem a nocnym ogrzewaniem jest odmienny dla różnych chmur. Proces jest bardzo złożony i jeszcze nie do końca wyjaśniony, ponieważ modele klimatu jedynie przybliżają rzeczywistość. (Do problemu zmian klimatu i towarzyszących mu zmian obiegu wody wrócimy jeszcze w dalszej części tego rozdziału).

Wiadomo, że efekt cieplarniany Ziemi wynosi w przybliżeniu 43°C (o tyle średnio zimniejszy jest Księżyc od Ziemi). Powstaje pytanie, jaka część tego efektu jest naturalna, a jaka jest skutkiem antropogenicznego przyrostu zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze od okresu rewolucji przemysłowej. Wrócimy do tego problemu

w rozdziale 5. Jednakże warto wspomnieć w tym miejscu, że matematycy, Cynthia Kuo z zespołem z Bell Laboratory w New Jersey w Stanach Zjednoczonych porównali, metodami statystycznymi, zmiany zawartości dwutlenku węgla w atmosferze ze zmianami temperatury globalnej w latach 1958–1989 (Kuo i in., 1990). Okazało się, że przebiegi tych dwóch zmiennych są skorelowane w 99,99%. Oznacza to, że gdybyśmy dysponowali 10 000 jednakowych kopii Ziemi i w podobny sposób mierzyli obie wielkości, to tylko jeden raz taki wynik mógłby być otrzymany na drodze przypadku, a pozostałe 9999 wskazują na rzeczywisty związek między obiema zmiennymi: zawartością dwutlenku węgla i temperaturą globalną. Ale zanim zobaczymy, jak antropogeniczny przyrost zawartości gazów cieplarnianych wywołał zmiany klimatu, musimy przyjrzeć się naturalnym źródłom i zbiornikom dwutlenku węgla. W tym celu prześledzimy obieg węgla w przyrodzie.

1.3. Obieg węgla

Węgiel jest jednym z podstawowych pierwiastków niezbędnych do życia na Ziemi. Można znaleźć go w praktycznie wszystkich cząsteczkach (choć niedokładnie w każdej z nich) organizmów żywych, czyli węglowodorach, białkach i kwasach nukleinowych. Węgiel jest podstawowym składnikiem struktur biologicznych, zarówno mikro-, jak i makroorganizmów; zawiera go np. celuloza w roślinach oraz chrząstki i kości zwierząt. Dlatego biocząsteczki, jak zobaczymy w rozdziale 2, mogą być bardzo cenne dla paleoklimatologów, ponieważ część z nich (i szczątki organizmów) może być wykorzystana jako wskaźnik klimatu.

Obieg węgla wiąże się z cyrkulacją węgla w biosferze. Cyrkulacja ta jest sterowana głównie (ale nie wyłącznie) przez procesy biologiczne. Na planetach pozbawionych życia przepływ węgla jest sterowany przez procesy geologiczne. Na Ziemi węgiel zawarty w dwutlenku węgla jest wbudowywany w procesie fotosyntezy w związki organiczne przez rośliny i zdolne do fotosyntezy glony i wraca do atmosfery podczas respiracji roślin, zwierząt i mikroorganizmów w postaci dwutlenku węgla oraz poprzez rozkład materii organicznej w postaci dwutlenku węgla lub metanu. Procesy abiotyczne obejmują spalanie materii organicznej, zarówno w sposób naturalny (np. pożary leśne), jak i w wyniku działalności człowieka (np. spalanie drewna lub paliw kopalnych). Innym czynnikiem abiotycznym są ruchy płyt tektonicznych. Jest to tak zwany długoterminowy obieg węgla w skali milionów lat. Płyty w procesie subdukcji przenoszą osady organiczne w głąb płaszcza Ziemi. Skutkiem ruchu płyt może być aktywność wulkaniczna, dzięki której osady organiczne przeistaczają się w gazy zawierające węgiel (głównie dwutlenek węgla, ale również inne związki lotne), które podczas erupcji wulkanicznych przedostają się do atmosfery. Do procesów abiotycznych należą też utlenianie metanu do dwutlenku węgla i procesy zachodzące w osadach organicznych (często towarzyszące procesom biotycznym). Oszacowanie rozmiaru podstawowych przepływów węgla w jego globalnym obiegu przedstawia rysunek 1.3.

Obieg węgla jest podstawowym ogniwem łączącym biosferę z klimatem Ziemi (i globalnymi zmianami klimatu). Ponadto pokazuje jak duże znaczenie ma zarówno biologia molekularna, jak i holistyczne podejście do biologii.