

Wstęp do części 2

Każde dziecko w Polsce zna wierszowaną bajkę Aleksandra Fredry o małpie w kąpeli, która udając człowieka kręciła kurkami z wodą. Początkowo małpa była zachwycona, że woda jest bardzo ciepła. Kiedy jednak woda stała się gorąca, małpa wpadła na genialny, jej zdaniem, pomysł i własnym palcem zatkała otwór, z którego napływał wrzątek. Poparzona wyskoczyła przez okno, tłukąc przy tym szybę. Zdaniem małpy cała sprawa zakończyła się szczęśliwie, ponieważ tylko popiekła palce.

Alegoria ta, napisana dwieście lat temu, miała ilustrować, jak niezajomość mechanizmów działania urządzeń i zasad fizyki może spowodować uszkodzenia ciała. Ten wiersz definiuje też głupotę jako nieumiejętność wyciągania wniosków z odbytej lekcji. Dzisiaj tę bajkę można potraktować jako alegoryczne przedstawienie, jak ludzie postępują z klimatem: wielu ludzi jest zadowolonych z tego, że nie muszą odśnieżać ulic zimą, a latem nie muszą wyjeżdżać do ciepłych krajów, aby skorzystać z ciepłej morskiej kąpeli. I nie przekonują ich ostrzeżenia naukowców, że ocieplenie klimatu może się źle skończyć. A koniec może być wręcz tragiczny, ponieważ – w przeciwieństwie do małpy w kąpeli – my nie mamy dokąd uciec.

O globalnym ociepleniu napisano zbyt wiele, aby tę wiedzę zamknąć w jednej publikacji. Obecna książka nie ma na celu roztaczania sensacyjnych, katastroficznych wizji. Zawarto w niej opisy kilku podstawowych mechanizmów rządzących klimatem po to, aby wyjaśnić, jak podwyższenie średniej globalnej temperatury wpłynie na klimat na całym świecie. Ma przede wszystkim pobudzić czytelnika do zastanowienia się, jak możemy złagodzić negatywne skutki ocieplenia klimatu,

które jest faktem i pozostanie z nami prawdopodobnie na wiele tysięcy lat. W tej książce są zaprezentowane zarówno korzyści jak i zagrożenia, jakie niesie ze sobą ocieplenie klimatu. Ale jest przede wszystkim poświęcona temu, jak możemy zaprząć naturalne siły przyrody do walki o ochronę życia na Ziemi przed następstwami globalnego ocieplenia.

Zawiera też odważną próbę odpowiedzi na pytanie, czy i jak możemy wykorzystać nadmiar energii zgromadzonej w atmosferze i w wodzie powierzchni oceanów w czasach obecnego ocieplenia klimatu, aby zwiększyć ilość opadów deszczu i śniegu w głębi lądów. W udzieleniu tej odpowiedzi posłużono się wiedzą wyniesioną z pierwszej części tej książki, dotyczącej historii klimatu Ziemi w holocenie. W pierwszej części postawiono hipotezę, że skutkiem wynalezienia rolnictwa przez ludzi w okresie neolitu była zmiana siły i kierunku przebiegu dominujących wilgotnych wiatrów na Ziemi (głównie letnich monsunów w Azji i Afryce), co spowodowało m.in. zamianę Sahary z sawanny w pustynię i zmusiło ludzi na Bliskim Wschodzie, w Indiach i Chinach do opuszczenia neolitycznych miast. To, że Sahara stała się pustynią w ciągu zaledwie 700 lat i że nastąpiło to w tym samym czasie, kiedy miała miejsce rewolucja neolityczna, czyli rozwój rolnictwa i hodowli zwierząt oraz powstanie pierwszych cywilizacji, rodzi podejrzenie, że do tego pustynnienia przyczyniły się gwałtowny wzrost populacji ludzi i rabunkowe gospodarowanie ziemią w okresie neolitu.

W drugiej części książki spróbujemy ustalić, czy i jak w XXI wieku jesteśmy w stanie naprawić szkody wyrządzone naszej planecie przez naszych neolitycznych przodków i spowodować, aby Ziemia stała się bardziej zielona. Skierowanie wilgotnych wiatrów w stronę wnętrza kontynentów pozwoliłoby zmniejszyć negatywne skutki globalnego ocieplenia, np. zahamować powiększanie się obecnych pustyń. Być może udałoby się zmienić niektóre obszary pustynne w bujne ogrody i odtworzyć, wyschnięte przed tysiącami lat, wielkie rzeki i jeziora. Jeśli te działania zakończyłyby się pomyślnie, to stworzylibyśmy nowe optimum klimatyczne holocenu. Nawet, jeśli obietnice zazielenienia pustyń Azji i Afryki są mrzonką, to stawka, o którą toczy się gra usprawiedliwia rozważenie każdej, nawet najbardziej fantastycznej metody

uniknięcia katastrofy, o ile jest to metoda opłacalna ekonomicznie i bezpieczna. Trudno się nie zgodzić, że najbezpieczniejszym sposobem na zmniejszenie stężenia CO_2 w atmosferze jest wykorzystanie roślin, aby pochłonęły ten nadmiar CO_2 . Aby w procesie fotosyntezy CO_2 został przekształcony w cukry i tlen potrzebne są przede wszystkim światło słoneczne i woda. A tej ostatniej w czasie globalnego ocieplenia będzie na lądach brakować. Badając klimat Ziemi obecnie i w przeszłości naukowcy odkryli szereg dodatnich i ujemnych sprzężeń zwrotnych rządzących klimatem. Zastanówmy się, czy wykorzystanie tych mechanizmów pozwoliłoby skierować strumień wilgoci znad oceanów do wnętrza kontynentów. Nadmiar energii zgromadzonej w wodzie powierzchni wód oceanicznych zadziałałby wtedy jak шампан zamknięty w butelce działa na poluzowany korek. Jeśli udałooby się wykorzystać naturalne sprzężenia zwrotne rządzące klimatem do skierowania wody parującej z oceanów w stronę wnętrza lądów, wtedy ocieplenie klimatu stałoby się nie zagrożeniem i przekleństwem dla życia na Ziemi, ale wsparciem dla życia roślin i zwierząt na lądach oraz szansą na lepszą przyszłość ludzkości.

Globalne ocieplenie dzisiaj

Globalne ocieplenie jest faktem. Jego nadejście już w XIX wieku przewidywali fizycy zajmujący się zjawiskiem cieplarnianym powodowanym przez zawarty w atmosferze dwutlenek węgla [174]. Pierwsze oznaki naukowcy obserwowali już w połowie XX wieku [175]. Przejawy były początkowo dyskretne, niezauważalne dla zwykłych ludzi. Nawet wielu naukowców długo uważało je za zwykłe odchylenia od normy lub anomalie spowodowane np. rosnącą aktywnością Słońca, która rzeczywiście miała miejsce w ciągu XX wieku [176]. Pomiary prowadzone przez jednych naukowców były kwestionowane przez innych, którzy, często słusznie, wytykali brak jednolitych metod pomiarów temperatury, a nawet znajdowali zwykłe błędy w pomiarach [177].

Mniej więcej po 2010 roku zmiany klimatyczne spowodowane ociepleniem stały się widoczne gołym okiem i obecnie mało kto je kwestionuje. Wiele oznak można uznać za korzystne dla ludzi i gospodarki. W krajach o klimacie umiarkowanym wydłużył się okres wegetacji roślin i zwiększyła się produktywność rolnictwa. W całym pasie od północnych Niemiec przez Polskę po Białoruś i środkową Rosję jest dzisiaj możliwa uprawa kukurydzy na ziarno, a nie tylko na kiszonkę, jak to było jeszcze pół wieku temu [178, 179]. Dzięki temu kukurydza staje się podstawowym zbożem paszowym w tych krajach. Chociaż zapewne przecenianym, jak wykazuje porównanie wydajności produkcji białka z innymi uprawami paszowymi, np. z lucerną [180]. Niektórzy naukowcy prognozują, że wskutek globalnego ocieplenia i wzrostu stężenia CO₂ w atmosferze globalna gęstość wegetacji powiększy się w ciągu obecnego stulecia nawet o 36% [181], przy czym zyskają kraje położone w klimacie chłodnym i umiarkowanym, a tracą kraje o klimacie cieplejszym.

