

Ostatni przykład zmiany genetycznej w podobnych warunkach, w jakich stężenie dwutlenku węgla osiągnie w XXII w. (około 1050 ppm), odkryli w 2004 r. dwaj kanadyjscy biologowie, Sinéad Collins i Graham Bell. Obserwowali zmiany, jakie pojawiły się podczas rozwoju około 1000 pokoleń zielenicy, zielonego glonu *Chlamydomonas reinhardtii* należącego do królestwa Protista. Wykorzystano *C. reinhardtii*, ponieważ był on wcześniej intensywnie badany w celu wyjaśnienia mechanizmu fotosyntezy. Jak większość eukariotycznych glonów, uruchamia on mechanizm gromadzenia CO₂, który zwiększa stężenie w pobliżu Rubisco (p. rozdz. 1). Po 1000 pokoleń, wyhodowanych w warunkach zwiększonego stężenia CO₂, potrzeba zwiększania jego stężenia w pobliżu Rubisco zmalała i mechanizm ten uległ u *Chlamydomonas* osłabieniu, jego komórki zmniejszyły się, ale tempo fotosyntezy i oddychania wzrosło. Badacze wstępnie doszli do wniosku, że w miarę wzrostu stężenia CO₂ mechanizm skupiania węgla u zielenic będzie mniej efektywny i nastąpią zmiany tempa fotosyntezy i oddychania. To, jak zauważają, może wpłynąć na tempo przetwarzania węgla w morskich i może też lądowych ekosystemach w skali globalnej. Należy pamiętać, że około jednej czwartej produkcji pierwotnej na Ziemi odbywa się z udziałem glonów, więc nawet jeśli inne zdolne do fotosyntezy organizmy nie zareagują tak radykalnie na zwiększony poziom dwutlenku węgla (choć pewne zmiany są prawdopodobne), nastąpią znaczne zmiany w przepływie węgla między źródłami i zbiornikami, a nie tylko zmiany w fizjologii. Te niewiadome wprowadzają w zakłopotanie modelujących zmiany klimatu w przyszłości pod wpływem zwiększonego stężenia gazów cieplarnianych. Warto skorzystać z analogów z przeszłości, np. termicznego maksimum początku eocenu.

6.5. Możliwe niespodziewane reakcje na zmiany stężenia gazów cieplarnianych w XXI w. i później

W poprzednim rozdziale (p. rozdz. 5.3) podsumowano rekomendacje IPCC, zapewniające konsensus naukowy na temat zmian klimatu. Pomimo zgody co do kwestii podstawowych (stężenie gazów cieplarnianych wzrasta, Ziemia ociepla się, poziom morza podnosi się) IPCC potwierdził, że istnieje wiele wątpliwości i analizując główne wnioski, należy pamiętać o możliwości pojawienia się rozmaitych niespodzianek. Jak pokazano na przykładzie dwóch studiów przypadku, ogólny obraz przedstawiony IPCC w najlepszym razie daje bardzo podstawowe scenariusze i ich uszczegółowienie wymaga badań w skali regionalnej. Regionalne scenariusze bez wątpienia będą coraz bardziej precyzyjne w miarę badań prowadzonych zarówno w terenie, jak i za pomocą bardziej zaawansowanych modeli. Ale co oznacza ostrzeżenie IPCC przed niespodziankami? Przyjrzyjmy się kilku zasadniczym sprawom.

6.5.1. Ekstremalne zdarzenia pogodowe

Jedna jaskółka nie czyni wiosny i podobnie pojedyncze ekstremalne zdarzenie pogodowe (ulewa o niespotykanej dotychczas intensywności czy szczególnie suchy miesiąc) nie oznacza jeszcze zmiany klimatu. Ale ilu jaskółek potrzeba? Wzrost częstości

anomalii pogodowych w pewnym stopniu świadczy o tym, że klimat ulega zmianie. W ostatnich latach zwiększyła się liczba silnych huraganów (choć liczba wszystkich huraganów pozostała na niezmiennym poziomie) i zostało pobitych wiele rekordów ciepła. Tych ostatnich należało się spodziewać wraz z ociepleniem. Lokalnie lub regionalnie zdarzały się niezwykle intensywne opady deszczu.