Wskutek zmniejszenia się morskiej pokrywy lodowej w Arktyce drogi morskie wzdłuż północnych wybrzeży Kanady i Rosji stały się dostępne latem. Sto lat temu wielu śmiałków przypłaciło życiem próby pokonania tej drogi morskiej, tymczasem obecnie jest ona coraz częściej

eksploatowana latem w celach handlowych [¹⁸²], a nawet rekreacyjnych przez turystyczne jachty. Kolejnym przykładem korzystnych zmian klimatu spowodowanych globalnym ociepleniem jest wzrost opadów deszczu w Sahelu po 2010 roku, dzięki czemu w drugim dziesięcioleciu XXI wieku niemal zniknął w tym rejonie problem głodu [¹⁸³, ¹⁸⁴, ¹⁸⁵, ¹⁸⁶]. W latach 70. i 80. XX wieku problem suszy i głodu w Sahelu nie schodził z czołówek gazet. Od kilku lat nie słyszy się o klęsce głodu w tym rejonie, mimo że przyrost ludności tam jest wyższy niż gdziekolwiek indziej na świecie. Liczba ludności w Sahelu podwaja się co 20–25 lat i wynosi obecnie około 200 milionów [¹⁸⁷, ¹⁸⁸]. Ten szybki wzrost stał się możliwy dzięki zielonej rewolucji, czyli wprowadzeniu nawozów sztucznych i środków ochrony roślin, a także bardziej plennych i odpornych na choroby odmian roślin. Nie byłby on jednak możliwy, gdyby nie wzrost opadów deszczu, które w niektórych miejscach nawet się podwoiły. Zwiększenie opadów deszczu w Sahelu jest zapewne największą, jak dotychczas, korzyścią z globalnego ocieplenia. Oznacza zmniejszanie się Sahary w jej południowej części.

Jednak wiele przejawów globalnego ocieplenia jest zdecydowanie niekorzystnych dla życia i dla gospodarki. Co więcej, zgodnie z zasadą „trochę cieplej – dobrze, dużo cieplej – źle”, te niekorzystne następstwa globalnego ocieplenia będą w przyszłości przeważać nad korzyściami. Z powodu zwiększonego parowania wody na przeważającej większości obszaru Afryki i Azji rośnie zagrożenie suszą. Eksplozja demograficzna w Afryce budzi szczególny niepokój. Ten kontynent jest stosunkowo słabo zaludniony, dzięki czemu nadal nie brakuje tam wody i ziemi pod uprawę. Ale liczba ludności w Afryce rośnie tak szybko, że do końca obecnego wieku może przekroczyć 4 miliardy. Ten wzrost liczby ludności w połączeniu z malejącymi zasobami wody, degradacją gleb i położeniem Afryki w gorącym klimacie może wywołać głód na skalę dużo większą niż ten, który miał miejsce przed zieloną rewolucją.

Nasza planeta została wyposażona w naturalne mechanizmy obronne, chroniące przed gwałtownymi zmianami klimatu. Wszystkie można opisać prawami fizyki. Są to dziesiątki sprzężeń zwrotnych. Niektóre działają jak bufony dla zmian klimatu wtedy, kiedy relacja między dwoma

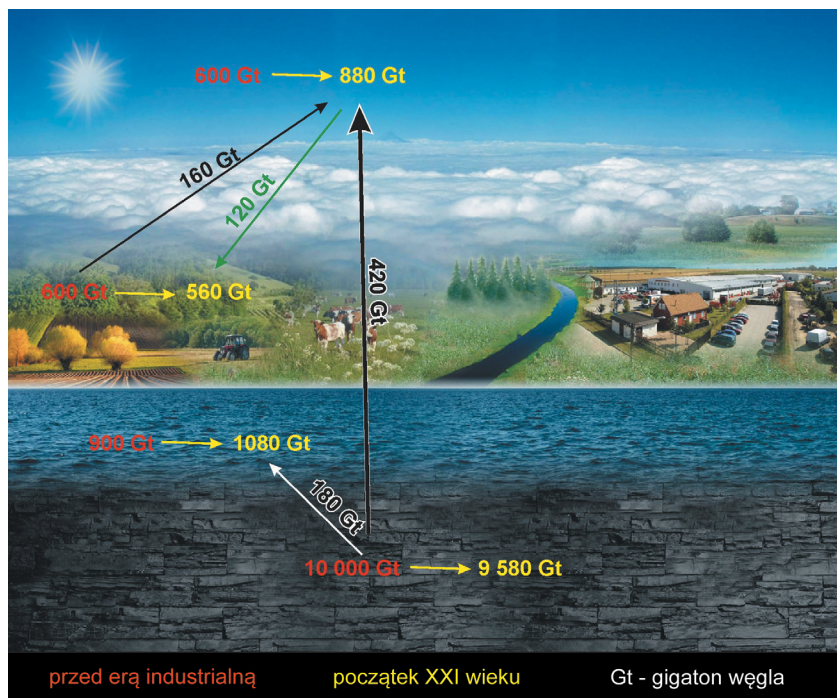
czynnikami ma charakter ujemnego sprzężenia zwrotnego (skutek hamuje przyczynę). Inne działają wręcz odwrotnie: kiedy skutek wzmacnia przyczynę mówimy o dodatnim sprzężeniu zwrotnym. Przykładem dodatniego sprzężenia zwrotnego jest zależność między wilgotnością powietrza przy bezchmurnym niebie a temperaturą powierzchni ziemi. Para wodna jest najobficiej występującym w atmosferze gazem cieplarnianym i dlatego mówimy, że jest najważniejszym gazem cieplarnianym. Jeśli stężenie pary wodnej przy bezchmurnym niebie rośnie, to rośnie efekt cieplarniany i rośnie temperatura powierzchni ziemi. Ten wzrost temperatury powoduje zwiększone parowanie wody, co zwiększa stężenie pary wodnej w atmosferze. Między stężeniem pary wodnej w bezchmurnej atmosferze a temperaturą powierzchni ziemi istnieje zależność, która jest dodatnim sprzężeniem zwrotnym (skutek wzmacnia przyczynę).

Kiedy powietrze zostaje ogrzane, to ulega rozprężeniu i jego gęstość (masa na jednostkę objętości) maleje. Siły wyporu przemieszczają ogrzane (lżejsze) powietrze w wyższe, chłodniejsze warstwy atmosfery, gdzie dochodzi do jego ochłodzenia. Kiedy temperatura unoszącego się powietrza obniża się poniżej punktu rosy, para wodna skrapla się, tworząc chmury (aerazol płynnej lub zamrożonej wody w powietrzu). Wierzchołki chmur mają wysokie albedo (są białe, czyli odbijają światło słoneczne). Wzrost zachmurzenia powoduje, że promieniowanie słoneczne odbija się od wierzchołków chmur, przez co mniej energii jest dostarczane na powierzchnię ziemi. Gęste chmury schładzają powierzchnię ziemi, co zmniejsza parowanie wody. Zależność między zachmurzeniem a temperaturą powierzchni ziemi ma charakter ujemnego sprzężenia zwrotnego. Ten przykład ilustruje, jak Ziemia chroni się przed przegrzaniem spowodowanym wzrostem wilgotności powietrza: do pewnego stopnia wzrost wilgotności powoduje wzrost temperatury powierzchni Ziemi, ale po przekroczeniu pewnej granicy dalszy wzrost wilgotności powoduje obniżenie tej temperatury. W praktyce obserwujemy znaczenie tego ujemnego sprzężenia zwrotnego w Arktyce. Zmniejszaniu się pokrywy lodowej oceanu towarzyszy rosnące zachmurzenie nad tymi terenami, gdzie stopniał lód morski, spowodowane większym parowaniem wody i większą wilgotnością powietrza. Zwiększające się

zachmurzenie Arktyki zwiększa albedo, co częściowo rekompensuje spadek albedo spowodowany topnieniem lodu morskiego [189].

Kluczowym czynnikiem wpływającym na klimat Ziemi są fotosyntetyzujące bakterie (sinice) oraz rośliny. Dzięki nim powstało życie na Ziemi i od nich zależy, czy to życie przetrwa. Kilka miliardów lat temu, kiedy tworzyła się Ziemia, jej atmosfera nie zawierała tlenu. Dominującymi gazami były wówczas azot i dwutlenek węgla. Częsteczką dwutlenku węgla składa się z jednego atomu węgla i dwóch atomów tlenu (CO_2). Fotosyntetyzujące bakterie, a później również rośliny, wychwytywały ten dwutlenek węgla z powietrza [190]. W procesie fotosyntezy przekształcały węgiel w węglowodany (np. glukozę, skrobię i celulozę), a tlen wydalały do atmosfery. Cały tlen zawarty w powietrzu jest produktem fotosyntezy. Odebrany w ten sposób z atmosfery węgiel został zgromadzony pod ziemią, początkowo w formie osadów martwych bakterii i roślin, np. torfu, które następnie, w ciągu setek milionów lat, przekształciły się w ropę naftową, gaz ziemny i węgiel. Dzisiaj traktujemy te osady organiczne (osady pochodzenia biologicznego) jako paliwa kopalne. Niemal od początku rewolucji przemysłowej, czyli mniej więcej od początku XIX wieku, paliwa kopalne są głównym źródłem energii napędzającej rozwój naszej cywilizacji. Spalając je odwracamy proces wychwytywania węgla z atmosfery przez organizmy fotosyntetyzujące, który trwał setki milionów lat. W ten sposób zwiększamy pulę węgla w tzw. szybkim (biologicznym) obrocie węglowym, czyli węgla zawartego w powietrzu, wodach śródlądowych, powierzchni oceanów, roślinach, zwierzętach i w glebie [Rys. 18].