Takie zdarzenia są zaskakujące, szczególnie dla tych, którzy ich doświadczają. Kiedy pewnej nocy w 1987 r. huragan uderzył w południową Anglię, była to dla mieszkańców niespodzianka, która zakłóciła życie praktycznie wszystkich przez co najmniej jeden dzień, z powodu przerwy w dostawach prądu, nie działających telefonów i dróg zatarasowanych przez połamane drzewa. Nie mniej zdziwiony był jeden z meteorologów pracujących dla telewizji BBC jako prezenter pogody, Michael Fish, którego wieczorna prognoza poprzedzająca sztorm w najmniejszy sposób nie zapowiadała katastrofy. Obecnie, jedno szczególne wydarzenie nie może być przypisane zmianom klimatu, jednak każde jest analizowane przez klimatologów. Rzeczywiście, incydent był komentowany przez jeden z rządowych departamentów jako wynikający ze zmian klimatu, choć takiej tezy nie można potwierdzić. Pomimo to, Departament Energii wykorzystał sztorm z 1987 r. do propagowania ochrony energii przy pomocy sloganu „globalne ocieplenie, zostaliśmy ostrzeżeni”. W marcu 1992 r. instytucja regulująca angielski rynek reklamowy Advertising Standards Authority (Cowie, 1998) skrytykowała takie postępowanie. Jest mało prawdopodobne, by dzisiaj, w analogicznej sytuacji, również udzielono mu reprimendy.

O wzroście liczby silnych huraganów wspomniano na początku rozdziału, obecnie skoncentrujemy się na temperaturze. W cieplejszym świecie, z definicji, będzie więcej energii napędzającej cyrkulację atmosferyczną i oceaniczną. Część z tej energii zostanie zużyta na zwiększenie parowania (i też opadu), a część na wzrost prędkości wiatru i siłę sztormów. Zatem, gdy świat staje się cieplejszy, rośnie częstość ekstremalnych zdarzeń pogodowych. Chociaż parowanie z oceanów i opady są głównymi wskaźnikami ocieplenia globalnego, prawdopodobnie czynnikiem najsilniej oddziałującym na psychikę jest intensywność i częstość fal upałów. Gdy świat się ociepli, one prawdopodobnie również staną się częstsze i bardziej intensywne. W 2004 r. Gerald Meehl i Claudia Tebaldi z Narodowego Centrum Badań Atmosfery w Boulder w stanie Kolorado badali, wykorzystując zarówno symulacje komputerowe, jak i pomiary, czy ekstremalne fale upałów w Chicago i na południowym zachodzie Wielkich Jezior (1995) oraz w regionie Londynu i Paryża (2003) były przypadkowe, czy może ich prawdopodobieństwo w przyszłości wzrośnie. Stwierdzili, że fale upału w tej części USA i w Europie towarzyszyły specjalnym układom cyrkulacji atmosfery, które będą bardziej intensywne wraz ze wzrostem ilości gazów cieplarnianych; sugeruje to występowanie w przyszłości w tych obszarach bardziej intensywnych fal upału.

Nie powinno dziwić występowanie ekstremalnych zdarzeń pogodowych w przyszłości. Ale również nie należy ich zbyt szybko tłumaczyć zmianami klimatu, ponieważ istnieje różnica między anomalią na poziomie szumu a trendem statystycznym. By rozstrzygnąć, z którym przypadkiem mamy do czynienia, potrzebna jest analiza statystyczna pokazująca, czego można się spodziewać: 1) w warunkach naturalnej zmienności bez udziału czynnika antropogenicznego (wzrostu stężenia gazów

cieplarnianych), 2) przy udziale czynnika antropogenicznego: oba przypadki porównujemy z rzeczywistością (stanem obecnym).

W 2004 r. niewielki zespół kierowany przez Petera Stotta dokonał takiej analizy, by zbadać, czy fala upału, która w 2003 r. nawiedziła zachodnią Europę była spowodowana naturalną zmiennością czy globalnym ociepleniem. Te dwa scenariusze otrzymano, wykorzystując jeden z najbardziej zaawansowanych modeli dostępnych w tym czasie, a mianowicie model HadCM3 rozwijany w Centrum Przewidywania Klimatu Hadleya (Hadley Centre for Climate Prediction) brytyjskiej służby pogodowej. Model uwzględnił wpływ erupcji wulkanicznych i aktywność słoneczną, szczególnie w południowej i zachodniej Europie. Były trzy oddzielne symulacje odtwarzające temperatury od czerwca do sierpnia w warunkach wzrostu stężenia gazów cieplarnianych i obejmujące okres 1900–2003 i sięgające aż do 2100 r.: były to scenariusze typu 2 (według poprzedniego akapitu). Wynikiem były trzy krzywe zmian temperatury z typową roczną zmiennością ± 1 K, które pokrywały się z pomiarami meteorologicznymi, i ich wygładzonym kilkuletnim przebiegiem do 2000 r. Aktualne pomiary meteorologiczne i przebieg wygładzony do lat 90. XX w. leżały w granicach naturalnej rocznej zmienności modelu. Konsekwentnie, krzywa wygładzona też rosła, chociaż nieregularnie wskutek zmienności rocznej, wywołanej działalnością wulkaniczną i zmiennością czynników solarnych, około 1° wzdłuż linii symulacji, sugerując, że model efektywnie wychwycił antropogeniczne ocieplenie.

Do tego modelu powrócono, ale przy scenariuszu zakładającym brak antropogenicznego oddziaływania gazów cieplarnianych (czyli scenariuszu 1 z poprzedniego akapitu), który uwzględniał wpływ antropogeniczny tylko do lat 90. XX w. (a później już nie). Krzywa nie uwzględniająca globalnego ocieplenia pokrywała się (splatała się), zarówno z naturalną, jak i wygładzoną krzywą temperatury przez 3/4 XX w. Jednakże pod koniec wieku symulowana krzywa temperatury biegła poziomo, chociaż z nieregularnymi wahaniami z powodu zmienności naturalnej, i różnica pomiędzy symulacją bez uwzględnienia efektu antropogenicznego a obserwacjami i symulacjami uwzględniającymi dodatkowy antropogeniczny efekt cieplarniany sięgała prawie 1 K. Wynikał stąd jasny wniosek, że 1-stopniowa różnica pod koniec XX w. była spowodowana antropogeniczną emisją gazów cieplarnianych.

Jednakże aktualny przebieg zmian temperatury nie tylko pokrywa się z grubsza z prognozowanym przez scenariusze globalnego ocieplenia, ale lato 2003 r. było cieplejsze o ponad $0,75$ K niż w każdym poprzednim okresie od czerwca do sierpnia w analizowanej serii. Uważa się, że w znacznej części zachodniej Europy było to najcieplejsze lato od 500 lat. Rzeczywiście, następne w kolejności upalne lato wystąpiło w połowie lat 80. XX w. i było widoczne we wszystkich trzech symulacjach uwzględniających efekt cieplarniany. Sugeruje to, że model dobrze wychwytyje prawdopodobieństwo wyjątkowej letniej fali upałów w zachodniej i południowej Europie, nawet jeśli nie potrafi przewidzieć dokładnie, w którym roku ona nastąpi.

Po upewnieniu się, że model klimatu HadCM3 wychwytyje zarówno globalne ocieplenie, jak i prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzeń ekstremalnych, można zapytać, co przewiduje na XXI w.? Można wysnuć wniosek, że w okresie 2000–2100 lata w części Europy stopniowo ocieplą się do $6,5$ K. W dodatku, ekstremalnie upalne lata (ponad średnie ocieplenie) będą nadal pojawiać się co najmniej raz lub dwa na

dziesięć lat. Jednakże, ponieważ średnia letnia temperatura będzie wzrastać w XXI w. wyjątkowo upalne lata do 2020 r., po 2040 r. staną się normą. Po 2040 r. ekstremalnie upalne lata będą znacznie cieplejsze od tych w 2003 r., a do końca wieku wyjątkowe fale upału będą około 6,5 K cieplejsze niż te z początku wieku. Zdaniem badaczy jest prawdopodobne, iż dotychczasowe emisje gazów cieplarnianych co najmniej podwoiły ryzyko wystąpienia na początku XXI w. lata tak upalnego jak to z 2003 r. i, że prawdopodobieństwo takiego ciepła może wzrosnąć 100-krotnie w ciągu następnych czterdziestu lat. Stwierdzili „trudno uniknąć wniosku, że jesteśmy w trakcie, potencjalnie groźnej, antropogenicznej ingerencji w system klimatyczny” (Stott i in., 2004).

Wpływ takich ekstremalnych zdarzeń pogodowych na rolnictwo i zdrowie człowieka będzie tematem następnego rozdziału.