W dzisiejszych czasach organizmy fotosyntetyzujące nadal wpływają na klimat naszej planety. Jest to zarówno wpływ na skalę lokalną, jak i globalną. Lokalnie rośliny zapewniają cień i chronią glebę przed wysychaniem. Zwiększają tarcie między przemieszczającą się atmosferą (wiatrem) a powierzchnią ziemi. W ten sposób osłabiają siłę wiatrów wiejących blisko gruntu. Dzięki temu chronią glebę przed utratą cennych substancji odżywczych, które bez szaty roślinnej byłyby porywane przez wiatr. Martwe szczątki roślin wzbogacają glebę w węgiel, tworząc próchnicę, która zapobiega utracie wody i jest źródłem pożywienia dla



Rys. 18. Szybki obieg węglowy

ogromnego bogactwa życia. Każdy gram gleby jest mikrokosmosem, w którym żyjące bakterie, grzyby i zwierzęta zależne są od siebie nawzajem.

Organizmy fotosyntetyzujące wpływają też na klimat całej planety. Z jednej strony robią to poprzez wychwytywanie CO_2 z atmosfery, przez co zmniejszają efekt cieplarniany i spowalniają globalne ocieplenie. Z drugiej zaś obniżają albedo kontynentów (łądy stają się „ciemniejsze”), wskutek czego przyczyniają się do większego pochłaniania energii słonecznej przez powierzchnię Ziemi. W ten sposób podnoszą temperaturę planety. W warunkach szybko rosnącego efektu cieplarnianego wpływ roślinności na wychwytywanie CO_2 z atmosfery (i tym samym na zmniejszanie efektu cieplarnianego) jest na ogół większy niż chłodzący wpływ rosnącego albedo lądów, do którego dochodzi np. poprzez wycinanie lasów deszczowych w Brazylii i w Indonezji. Hipotetyczne

wycięcie wszystkich lasów deszczowych pokrywających około 7% powierzchni lądów (około 2% powierzchni planety) i zastąpienie ich plantacjami roślin uprawnych, których albedo jest tylko nieznacznie wyższe niż lasu deszczowego (0.2 *versus* 0.1), przyczyniłoby się do zmniejszenia pochłaniania energii słonecznej i ochłodzenia temperatury na Ziemi zaledwie o około 0,2°C. Tymczasem, ponieważ absorbują one niemal 20% dwutlenku węgla pochłanianego w procesie fotosyntezy przez wszystkie rośliny [191], to hipotetyczne wycięcie wszystkich lasów deszczowych spowodowałoby narastanie stężenia CO₂ w atmosferze i zwiększyłoby efekt cieplarniany, czyli podniosłoby temperaturę na Ziemi. Chyba że lasy deszczowe zastąpiono by plantacjami drzew gromadzącymi podobną ilość węgla co las deszczowy w przeliczeniu na jednostkę powierzchni, ale tak się nie dzieje. Wycinanie lasów deszczowych i rabunkowa gospodarka rolna powodują też degradację gleb oraz niszczenie naturalnych ekosystemów. Szacuje się, że rośliny pochłaniają około 25% dwutlenku węgla produkowanego przez ludzi w procesie spalania paliw kopalnych, z czego 20% pochłaniają lasy deszczowe. Kolejne 25% absorbują oceany [192]. Gdyby nie pochłanianie CO₂ przez rośliny i oceany, to stężenie CO₂ w atmosferze rosłoby dwukrotnie szybciej. Od początku rewolucji przemysłowej stężenie CO₂ wzrosło o około 130 ppm (*particles per million*, cząsteczek na milion). Gdyby nie dobroczynny wpływ roślin, to powiększyłoby się o około 200 ppm, czyli wynosiłoby obecnie nie 410 ppm, a około 480 ppm, a średnia temperatura globu wzrosłaby nie o 1°C, a o 2°C. Dlatego należy przyjąć, że ogólny wpływ szaty roślinnej na globalną temperaturę w dzisiejszych czasach jest chłodzący.

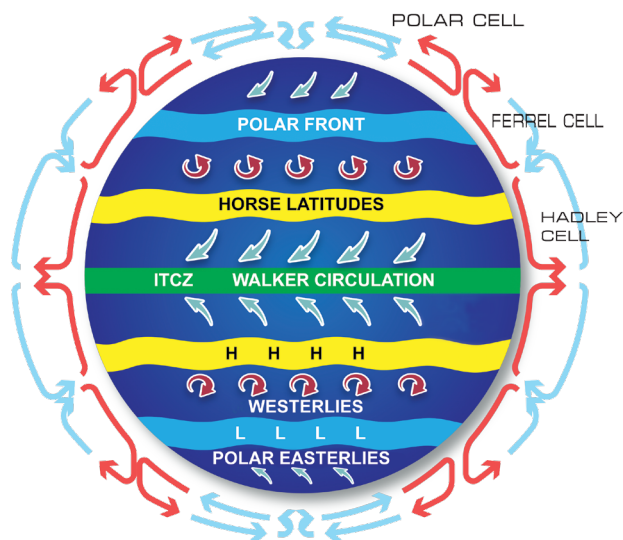
Inaczej było na początku holocenu, kiedy topniały lądolody w Kanadzie i Europie. Wówczas postępujące zalesienie powodowało obniżenie albedo planety, czyli zwiększało ilość energii słonecznej pochłanianej przez Ziemię i temperaturę globalną. Jednocześnie, wskutek ocieplania się klimatu pod koniec epoki lodowcowej, uwalniał się dwutlenek węgla i metan z topniejącej wieloletniej zmarzliny [193] i wskutek ocieplania się powierzchni mórz zmniejszała się rozpuszczalność dwutlenku węgla w wodzie morskiej. Z tego powodu ociepleniu klimatu towarzyszył wzrost stężenia CO₂ w atmosferze, mimo że coraz bujniejsza szata roślinna na

lądach pochłaniała ten dwutlenek węgla i przetwarzała go na biomasę – zawartą w roślinach, grzybach, bakteriach i zwierzętach – a w konsekwencji również w torfowiska i w próchnicę coraz żyzniejszych gleb. Aby uzmysłowić sobie wpływ temperatury wody na rozpuszczalność w niej dwutlenku węgla wystarczy otworzyć dwie butelki wody gazowanej: ciepłej i zimnej. Po otwarciu butelki z ciepłą wodą gazowaną dwutlenek węgla ucieka gwałtownie, podczas gdy po otwarciu butelki z zimną wodą gaz ucieka powoli. To zjawisko jest spowodowane słabszą rozpuszczalnością dwutlenku węgla w cieplejszej wodzie. Wzrost stężenia dwutlenku węgla w atmosferze pod koniec epoki lodowcowej był częściowo spowodowany wzrostem temperatury oceanów, a ten wzrost CO_2 powodował zwiększenie efektu cieplarnianego i dalsze ocieplenie klimatu – jest to przykład kolejnego dodatniego sprzężenia zwrotnego. Również obecne ocieplanie się wody powierzchni mórz zmniejsza rozpuszczalność w niej dwutlenku węgla. Jednak w dzisiejszych czasach zawartość dwutlenku węgla w wodzie morskiej rośnie [194]. Dzieje się tak wskutek zwiększania przez ludzi ilości węgla w szybkim obrocie węglowym, co sprawia że stężenie CO_2 w atmosferze rośnie szybciej niż temperatura powierzchni oceanów. Antropogeniczny wzrost stężenia CO_2 w atmosferze działa na CO_2 zawarty w wodzie powierzchni oceanów tak, jak zakręcona nakrętka butelki – nie pozwala nadmiarowi CO_2 uciec z tej wody.

W obecnym interglacjale (epoce między epokami lodowcowymi) zwanym holocenem, pokrywa roślinna kontynentów ma zasadnicze znaczenie dla cyrkulacji powietrza i transportu wody znad oceanów w głąb kontynentów. Dzięki szacie roślinnej, która ma nawet kilkakrotnie niższe albedo niż piasek (albedo lasu wynosi poniżej 0,2, a piaszczystej pustyni nawet około 0,4), lądy pokryte roślinnością łatwiej się nagrzewają pod wpływem nasłonecznienia. Ten wpływ roślinności na zwiększenie wrażliwości lądów na ogrzanie pod wpływem nasłonecznienia jest zbawienny dla cyrkulacji wiatrów przynoszących wilgoć nad lądy i w konsekwencji dla życia na Ziemi. Ponieważ nasłonecznienie zmienia się w zależności od pory dnia i roku, powstaje w ten sposób różnica (gradient) temperatur między szybciej zmieniającymi się temperaturą lądami a wolniej zmieniającymi się temperaturą morzami i oceanami.

Ten gradient temperatur odpowiada za większość poziomych ruchów powietrza (wiatrów), bez których woda parująca z oceanów nie przedostałaby się nad lądy w formie deszczu i śniegu. Ogrzewanie rozległych obszarów lądów we wnętrzu kontynentów (na przykład Azji lub Afryki) na wiosnę i latem jest szybsze, jeśli większa jest tam szata roślinna.

Obecność roślinności nasila wilgotne wiatry, np. letnie monsuny, wiejące latem w głąb kontynentów. Poza tym na lądach położonych w pobliżu zwrotników pokrywa roślinna, ogrzewając powietrze znajdujące się nad nią, hamuje zstępujące prądy powietrza i, tym samym, hamuje wiatry wiejące w komórce Hadleya, których składową są passaty, czyli wiatry wiejące nisko nad ziemią od zwrotników w stronę równika. Ponieważ passaty są główną przyczyną wysychania obszarów wokół zwrotników i tworzenia tam pustyń (np. Sahary), więc ich osłabienie przez szatę roślinną spowalnia wysuszanie obszarów okołozwrotnikowych. Jest to kolejny przykład dodatniego sprzężenia zwrotnego: im więcej roślinności w rejonach położonych w pobliżu zwrotników, tym słabsze są wiatry wiejące w komórce Hadleya; im słabsze są te wiatry (czyli również passaty, które są składową tej komórki wiejącą przy



Rys. 5. Główne wiatry i fronty pogodowe na Ziemi

powierzchni ziemi), tym więcej wilgoci pozostaje w okolicach zwrotników; im więcej tej wilgoci, tym bujniejsza roślinność; im bujniejsza roślinność, tym słabsze wiatry wiejące w komórce Hadleya, itd. [Rys. 5].

Dzięki coraz dokładniejszym pomiarom temperatur mierzonych na całym świecie, zarówno na lądach, jak i na morzu, wiemy, że od początku ery industrialnej średnia temperatura atmosfery przy powierzchni ziemi wzrosła o ponad 1°C [195]. W związku z globalnym ociepleniem rośnie również temperatura powierzchni oceanów (*Sea Surface Temperature*; SST). To oceany pochłonęły ponad 90% energii dodanej przez ludzi do systemu wskutek spalania paliw kopalnych i zwiększenia efektu cieplarnianego [196]. Mimo pochłonięcia przez nie większości tej tzw. antropogenicznej energii, SST wzrosła od początku ery przemysłowej zaledwie o około $0,25^{\circ}\text{C}$ [197]. Dzieje się tak dlatego, ponieważ woda ma dużą pojemność cieplną, czyli aby zmienić jej temperaturę trzeba dostarczyć (w celu ogrzania) lub odebrać (w celu ochłodzenia) więcej energii niż w przypadku innych substancji.

Wyższa temperatura powierzchni mórz przekłada się na większą pulę ciepła oceanów, czyli większą skłonność wody do parowania. Mogłoby się wydawać, że to zwiększone parowanie wody spowoduje większe opady atmosferyczne na lądach. Tak się jednak nie dzieje. Ilość wilgoci niesiona przez monsuny nie rośnie, gdyż towarzyszy temu spadek wilgotności w centrum kontynentów, zwłaszcza Azji. Wysychanie wnętrza Azji powoduje, że wiosną albedo powierzchni ziemi nie spada dość szybko, aby nasilić te wiatry, ponieważ ilość zielonych roślin wiosną jest mniejsza. Z powodu powiększania się pustyń w Azji (i rosnącego z wiosny na wiosnę albedo) powierzchnia ziemi wiosną mniej się nagrzewa i obszar niskiego ciśnienia nad Azją latem, napędzający letnie monsuny, staje się z roku na rok coraz słabszy.

O postępującym pustynnieniu wnętrza Azji świadczy wiele obserwacji. Wyschnięcie Jeziora Aralskiego w drugiej połowie XX wieku jest zapewne najbardziej spektakularnym tego przykładem, chociaż nie najlepszym. Do wyschnięcia tego jeziora przyczynił się nie tyle spadek ilości opadów lub zwiększone parowanie, ile skierowanie wód Amu-Darii i Syr-Darii na pustynie, gdzie utworzono plantacje bawełny.

Zabieg ten pozwolił, co prawda, przekształcić fragmenty pustyni w pola uprawne, ale stało się to kosztem niemal całkowitego wyschnięcia Jeziora Aralskiego. W sumie powierzchnia pustyń w Azji Centralnej bardzo się powiększyła. Spadł tam również poziom wód gruntowych. Zarówno wody Jeziora Aralskiego jak i wody gruntowe stanowiły bufor zapobiegający szybkim zmianom temperatury. Dlatego w Azji Centralnej powiększa się różnica temperatur między latem a zimą ^[198], co dowodzi wysychania tej części świata.

Dowodem na pustynnienie Azji Centralnej jest też topnienie lodowców w górach Ałtaj ^[199, 200], Tien-Szan, Hindukuszu i części Pamiru ^[201, 202, 203, 204]. Góry te sięgają wystarczająco wysoko, żeby lodowce nie tylko utrzymały się tam, ale nawet powiększyły, gdyby tylko ilość zimowych opadów (śniegu) była tam dostatecznie duża. Topnienie lodowców w tych górach jest po części oznaką globalnego ocieplenia, ale zapewne w jeszcze większym stopniu przejawem wysychania Bliskiego Wschodu i Azji Centralnej, ponieważ źródłem opadu śniegu w wyżej wymienionych górach jest głównie woda parująca z Bliskiego Wschodu i z Azji Centralnej. W innych górach położonych w środkowej Azji lodowce nie zanikają, a niekiedy nawet rosną, mimo globalnego ocieplenia ^[205, 206, 207, 208, 209, 210].

Zmniejszanie się zasobów wody w centrum Azji powoduje, że pojemność cieplna wnętrza tego kontynentu maleje, ponieważ suchy piasek szybciej się nagrzewa i szybciej się ochładza niż piasek wilgotny. Ma to związek z wysoką pojemnością cieplną wody. Szybsze schładzanie się Azji Centralnej zimą powoduje, że Wyż Syberyjski staje się silniejszy, a silniejszy Wyż Syberyjski zmniejsza ilość opadów zimowych w Azji Centralnej. Między tymi dwoma zjawiskami występuje dodatnie sprzężenie zwrotne (skutek napędza przyczynę): silniejszy Wyż Syberyjski powoduje powiększanie się pustyń w Azji, a większe pustynie sprzyjają tworzeniu się silniejszego Wyżu Syberyjskiego zimą. Postępujące pustynnienie wnętrza Azji powoduje, że wiosną ziemia słabiej pokrywa się roślinnością i obszar niskiego ciśnienia w centrum Azji, niezbędny do napędzenia wilgotnych letnich monsunów, jest coraz słabszy. Siła Wyżu Syberyjskiego zależy od tego, jak bardzo wewnątrz Azji ochładza się zimą. A to, jak bardzo

się ochładza, zależy od pojemności cieplnej wnętrza Azji (poziomu wód gruntowych) oraz od wielkości pokrywy śnieżnej, która podwyższa albedo (odbija promieniowanie słoneczne) i tym samym powoduje ochładzanie wnętrza kontynentu. Wielkość pokrywy śnieżnej w Eurazji spada, z powodu globalnego ocieplenia klimatu, co, na chwilę obecną, kompensuje wpływ wysychania wnętrza Azji na wielkość Wyżu Syberyjskiego.

Ilość zimowych opadów w górach Azji Centralnej i w Mongolii zależy od zachodnich wiatrów średnich szerokości geograficznych (*Middle-Latitudes Westerlies*; MLW) półkuli północnej. Te wiatry wieją między Zwrotnikiem Raka a Północnym Kręgiem Polarnym. Przenoszą one wilgoć z zachodu na wschód. Początkowym źródłem tej wilgoci są ciepłe wody Północnego Atlantyku, czyli Prąd Zatokowy. Transportują wilgoć głównie w wirach powietrza o obniżonym ciśnieniu (obszarach niżowych), zwanych cyklonami, które na półkuli północnej obracają się przeciwnie do kierunku ruchu wskazówek zegara. Nie należy ich mylić z cyklonami tropikalnymi, które są wirami powietrza o obniżonym ciśnieniu, które powstają w okolicach zwrotników i przemieszczają się na zachód oraz w stronę biegunów Ziemi. Transport wody przez MLW przypomina żabie skoki: woda jest przenoszona na wschód, gdzie spada jako deszcz lub śnieg, następnie paruje i jest porywana przez kolejny cyklon, który przenosi ją dalej na wschód i tak dalej, aż do Mongolii.