6.5.2. Gazy cieplarniane

Scenariusze IPCC są oparte na wielu globalnych scenariuszach rozwoju gospodarki i wzrostu liczby ludności, poczynając od wersji *Business as Usual* do rozmaitych strategii ograniczających emisję i wprowadzających nowe technologie o niskim udziale paliw kopalnych lub alternatywne źródła energii. Raporty opublikowane po 2001 r. przedstawiają wiele projekcji (p. rys. 5.6). Na szczęście, dla uproszczenia, większość mieści się w granicach dolnej i górnej prognozy dokonanej według scenariusza *Business as Usual* w raporcie IPCC z 1990 r. (p. rys. 5.4 i tab. 5.1). Jednak i w tym przypadku można się spodziewać niespodzianek. Na przykład, modele zakładają, że przyszła reakcja biosfery na dodatkowy dwutlenek węgla będzie proporcjonalna do obecnej. A co się stanie, jeśli pewne progi zostaną przekroczone? Może zdarzyć się, że oceany przestaną absorbować tyle dodatkowego węgla jak w przeszłości. (Może, o czym krótko wspomnimy, z powodu wzrostu kwasowości oceanu nie będzie on zdolny do pochłaniania tak dużych ilości węgla). W takim przypadku przyrost dwutlenku węgla w atmosferze będzie większy, niż się spodziewamy, a wraz z nim także większe będą zmiany klimatu. Alternatywnie, jeśli naturalne (w przeciwieństwie do antropogenicznych) systemy będą działać tak, jak zakładamy, może wystąpić niespodziewany rozwój w systemach zależnych od człowieka. I znów, co stanie się, jeśli Chiny z ponad 1,3 mld mieszkańców zaczną zwiększać ilość spalanych paliw kopalnych w tempie do tej pory niespotykanym? Jeśli naturalne lub antropogeniczne systemy nie będą w przyszłości zachowywać się w sposób, jakiego się dziś spodziewamy, konsekwencje będą nieprzewidywalne.

Takie nieprzewidywalne okoliczności mogą spowodować, że w przyszłości klimat będzie znacznie odbiegać od tego przewidywanego przez IPCC, zarówno w pozytywny, jak i negatywny sposób. Na najbardziej podstawowym poziomie, jeśli chodzi o ekosystemy naturalne, wiemy, że w przeszłości atmosferyczny poziom dwutlenku węgla był czasem znacznie większy, a czasem mniejszy, niż to przewidują scenariusze IPCC. Jednakże od czasu rewolucji przemysłowej zaznacza się trend rosnący, zatem celowe jest rozważać niespodzianki, które mogą zwiększyć zmiany klimatu. W 2004 r. zdano sobie sprawę, że z bezpośrednich pomiarów wynika, iż stężenie dwutlenku węgla w atmosferze rośnie ostatnio szybciej, niż przewidywano. Pojawia się pytanie, czy jest to tylko nietypowe wahnięcie, czy część nieprzewidywanego trendu.

6.5.3. Wzrost poziomu morza

Przewidywania IPCC, dotyczące podnoszenia się poziomu morza, stają się z raportu na raport coraz bardziej zachowawcze (p. podsumowanie w tabeli 5.1). Dla brytyjskich naukowców jest to do pewnego stopnia zaskakujące, ponieważ od końca lat 80. XX w. (kiedy to IPCC rozpoczął prace nad pierwszym raportem) badania naukowe pokazały, że w ostatnim interglacjale (eemskim lub sangamońskim) poziom morza był nawet 6 m wyższy od obecnego, chociaż klimat w tym interglacjale był podobny dzisiejszego, a cieplejszy jedynie przez krótki okres. Ponadto, ostatnio zauważamy, że w pewnych miejscach Antarktydy spływ lodu jest szybszy, niż do tej pory sądzono, i grenlandzka pokrywa lodowa również topi się gwałtowniej, niż przewidywano. Istnieją też możliwości uaktywnienia się rozmaitych czynników neutralizujących efekt topnienia, lecz ponieważ brak jest pewności co do ich działania, możliwe są niespodzianki.

Należy jeszcze raz podkreślić, że IPCC dochodzi do wniosków komisyjnie i te komisje nie zawsze są tak jednomyślne, nawet jeśli członkowie w większości są zgodni. Ci, którzy nie są członkami grup roboczych, nie mogą dowiedzieć się dokładnie, jak formułuje się wnioski, choć można mieć pewność, że są one skutkiem różnych opinii i/lub zaufania do prognoz (dlatego obok optymalnego estymatora IPCC podaje również dolną i górną granicę estymacji). Ponieważ jednak znaczny procent ludności świata żyje na obszarach, które prawdopodobnie będą zagrożone przez wzrost poziomu oceanu, to powódzie wynikające ze zmiany klimatu mogą mieć znaczne implikacje polityczne. Innymi słowy, niezależnie od ryzyka (prawdopodobieństwa) potencjalne zagrożenie jest duże. Zatem, choć prawdopodobieństwo niewielkiego podniesienia się poziomu morza jest duże, to z drugiej strony wysokie koszty społeczne i ekonomiczne mogą skłonić decydentów do zlekceważenia obaw, choć faktycznie powinny one być większe ze względu na zachowanie ostrożności. Psychologiczna percepcja i polityczne wymuszenia to jedno, a naukowe zrozumienie to drugie, nawet jeśli drugie, może przyczyniać się do pierwszego (taki był cel powołania IPCC).