Silniejszy Wyż Syberyjski hamuje te wiatry i utrudnia przenoszenie wilgoci od Północnego Atlantyku na wschód zimą. Wysychanie Azji Centralnej zwiększa siłę i zasięg Wyżu Syberyjskiego, co nieuchronnie prowadzi nie tylko do zmniejszania się lodowców w górach Azji Centralnej, ale powoduje też zmniejszenie ilości zimowych opadów w Mongolii. Skutkiem tego jest powiększanie się pustyni Gobi. Powiększanie się pustyni Gobi leżącej na granicy Chin i Mongolii sprawia, że wiosną mniejsze obszary stepów Mongolii pokrywają się zielenią, ziemia mniej się nagrzewa i wiatry napędzające monsun wschodnioazjatycki w północnych Chinach są coraz słabsze. Oznacza to coraz mniejsze opady monsunowe w północnych Chinach latem. Jednocześnie przez wyższe temperatury powierzchni Oceanu Spokojnego (wskutek globalnego ocieplenia), rośnie wilgotność monsunu wschodnioazjatyckiego

w południowych Chinach. Dlatego obserwowane pustynnienie Azji Centralnej oznacza, że ilość letnich opadów będzie rosła w południowych Chinach, ale będzie spadać w Chinach północnych. Badania paleoklimatologiczne wykazały, że przesuwanie głównego wektora monsunu wschodnioazjatyckiego na południe (coraz słabszy monsun w północnych Chinach i coraz silniejszy w południowych) trwa od zakończenia optimum klimatycznego holocenu, co opisano w pierwszej części tej książki.

O postępującym obniżaniu się poziomu wód gruntowych na Bliskim Wschodzie świadczy wysychanie studni, rzek ^[211, 212] i jezior w Iranie (np. jeziora Urmia) ^[213, 214, 215]. Są to najbardziej dobitne dowody zmniejszania się ilości opadów niesionych przez zachodnie wiatry średnich szerokości geograficznych (MLW) na Bliski Wschód. Najbardziej prawdopodobną przyczyną osłabiania się MLW jest stopniowo potężniejący Wyż Syberyjski zimą. Spowodowane tym pustynnienie jest nasilane przez rosnącą temperaturę latem. Kolejnym powodem jest postępujące wylesianie i pustynnienie wywołane przez ludzi i hodowlane zwierzęta. Stopniowe zanikanie lasów i powiększanie się terenów pustynnych odpowiadają za nasilenie zstępujących prądów powietrza, które powodują podgrzewanie powierzchni ziemi (ponieważ kompresja powietrza jest procesem egzotermicznym, czyli przebiega z wydzielaniem ciepła) i nasilających wysychanie. O tym, że kompresja powietrza powoduje jego ogrzanie wie każdy, kto kiedykolwiek pompował pompką piłkę lub oponę roweru. Z tego powodu temperatury na pustyniach w Iranie są rekordowo wysokie, mimo, że znajdują się one stosunkowo daleko od równika. Procesy pustynnienia i wylesiania na Bliskim Wschodzie zachodziły najszybciej w czasie rewolucji neolitycznej, około 4–5 tysięcy lat temu, co opisano w pierwszej części tej książki, ale obserwujemy je tam nadal i mają tę samą przyczynę: przeludnienie i rosnące wykorzystanie ziemi przez ludzi na potrzeby rolnictwa i hodowli. Z tą różnicą, że dzisiejsza gospodarka ziemią jest mniej rabunkowa niż w neolicie.

Dowodem na pustynnienie Bliskiego Wschodu jest też topnienie lodowców w Tybecie i górach otaczających Tybet, zwłaszcza w górach wokół zachodniego Tybetu. Otrzymują one większość opadów zimą,

dokąd niesione są przez MLW. Właśnie wysychanie Bliskiego Wschodu, a nie wzrost globalnych temperatur na Ziemi jest główną przyczyną topnienia lodowców w Himalajach i wokół zachodniego Tybetu, ponieważ wysokość gór wokół Tybetu i wysokość samej Wyżyny Tybetańskiej jest wystarczająco duża, żeby lodowce tam się utrzymały, a nawet aby się powiększały, jeśliby tylko ilość opadu śniegu zimą była tam odpowiednio duża. Dowodem na to może być fakt, że lodowce wokół zachodniego Tybetu (w górach Pamir, Kunlun, Hindukuszu i Himalajach) były największe na początku holocenu wtedy, kiedy na Bliskim Wschodzie rosły gęste lasy, a miejsce dzisiejszych słonych pustyń zajmowały jeziora, stepy i sawanna [127, 128, 129, 130, 131, 132], mimo że temperatury były wówczas najwyższe w holocenie. Prawdopodobnie z powodu tych lodowców na początku holocenu wiatr napędzający indyjski monsun letni (ISM) był słabszy. Wiemy o tym, ponieważ w odwiertach z dna zachodniej części Oceanu Indyjskiego stwierdzono dowody na mniejszy niż dzisiaj upwelling, czyli wynoszenie głębokich wód na powierzchnię przez wiry Letniego Prądu Somalijskiego [83]. Dowody na słabsze wiatry napędzające ISM na początku holocenu znajdujemy też pod dnem morza u zachodnich wybrzeży Indii [151]. Analiza izotopów tlenu wskazuje, że na początku holocenu opady w Ghatach Zachodnich (górach na zachodnim wybrzeżu Indii) były małe, a wzrosły dopiero około 8 tysięcy lat temu, kiedy wskutek globalnego ochłodzenia i suszy spowodowanych wydarzeniem 8.2 ky zmniejszył się zasięg lodowców wokół zachodniego Tybetu. Zostało to szerzej opisane w osobnym artykule i w pierwszej części tej książki, która dotyczy historii klimatu Ziemi w holocenie [216, 217].

W tym miejscu należy wspomnieć o korzystnym wpływie rosnącego stężenia dwutlenku węgla w atmosferze na roślinność (i tym samym na albedo). Optymalne stężenie CO₂ dla roślinności wynosi między 500 a 1000 ppm (w zależności od rodzaju roślin), czyli jest wyższe niż obecne 410 ppm. Oznacza to, że dzięki wyższym stężeniom CO₂ w atmosferze (oczywiście, przy zapewnieniu wystarczającej ilości wody i światła słonecznego) rośliny wiosną bardziej się zielenią i w ten sposób bardziej obniżają albedo wnętrza Azji. Dzięki bardziej zielonym niż kiedyś roślinom

osłabienie monsunów letnich nie jest tak duże, niż byłoby gdyby rośliny nie reagowałyby na wzrost stężenia CO_2 zwiększeniem fotosyntezy. Spadek albedo lądów na wiosnę jest zależny od gęstości wegetacji, czyli nie tylko od ilości roślin, ale też od intensywności ich fotosyntezy. Rośliny nie tylko odbierają nadmiar dwutlenku węgla z powietrza, ale też napędzają letnie wiatry niosące wilgoć znad oceanów w głąb lądów. Nasza planeta dysponuje mechanizmem obronnym, fotosyntezą, który wykorzystuje, aby uchronić życie na planecie przed negatywnymi skutkami rosnącego stężenia CO_2 w atmosferze. Stymulując ten mechanizm ludzie mogliby pomóc ochronić życie na Ziemi.

Już dzisiaj wiele zmian klimatu nie jest korzystnych dla życia. Z powodu globalnego ocieplenia nasilają się ekstremalne zjawiska pogodowe. Tajfuny i huragany są częstsze i silniejsze. Na terenach obfitujących w wodę powodzie są gwałtowniejsze, natomiast na obszarach zagrożonych wysychaniem powiększają się pustynie. Wszystko dlatego, że wyższa temperatura powoduje zwiększone parowanie wody.