Wiemy, że podczas poprzedniego interglacjału poziom morza był o 6 m wyższy od dzisiejszego. Można to traktować jako realistyczny scenariusz tego, co może się zdarzyć po 2100 r. (horyzont czasowy brany pod uwagę przez decydentów). Całkowity wzrost poziomu morza z powodu stopienia całego lodu zgromadzonego na kontynentach wyniosłby 80 m. (I nie obejmuje to jeszcze przyrostu poziomu oceanu na skutek rozszerzalności termicznej wody, co prawdopodobnie wymagałoby kilku tysięcy lat).

Z jednej strony gorszy przypadek – wzrost poziomu morza o 6 m (jak w poprzednim interglacjale) w ciągu kilku (dwóch, trzech, czy czterech) stuleci wydaje się umiarkowany w porównaniu z potencjalnym wzrostem o 80 m w przypadku stopienia całej pokrywy lodowej (co musiałoby trwać znacznie dłużej). Długoterminowy scenariusz stopienia całego lodu wybiega daleko poza prognozy IPCC z 2001 r. na koniec XXI w., ale może się spełnić, jeśli miałyby wystąpić ocieplenie podobne do tego z termicznego maksimum początku eocenu (p. rozdz. 3). Tymczasem wzrost o 6 m w poprzednim interglacjale nastąpił w okresie, gdy temperatury były zbliżone do przewidywanych na koniec XXI w.; chociaż oczywiście, z powodu inercji termicznej minie dużo czasu,

TABELA 6.3. Wzrost poziomu morza na skutek topnienia lądowej pokrywy lodowej (wg brytyjskiej służby geologicznej „Geological Survey”, 1999)

Źródło	Objętość (km ³)	%	Wzrost poziomu (m)
Lodowce	180 000	0,55	0,5
Grenlandia	2 600 000	7,90	6,5
Antarktyda*	30 109 800	91,49	73,5
Łącznie	32 909 800	100,00	80,5

* z tego 5–6 m przypada na Antarktydę Zachodnią.

Uwaga: Nie uwzględniono wzrostu spowodowanego ekspansją termiczną oceanów. Warto też zauważyć, że antarktyczny lądolód jest stabilny i jest mało prawdopodobne (choć niespodzianki mogą się zdarzyć), by przyczynił się do wzrostu poziomu oceanu, przynajmniej nie w XXI w. Jednakże od 1999 r. nowe odkrycia wskazują, że topnienie lodu kontynentalnego może być szybsze, szczególnie na Grenlandii (patrz tekst). Dane zaokrąglono do 0,5 m.

zanim Grenlandia, nie mówiąc już o Antarktydzie, stopią się. Z drugiej strony, obecny poziom dwutlenku węgla w atmosferze, ponad 375 ppm, już przewyższa maksimum (nieco wyższe niż 300 ppm) z poprzedniego interglacjału. Różnica między maksimum poziomu morza podczas poprzedniego interglacjału (w przybliżeniu 6 m) i potencjalnym wzrostem, gdyby stopił się cały lód kontynentalny (w przybliżeniu 80 m), jest spowodowana wspomnianą wcześniej olbrzymią inercją termiczną charakterystyczną dla ogromnych czap lodowych: potrzeba wiele czasu, by lodowiec o tak ogromnej masie osiągnął równowagę termiczną z otoczeniem. Odwrotnie, jeśli powstrzymamy dalsze ocieplenie, inercja biogeosfery spowoduje, że topnienie, z powodu powolnej akumulacji ciepła w układzie, będzie trwało jeszcze długo.

Do czynników, powodujących topnienie lodu na kontynentach, należy dodać to, że 1/4 do 1/3 obecnego wzrostu poziomu morza jest skutkiem rozszerzalności termicznej wody. Gdy ocean się ogrzewa, woda rozszerza się i rośnie poziom morza. Oznacza to, że poziom morza w cieplejszym świecie będzie wzrastać przez tysiące lat i gdy stopi się cały lód kontynentalny, wzrost przekroczy wartość 80 m przewidywaną jedynie na skutek topnienia lodu.

Zanim zajmiemy się możliwymi niespodziankami, warto przypomnieć, że obecne zrozumienie historycznych, nie wspominając o najbliższej przyszłości, zmian poziomu morza obfituje w niepewności (p. poprzedni rozdz.). Niepewność to nie to samo co nieprzewidywalność, nawet jeśli jedna może prowadzić do lub rozpoczynać się od drugiej. Jak wcześniej wspomniano, oszacowania różnych składników historycznych zmian poziomu morza zawierają znaczny margines błędu, zatem można powiedzieć, że potrafimy wyjaśnić około połowy zmian obserwowanych w czasie kilku poprzednich stuleci. Ponadto, nie rozumiemy, jak zachowa się Antarktyda w cieplejszej przyszłości, nie wiemy również do końca, co dzieje się na tym kontynencie dzisiaj.

Morski lód szelfowy na Półwyspie Antarktycznym jest narażony na załamanie, ale ponieważ większość jego masy jest już pod wodą, topnienie w przyszłości nie zwiększy poziomu morza w takim stopniu jak topnienie lodu kontynentalnego (leżącego na twardym gruncie). Półwysp Antarktyczny jest szczególnie wrażliwy na zmiany

klimatu, ponieważ leży dość daleko od głównej części kontynentu i bieguna południowego. Wiemy także, że znaczna jego część składa się z lodu szelfowego, co z pewnością przyczyni się do wzrostu poziomu oceanu w cieplejszej przyszłości, szybciej niż w Antarktydzie Wschodniej. Wydaje się, że część pokrywy lodowej Antarktydy Zachodniej przyczyniła się do wzrostu poziomu morza (5–6 m) w poprzednim interglacjale. Odwrotnie, Antarktyda Wschodnia, zbudowana głównie z kontynentalnego lodu, jest wyższa (a więc i chłodniejsza) od Antarktydy Zachodniej. Z jednej strony, ta pokrywa lodowa jest bardziej stabilna i dlatego nie ulegnie stopieniu, dopóki wyższa temperatura nie utrzyma się wystarczająco długo (setki tysięcy, jeśli nie 1–2 mln lat) lub ocieplenie nie będzie naprawdę wysokie, podobne do termicznego maksimum początku eocenu.

Mnożą się wątpliwości na temat tego, co się dzieje aktualnie na Antarktydzie (nie wspominając o tym, co może się zdarzyć w przyszłości). W 2006 r. na Antarktydzie pracowało 18 wieloletnich stacji monitorujących klimat. Na jedenastu z nich zaobserwowano w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat wzrost temperatury, na pozostałych siedmiu spadek. To może sugerować, że Antarktyda ociepla się. Jednak, należy pamiętać, że Antarktyda jest kontynentem rozmiaru Europy i Stanów Zjednoczonych łącznie, i dlatego 18 stacji, to liczba niewystarczająca do szczegółowego monitorowania. Skąpość danych jest jeszcze lepiej widoczna, gdy zdamy sobie sprawę, że 16 stacji położonych jest blisko wybrzeża, a jedynie dwie (South Pole i Wostok) leżą we wnętrzu kontynentu. W rzeczywistości, nawet stacja South Pole nie jest w stanie rejestrować tego, co dzieje się we wschodniej Antarktydzie, leży niedaleko WAIS (West Antarctic Ice Sheet, Lodowiec Szelfowy Antarktydy Zachodniej) w strefie przejściowej między częścią kontynentu, która traci, a tą, która akumuluje lód. W konsekwencji, nie dostarcza informacji o tym, co dzieje się we wnętrzu kontynentu. Pomiary satelitarne są także ograniczone, ponieważ żaden satelita nie przelatuje dokładnie nad biegunem południowym (p. rys. 5.8). Jednakże, to ma się wkrótce zmienić, po wystrzeleniu drugiego satelity CryoSat-2 (pierwszy uległ zniszczeniu wkrótce po starcie w 2005 r.).

Warto krótko podsumować wiedzę o tym, co dzieje się na Antarktydzie, ponieważ jest to bardzo ważne z punktu widzenia przewidywanego wzrostu poziomu morza i jego skutków dla niżej położonych regionów świata, chociaż to jest zdecydowanie problem geologiczny, a nie biologiczny. Antarktydę można podzielić na trzy strefy. Antarktyda Wschodnia (p. rys. 5.8) zawiera około 90% kontynentalnego lodu, który praktycznie (obok kilku małych nadbrzeżnych obszarów) w całości leży na stałym gruncie oraz szelfie kontynentalnym, który jest bardziej stabilny, lecz nie odporny na zmiany klimatu. Uważa się, że grubość lodu wzrasta, ponieważ opady śniegu, choć niskie, przewyższają topnienie. Drugim obszarem jest Półwysep Antarktyczny, który jak wspomniano, wystaje z kontynentu i jest wrażliwy na ocieplenie ze swoim szelfem lodowym (leżącym na dnie morza lub pływającym ponad szelfem) szczególnie po wschodniej stronie. Obejmuje on lodowiec szelfowy Larsena podmywany od wschodu przez prądy oceaniczne, który nieco ocieplił się o ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat (w tempie około 0,01–0,02°C rocznie) i obecnie napływa na niego cieplejsze powietrze. Współczesna szybkość regresji lodu szelfowego na półwyspie jest wyjątkowa w obecnym interglacjale, chociaż topnienie, w wolniejszym tempie, trwało przez większą część holocenu. Wiemy, że rozpad lodowca kontynentalnego