Bilans wody na lądach jest określany za pomocą stosunku opadów do parowania (*precipitation/evaporation ratio* albo w skrócie *P/E ratio*). Jeśli na danym obszarze ten stosunek jest większy od jedności (opady są większe niż parowanie), to mamy do czynienia z nadmiarem wody, która jest odprowadzana rzekami z lądów do mórz. Jeśli ten stosunek jest mniejszy od jedności, to obniża się poziom wód gruntowych i zaczyna się pustynnienie. Rosnące temperatury powodują wzrost parowania wody zarówno nad obszarami morskimi jak i lądowym. Dlatego wilgotne wiatry wiejące znad morza stają się coraz wilgotniejsze, a te obszary lądów, gdzie wilgotne wiatry nie docierają, stają się coraz bardziej suche. Innymi słowy, wskutek globalnego ocieplenia klimatu na ogół opady deszczu i śniegu rosną na terenach, gdzie współczynnik *P/E* był już wcześniej wyższy od jedności, a tam, gdzie współczynnik *P/E* był mniejszy od jedności lub bliski zeru, przyspiesza pustynnienie. Ponieważ prognozy mówią, że temperatura globalna będzie nadal rosła, to należy się spodziewać dalszego powiększania się pustyń, zwłaszcza w Azji, a także coraz gwałtowniejszych powodzi na obszarach już teraz zagrożonych powodzią. Chyba że uda się nam wykorzystać wiedzę

z paleoklimatologii, aby zmienić kierunek przeważających wilgotnych wiatrów na Ziemi i skierować je w stronę suchego wnętrza kontynentów.

Wraz ze wzrostem średniej temperatury na Ziemi dochodzi do topnienia lądolodów Grenlandii i Antarktydy oraz lodowców w górach. Woda spływająca z topniejących lądolodów i lodowców spływa do oceanu i podnosi poziom mórz. Do tego wzrost temperatury wody morskiej powoduje zwiększenie jej objętości, wskutek rozszerzalności cieplnej wody. Rozszerzalność cieplna wody jest odpowiedzialna za większość z obecnego wzrostu poziomu mórz. Obecnie (w 2020 roku) poziom morza rośnie o około 3,2 mm rocznie, co oznacza wzrost o 3,2 metra na tysiąclecie. Ponieważ jednak stężenie CO₂ w atmosferze nadal zwiększa się, więc należy się spodziewać dalszego wzrostu temperatury globalnej. Jeśli globalna temperatura będzie nadal rosła, to tempo wzrostu poziomu mórz przyspieszy. Prognozowanie tego stężenia CO₂ i wzrostu temperatury jest trudne, gdyż nie wiadomo, jak szybko i w jakim stopniu ludzkość ograniczy emisję CO₂ do atmosfery.

W 2019 roku mieliśmy do czynienia z kilkoma ekstremalnymi zjawiskami, które świadczą o coraz większym wysychaniu centrum Azji, osłabieniu siły letnich wilgotnych monsunów i powiększaniu się Wyżu Syberyjskiego. Pierwsze, to susza latem w Indiach, spowodowana rekordowo wysokimi temperaturami. Drugie, to susza latem na Syberii, która była przyczyną pożarów lasów [218] i niemal całkowitego wyschnięcia Leny [219]. Rzeka ta zwykle niesie niemal 10 razy więcej wody niż Wisła, jednak latem 2019 roku poziom wody w niej był tak niski, że promy kursujące w Jakucku (to miasto nie ma mostu) osiadły na mieliźnie. Wyjątkowo mroźna zima 2019/2020 roku na Bliskim Wschodzie też była konsekwencją wzmocnienia Wyżu Syberyjskiego. Niemal w całej Turcji (za wyjątkiem wąskiego pasa wybrzeża) od listopada 2019 roku do lutego 2020 roku temperatury były niższe, nawet o około 10 stopni, niż w środkowej Szwecji. Podobnie chłodna zima miała miejsce w Iranie, Syrii a nawet w Jordanii, południowym Iraku i Arabii Saudyjskiej, gdzie po raz pierwszy od dziesięcioleci spadł śnieg. Mroźna zima na Bliskim Wschodzie mogła być skutkiem suszy na Syberii latem 2019 roku, która spowodowała, że Wyż Syberyjski zimą 2019/2020 roku był silniejszy niż

zwykle, mimo mniejszej pokrywy śnieżnej spowodowanej ociepleniem. W połowie stycznia 2020 roku ciśnienie powietrza w Polsce osiągnęło rekordowo wysokie wartości. Jednak w tym przypadku ten obszar wysokiego ciśnienia nie przyszedł od strony Syberii, ale od strony Atlantyku. Z powodów, które nie są do końca jasne, wzmocnieniu Wyżu Syberyjskiego towarzyszy silniejszy Wyż Azorski [100].

Wiele wskazuje, że powyższe sytuacje, które miały miejsce w Eurazji w 2019 i 2020 roku nie są jednorazowym odchyleniem od normy, ale ilustracją trendu, kierunku zmian klimatu. Świadczą one o potężniejszym Wyżu Syberyjskim, który przynosi mroźną i suchą zimę w Eurazji. O tym, że może to nie być jednorazowy epizod, ale tendencja zmian klimatu świadczą obserwowane od co najmniej 20 lat objawy wysychania centrum Azji: zmniejszanie się lodowców w górach Azji środkowej [200, ²²⁰, ²²¹], zmniejszający się dopływ wody do Jeziora Bajkał po 2010 roku [²²², ²²³, ²²⁴], powiększanie się pustyni w Azji [²²⁵], wysychanie Jeziora Aralskiego [²²⁶, ²²⁷], czy wysychanie jezior i obniżanie się poziomu wód gruntowych w Iranie [212, 213, 214]. Jeśli takie lata będą się powtarzać, to grozi to tym, że Wyż Syberyjski stanie się wyjątkowo silny, a co za tym idzie, powiększy się zasięg pustyni Gobi w Chinach, pustyni Thar w Indiach, pustyni na Bliskim Wschodzie i w Rogu Afryki, czyli w Etiopii, Somalii i północnej Kenii. Mroźne i suche zimy na półwyspie Dekan opóźnią nadejście indyjskiego monsunu letniego, a wysokie wiosenne albedo wnętrza Azji i północnych Indii i Pakistanu osłabi wiatry napędzające ten monsun. Może się nawet zdarzyć, że wiatry napędzające indyjski monsun letni będą za słabe, żeby wilgotne masy powietrza sięgnęły do środkowych i północnych Indii i Pakistanu. I to mimo coraz wyższej temperatury powierzchni morza (SST) Oceanu Indyjskiego, który zwiększy tzw. pulę ciepła Oceanu Indyjskiego (*Indian Ocean Warm Pool*, IOWP), czyli źródła wilgoci dla letnich monsunów. Jeśli ten scenariusz będzie się powtarzał przez kilka lat z rzędu, to wiele regionów Pakistanu oraz północnych Indii może zamienić się w pustynię, podobną do takiej, jaką obserwujemy dzisiaj na Półwyspie Arabskim. Będzie to tragedią dla ponad pół miliarda ludzi zamieszkujących dzisiaj Pakistan i północne Indie. Rolnicy stracą plony, a ludzie w miastach nie

będą mieli wody do picia. Żywność stanie się droga i trudno dostępna. Pojawia się głód i choroby. Wielu mieszkańców Pakistanu i północnych Indii ma rodziny w Wielkiej Brytanii, Kanadzie, Australii, Europie lub Stanach Zjednoczonych. Te rodziny będą chciały pomóc swoim bliskim zapraszając ich do siebie. Przyjęcie wielu milionów uchodźców przez te kraje rozwinięte oznaczałoby zmianę stosunków demograficznych w Europie, Ameryce Północnej i Australii. Przeludnienie i konflikty na tle narodowościowym rozprzestrzeniłyby się na całą Ziemi.