Larsena B na Antarktydzie w połowie lat 90. XX w. był zdarzeniem wyjątkowym. Jedną z możliwości, którą wcześniej rozważano, jest to, że szelf mógł się już poprzednio załamywać w cieplejszych okresach obecnego interglacjału (holocenu), a następnie odbudowywać się w chłodniejszych. Wiemy, że w holocenie występowały okresy cieplejsze (takie jak MCA, średniowieczne optimum klimatyczne) rozdzielone chłodniejszymi (np. Mała Epoka Lodowa); p. rozdz. 4 i 5. W 2005 r. opublikowano wyniki badań Eugene Domacka i jego zespołu. Analizowano rdzenie lodowe pobrane w 2002 r. w wielu miejscach poniżej lodu szelfowego, który istniał do 2001 r. Przyjrano się także tym rdzeniom, w których lód szelfowy istniał w 1995 r. Odkryto kilka wielkich głazów i na niektórych zauważono ślady niedawnej kolonizacji przez organizmy. Analiza węglowa pozostałości tych organizmów pozwoliła na datowanie ^{14}C (możliwe, że starszy węgiel mógł być zutylizowany). Na podstawie geologicznych i biologicznych śladów, stwierdzono, że lodowiec szelfowy Larsena istniał przez cały interglacjał holoceni, a jego rozpad w połowie lat 90. XX w. był zdarzeniem wyjątkowym, niespotykanym od co najmniej poprzedniego interglacjału. Domack i jego koledzy stwierdzili, że zanik lodu szelfowego był prawdopodobnie konsekwencją zmniejszania się jego grubości (o kilkadziesiąt metrów), trwającego tysiące lat, i niedawnego, krótkotrwałego (rzędu kilkudziesięciu lat) wzrostu temperatury powietrza nad lodem, który przekroczył naturalne zmiany klimatu w holocenie.

To Lodowiec Szelfowy Antarktydy Zachodniej (nie półwyspu), składa się ze stref Rossa, Amundsena i Weddella. Część lodowca szelfowego Amundsena stopiła się już raz w poprzednim interglacjale i dlatego prawdopodobnie odegra on znaczną rolę w podnoszeniu poziomu oceanu w niedalekiej przyszłości. Wiemy na podstawie badań szczątków otwornic pod lodowcem szelfowym Amundsena, że topniał on w przeszłości i odbudowywał się podczas zlodowaceń. (Znalezione szczątki otwornic należały do gatunków, które wyewoluowały około 600 000 lat temu i dlatego nie mogły znaleźć się tam przez zlodowacenie Antarktydy kilka milionów lat temu).

Co dalej z niespodziankami? Według raportu IPCC z 2001 r. (na podstawie Raportu o Scenariuszach Emisji – SRES) najbardziej prawdopodobna prognoza wzrostu poziomu morza od 1990 r. do końca XXI w. waha się w granicach 22–70 cm. Mieści się ona w dolnej i górnej granicy scenariusza – z powodu wątpliwości związanych z oddziaływaniami między lądem a lodem – określonych na 9–87 cm. Dla IPCC, a także polityków i decydentów, byłoby niespodzianką, gdyby rzeczywisty przyrost nie mieścił się w tych granicach, co praktycznie oznacza przekroczenie 87 cm. Czy jest to prawdopodobne? Wskazują na to trzy przesłanki.

1. Niektóre skraje Grenlandii i antarktycznego lodowca szelfowego wydają się rozpadać szybciej, niż przypuszczano.
2. Lód z wnętrza Antarktydy i Grenlandii spływa ku wybrzeżom szybciej niż poprzednio.
3. Masa stopionego lodu, która przyczyniła się do wzrostu poziomu morza w XX w. wydaje się większa, niż sądzono.