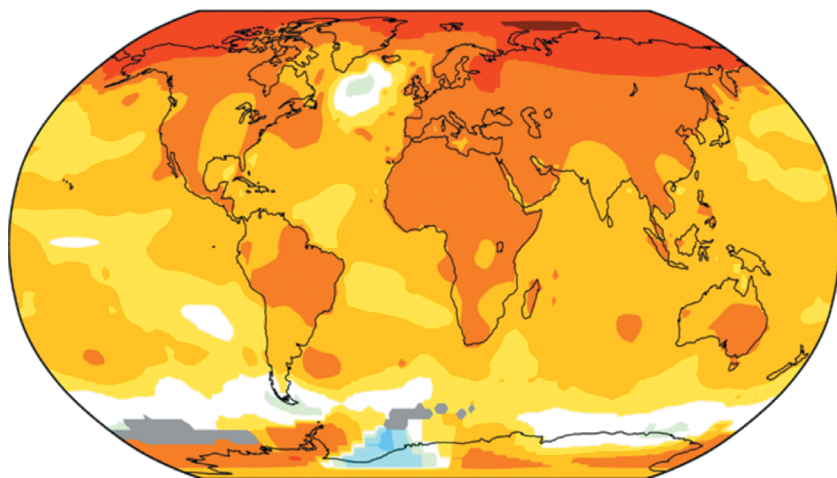
W skali całego globu coraz szybciej rośnie konsumpcja energii i dóbr materialnych. W krajach bogatych niektórzy ludzie dobrowolnie rezygnują z konsumpcyjnego stylu życia, z posiadania nadmiernej liczby rzeczy, podróży, jedzenia mięsa, własnego samochodu. Inni zmniejszają swój „ślad węglowy” kupując samochody elektryczne, rezygnując z podróży samolotami i samochodami spalinowymi lub instalując na dachach swoich domów panele fotowoltaiczne. Takie postawy świadczą o rosnącej świadomości i odpowiedzialności za planetę. Takie postawy są i powinny być wspierane przez rządzących, np. poprzez dotacje i ulgi podatkowe. Jednak na skalę całego globu nie uda się zatrzymać konsumpcyjnego stylu życia. Nikomu nie można zabronić ani bogacenia się, ani posiadania większej liczby rzeczy, ani zużywania większej ilości energii. Zwłaszcza, jeśli dotyczy to ludzi ubogich, dla których oznacza to kupienie pierwszego w życiu ubrania, pierwszej w życiu lodówki lub klimatyzatora, pierwszego mieszkania, motoroweru lub używanego samochodu. Poza tym zwiększenie wydajności pracy w tych krajach będzie wymagało zwiększenia konsumpcji energii dla celów produkcyjnych. Liczba ludności w krajach trzeciego świata rośnie tak szybko, że za sto lat może być nawet dziesięciokrotnie większa niż obecnie. Na przykład w Nigerii od czasu uzyskania niepodległości w 1960 roku wzrosła z 48 milionów do ponad 200 milionów w 2019 roku. Na stulecie niepodległości liczba Nigeryjczyków zapewne przekroczy pół miliarda. W niektórych innych krajach trzeciego świata liczba ludności rośnie jeszcze szybciej. Właśnie te kraje są i będą obszarem najszybciej rosnącego konsumpcjonizmu. Właśnie tam najszybciej rośnie i będzie rosło zużycie energii i wody oraz zanieczyszczenie środowiska.

Obecne globalne ocieplenie, mimo wzrostu temperatury o ponad

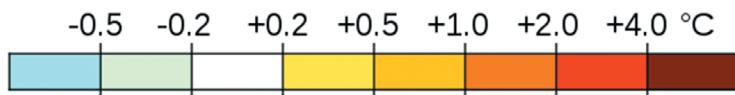
1°C od początku ery industrialnej, nie spowodowało globalnej klęski głodu ani suszy. Co więcej, dzięki tzw. zielonej rewolucji, czyli bardziej plennym odmianom roślin, nawozom sztucznym i środkom ochrony roślin, ludzkość obecnie produkuje więcej żywności niż potrzebuje. Globalne ocieplenie spowodowało nawet wzrost opadów deszczu w Sahelu, dzięki czemu niemal zniknął tam problem głodu, mimo podwojenia się tamtejszej populacji w ciągu ostatnich 20 lat. Na ociepleniu klimatu zyskują kraje środkowej i północnej Europy, Rosja i Kanada, gdzie wydłużył się okres wegetacji roślin.

Północna Europa stosunkowo najmniej odczuwa skutki globalnego ocieplenia. Na szczęście dla tego kontynentu, topiący się lądolód Grenlandii latem uwalnia na powierzchnię Oceanu Atlantyckiego ogromne ilości słodkiej wody, która jest lżejsza od wody morskiej i dlatego nie tonie, lecz utrzymuje się na powierzchni oceanu. Późnym latem ciepły

Zmiany temperatur w czasie ostatnich 50 lat



Lata 2011 - 2020 w porównaniu z 1951 - 1980



Rys. 19. Zmiana temperatur na ziemi obecnie [229]

Prąd Zatokowy „nurkuje” pod powierzchnię tej chłodnej warstwy słodkiej wody, która w tym okresie schładza letnie deszcze w północnej Europie. Z powodu topnienia lądolodu Grenlandii ocean u wybrzeży tej wyspy jest tym miejscem na Ziemi, gdzie temperatury spadają, a nie rosną [228] [Rys. 19 [229]]. Dzieje się tak latem. Z kolei zimą, kiedy lądolód Grenlandii nie topnieje (wtedy temperatura powietrza nad Grenlandią staje się ujemna), zimy w Europie stają się nieco łagodniejsze, ponieważ przez rosnącą temperaturę powierzchni morza (SST) na świecie również Prąd Zatokowy jest coraz cieplejszy. Okres wegetacji roślin wydłużył się w większości krajów w Europie, dzięki czemu zwiększyła się produktywność rolnictwa. Dlatego tym bardziej należy się uznanie rządów krajów Unii Europejskiej, które w większości deklarują osiągnięcie zerowej lub ujemnej emisji dwutlenku węgla do połowy XXI wieku, chociaż wiele skutków ocieplenia klimatu w Europie można uznać za korzystne.

Wzrost produktywności rolnictwa na skalę globu osiągnięto przede wszystkim dzięki wydajniejszym odmianom roślin, nawozom sztucznym, środkom ochrony roślin oraz roślinom modyfikowanym genetycznie (GMO) odpornym na szkodniki, choroby i herbicydy. Wzrost produktywności rolnictwa uzyskano kosztem postępującej degradacji gleby i zatrucia jej toksycznymi substancjami. Takie praktyki w rolnictwie mogą się okazać krótkowzroczne. Degradacja gleb może na dłuższą metę spowodować zmniejszenie plonów, a ich zatrucie produktami rozpadu środków ochrony roślin może doprowadzić do chorób ludzi i zwierząt. W krajach bogatych od wielu lat zwraca się uwagę, aby środki ochrony roślin nie kumulowały się w glebie, żeby były biodegradowalne i aby miały krótki okres karencji. W krajach biednych nadal stosuje się tanie środki ochrony roślin, które są szkodliwe dla ludzi i zwierząt. Zamożni odwracają się od żywności produkowanej masowo i poszukują produktów „ekologicznych”, a nawet czasem sami uprawiają warzywa lub hodują zwierzęta w sposób „ekologiczny”, o ile jest to w ogóle możliwe przy globalnym zatruciu środowiska. Dla biednych ludzi liczy się przede wszystkim niska cena żywności, a tą można najłatwiej uzyskać stosując tanie, ale szkodliwe dla zdrowia metody.

W dobie globalnego ocieplenia rolnictwo ma jeszcze jedną misję: może

pomóc wychwycić dwutlenek węgla z atmosfery i zgromadzić go w glebie, czyli zwiększyć w niej zawartość próchnicy. Próchnica to martwe szczątki roślinne, których składnikiem jest węgiel. Gleba bogata w próchnicę jest żyzna, łatwo wchłania i magazynuje wodę, jest bogata w składniki mineralne niezbędne dla wzrostu roślin, grzybów, bakterii i zwierząt.

Aby teren nadawał się do uprawy, ziemia musi być pokryta glebą, a w niej musi znajdować się życie, czyli bakterie, grzyby, rośliny i zwierzęta (np. dżdżownice). W okresie rewolucji neolitycznej, czyli w czasie, kiedy wynaleziono rolnictwo, uprawa miała charakter rabunkowy. Coroczne uprawianie ziemi bez jej należytego spulchniania i nawożenia, wypalanie i nadmierny wypas stepów i sawanny powodowały pustynnienie. Później, w średniowieczu, aby uniknąć wyjaławiania gleby wynaleziono uprawę trójpólową: co trzeci rok pozostawiano ziemię odłogiem, aby odpoczęła. Obecnie glebę nawozi się nawozami naturalnymi (obornikiem) i/lub sztucznymi. Orkę i bronowanie powinno się wykonywać wtedy, kiedy ziemia jest wilgotna, a pogoda nie jest wietrzna. W przeciwnym razie wiatr porywa drogocenną próchnicę i wyjaławia glebę. Dlatego, zwłaszcza kiedy jesienią jest sucho, niektórzy rolnicy eksperymentują i rezygnują z orania i bronowania pól. Jednak na większości pól stosuje się nadal tradycyjne techniki polegające na oraniu i bronowaniu. Inną metodą napowietrzania gleby bez jej orania i bronowania jest aeracja, dobrze znana z uprawy przydomowych trawników. Polega ona na spulchnianiu gleby poprzez jej nakłuwanie.

Nieumiejętne rolnictwo nie tylko powoduje utratę próchnicy i wyjaławienie gleby, ale też zwiększa stężenie CO₂ w atmosferze. Dobrzy rolnicy dbają nie tylko o plony w danym roku, ale też o to, żeby zgromadzić w glebie jak największą ilość próchnicy (czyli węgla). W ten sposób nie tylko użyźniają ją, ale też zabierają z atmosfery dwutlenek węgla. Co bardziej świadomi ekologicznie rolnicy pozostawiają na polach słomę po żniwach, żeby ją worać w ziemię i zamienić w próchnicę. Rezygnują świadomie z zysków ze sprzedaży słomy, aby użyźnić glebę. Wykazują się przy tym większą świadomością ekologiczną niż ustawodawcy, którzy w wielu krajach nadal traktują słomę jako biopaliwo, łudząc się, że palenie jej zamiast węgla spowoduje zmniejszenie

stężenia CO₂ w atmosferze. Spalanie słomy powoduje taki sam wzrost stężenia CO₂ w atmosferze jak spalanie węgla, co najwyżej nie zwiększa ilości węgla w tzw. szybkim cyklu węglowym, tzn. w atmosferze, powierzchni mórz, wodach śródlądowych (rzeki, jeziora) i biosferze (bakterie, rośliny i zwierzęta).

W krajach leżących na średnich szerokościach geograficznych (między zwrotnikami a kołami podbiegunowymi, z wyjątkiem tych leżących w pobliżu zwrotników) większość opadów przypada na okres letni, ale ze względu na wysokie parowanie wody w tym okresie (ponieważ latem wyższe są też temperatury) lądy te wysychają, gdyż parowanie jest wtedy większe niż ilość opadów (współczynnik P/E latem jest mniejszy od jedności). W krajach leżących na średnich szerokościach geograficznych poziom wód gruntowych rośnie w okresie zimowym, ponieważ zimą parowanie wody jest mniejsze. Mimo że zimą ilość opadów jest mniejsza, to jest ona i tak większa niż parowanie (współczynnik P/E jest większy od jedności), dlatego zimą bilans wody jest dodatni. W krajach leżących na średnich szerokościach geograficznych zimą podnosi się poziom wód gruntowych, odbudowują się jeziora i stawy, ziemia nasiąka wodą i gromadzi jej zapas na gorące, letnie półrocze, w którym, co prawda, opady są większe niż zimą, ale parowanie przeważa nad opadami.

Zimowe deszcze i śniegi w krajach leżących na średnich szerokościach geograficznych, np. we wschodniej Europie, środkowej Azji, na Bliskim Wschodzie, północnych Chinach, północnych Indiach i Pakistanie są też ważne dla ilości opadów atmosferycznych w sezonie letnim. Od nich zależy, czy wiosną ziemia się zazieleni oraz jak bardzo ta zielona ziemia będzie pochłaniać ciepło słoneczne wiosną, które podgrzeje powietrze nad kontynentem euroazjatyckim i utworzy obszar niskiego ciśnienia nad powierzchnią ziemi. W rezultacie właśnie od tych zimowych opadów zależy ilość deszczu latem, ponieważ ten obszar obniżonego ciśnienia wiosną i latem generuje wiatry, które napływają w dolnych warstwach atmosfery znad oceanów i niosą życiodajny deszcz. Najsilniejszymi z tych wilgotnych letnich wiatrów są letnie monsuny wiejące w Azji południowej (indyjski monsun letni, *Indian Summer Monsoon*, ISM) i wschodniej (monsun wschodnioazjatycki, *East Asian Monsoon*, EAM).

Wielkość opadów deszczu niesionych latem przez monsuny zależy od dwóch czynników: temperatury powierzchni morza pod koniec wiosny i na początku lata (tzw. puli ciepła oceanów, ponieważ im cieplejsza woda, tym łatwiej paruje) oraz od siły i zasięgu wiatrów, które tą wilgoć niosą do wnętrza kontynentów. Temperatura powierzchni morza jest coraz wyższa, z powodu globalnego ocieplenia. Siła i zasięg wiatrów napędzających monsuny maleją, ponieważ wnętrza kontynentów pustynnieją. Siła wiatrów napędzających letnie monsuny w Azji zależy od tego, jak bardzo nagrzewa się powierzchnia ziemi w głębi Eurazji wiosną i latem, czyli od spadku albedo powierzchni ziemi. Dla przypomnienia albedo piaszczystej pustyni wynosi około 0,4, co oznacza, że tylko 60% energii słonecznej jest pochłaniane przez powierzchnię ziemi, a 40% odbija się od niej i wraca w kosmos. Albedo terenów trawiastych wynosi średnio w ciągu roku około 0,3, a albedo zielonego lasu 0,15. Ale to są wartości średnie dla ciepłego półrocza, kiedy ziemia nie jest pokryta śniegiem. Z kolei zimą pola pokryte śniegiem mają albedo śniegu, czyli około 0,7–0,8. Wiosną, kiedy stepy, pastwiska i pola się zazieleniają, albedo terenów trawiastych i pól uprawnych może być tak niskie jak albedo lasu. Na wiosnę świeżo zaorana, wilgotna gleba mocno nagrzewa się od słońca. Albedo świeżo zaoranego czarnoziemiu wynosi nawet mniej niż 0,1. Nagrzana słońcem ziemia podgrzewa powietrze znajdujące się bezpośrednio nad nią, które rozszerza się i staje się lżejsze (w przeliczeniu na jednostkę objętości). Takie nagrzane powietrze unosi się, tworząc obszar obniżonego ciśnienia w dolnych warstwach atmosfery. Ten obszar obniżonego ciśnienia tworzy siłą ssącą, która w dolnych warstwach atmosfery zasysa powietrze znad terenów, gdzie temperatura nie rośnie tak szybko, czyli znad oceanów zmieniających temperaturę powoli z powodu wysokiej pojemności cieplnej wody. Dlatego wysychające wnętrza Azji nie tylko stwarza ryzyko coraz silniejszego Wyżu Syberyjskiego, czyli coraz bardziej suchych zim w Eurazji, ale też zwiększa ryzyko, że wilgotne letnie monsuny będą się zaczynały później i będą napędzane przez coraz słabsze wiatry.

Powyższe scenariusze realizują się na naszych oczach, ale, jak dotychczas, nie doprowadziły do globalnej katastrofy. Do katastrofy nie

dochodzi, ponieważ obecny wzrost globalnej temperatury jest łagodzony (buforowany) przez ujemne sprzężenia zwrotne rządzące klimatem, które jednak są na wyczerpaniu. Przykładami takich ujemnych sprzężeń zwrotnych są: wzrost gęstości wegetacji w odpowiedzi na rosnące stężenie CO_2 w atmosferze, który dla wielu roślin przestanie rosnąć po przekroczeniu stężenia CO_2 powyżej 500 ppm oraz rozpuszczalność CO_2 w wodzie morskiej w stosunku do stężenia CO_2 w atmosferze. Ta na razie jest dość stabilna, ale wraz ze wzrostem temperatury powierzchni mórz zacznie spadać.

Katastroficzne scenariusze globalnego ocieplenia

Nadal rośnie stężenie gazów cieplarnianych (głównie dwutlenku węgla), więc globalne ocieplenie przyspiesza. Rośnie nie tylko stężenie dwutlenku węgla w atmosferze, ale nawet globalne zużycie paliw kopalnych. Dzieje się tak dlatego, że kraje rozwijające się starają się doścignąć kraje rozwinięte w ilości energii produkowanej i konsumowanej na jednego mieszkańca. Z kolei kraje rozwinięte starają się zmniejszyć emisję dwutlenku węgla u siebie, przerzucając energochłonną produkcję do krajów rozwijających się. W ten sposób zmniejszają emisję dwutlenku węgla u siebie, ale *de facto* ją zwiększają, jeśli brać pod uwagę miejsce konsumpcji dóbr wyprodukowanych w krajach rozwijających się. Rośnie też apetyt w krajach rozwijających się na osiągnięcie takiego poziomu konsumpcji, jaki osiągnęły kraje rozwinięte. Ponieważ roczna emisja CO_2 do atmosfery rośnie, więc średnia globalna temperatura na Ziemi będzie się nadal zwiększać. Przy obecnym tempie wzrostu poziomu mórz prognozuje się, że za kilkadziesiąt lat dzisiejsze nabrzeża portowe znajdą się pod wodą. Stężenie CO_2 w atmosferze nadal rośnie, i to coraz szybciej, wobec tego należy się spodziewać, że topnienie lądolodów i wzrost poziomu mórz ulegną przyspieszeniu. Może się nawet zdarzyć, że już w czasie życia obecnie rodzącego się pokolenia trzeba będzie zbudować nowe nabrzeża portowe, przenieść centra nadmorskich miast na wyżej położone tereny, zbudować tamy i poldery aby uchronić przed zalaniem żyzne niziny nadmorskie, wyhodować odporne na zasolenie gleby rośliny, które bę-