Po pierwsze, z powodu 1 i 2 przesłanki, nawet chociaż potencjalny wzrost poziomu morza (tab. 6.3) wskutek topnienia Antarktydy znacznie przekracza ten

spowodowany topnieniem czap lodowych półkuli północnej, ostatnie badania sugerują, że podczas ostatniego zlodowacenia (65 000–35 000 lat temu) wzrost poziomu morza o 30 m (gdy morze było znacznie niższe niż obecnie) był spowodowany w jednakowym stopniu ($\pm 10\%$) topnieniem na półkuli północnej i na Antarktydzie, i że były to impulsy oddalone od siebie o 5000 do 8000 lat. Przypuszcza się, że gdy podczas zlodowacenia nastąpiło ocieplenie o $2\text{--}3^\circ\text{C}$, poziom morza podniósł się o 30 m, w tempie około 2 m na sto lat (Rohling i in., 2004). Jest to tempo trzykrotnie szybsze, niż przewiduje na XXI w. najbardziej prawdopodobne oszacowanie IPCC (2001a, b).

Wielu badaczy przypuszcza, że 25 m z całkowitej różnicy poziomu mórz między glacialami a interglacialami, wynoszącej 120 m, jest skutkiem wahań pokrywy lodowej na Antarktydzie. Ostatnie badania sugerują, że większość z tych 25 m przypisanych Antarktydzie stopiło się w czasie epizodów ocieplenia w ciągu 30 000 lat glacjału. Topnienie w przeszłości nie musi koniecznie być podobne do przyszłego (w XXI w. nie będzie na Ziemi ogromnych lodowców laurentyńskiego i skandynawskiego, które przyczyniły się do większości pozostałego przyrostu poziomu morza), jednak sugeruje, że poprzednie topnienie nie było płynne i przyszłe też nie musi przebiegać liniowo i łagodnie, jak przewiduje IPCC. Nie powinniśmy dać się uśpić przez obecny powolny wzrost poziomu oceanu, ponieważ tempo zmian może wzrosnąć. Oczywiście, ocieplenie Ziemi o $2\text{--}3^\circ\text{C}$ w obecnym interglaciale nie jest analogiczne do ocieplenia o $2\text{--}3^\circ\text{C}$ w poprzednim, ale można odwołać się do przeszłości, rozważając możliwe niespodzianki, przed którymi ostrzega IPCC.

Po drugie, z powodu przesłanki 2, lód antarktyczny (szczególnie na Antarktydzie Zachodniej) i grenlandzki może być mniej stabilny, niż poprzednio sądzono. Stabilność lodowców antarktycznych, szczególnie tych leżących wzdłuż wybrzeża pod powierzchnią morza (kontynentalny lód szelfowy) już budzi obawy. (Te pływające lodowce – lodowce morskie – po stopieniu się nie wpłyną na wzrost poziomu oceanu). W 2004 r. zauważono, że czapy lodowe Grenlandii topią się szybciej, niż przypuszczano. Więcej dowodów uzyskano w 2006 r. (do czego wkrótce wrócimy). Faktycznie, na przełomie tysiącleci znaczna część morskiego lodu szelfowego odłamała się od Półwyspu Antarktycznego i spłynęła do morza. Najbardziej widowiskowe było oderwanie się lodowców szelfowych Larsena A i B w 1995 r. i 2002 r. W 2004 r. doniesiono, że pomiary lodu w zachodniej Antarktydzie za pomocą radaru wykryły różnicę w przepływie lodu w porównaniu z przepływem sprzed 1500 lat, zrekonstruowanym na podstawie śladów geologicznych (Siegert i in., 2004). Obecnie uważa się, że lód na wybrzeżu podtrzymuje ten we wnętrzu kontynentu i teraz, po odłamaniu się nadbrzeżnego lodu, ten z wnętrza spływa szybciej niż poprzednio. Skądinąd wiadomo, że pewne lodowce antarktyczne, leżące dalej niż 100 km od wybrzeża, przyspieszyły (Kerr, 2004). Jeśli czapy lodowe poruszają się szybciej, niż sądzono, to oszacowania IPCC, dotyczące wzrostu poziomu morza (oparte jedynie na wcześniejszej ocenie tempa spływania lodu), wymagają korekty. Obecnie IPCC rozważa, że jak wcześniej wspomniano, udział Antarktydy we wzroście poziomu oceanu w XXI w. będzie nieznaczny w porównaniu z ilością wody, jaka wyparuje z oceanu i spadnie na Antarktydę w postaci śniegu, a następnie przekształci się w lód. Jest to efekt równoważący topienie lodu antarktycznego. Powstaje pytanie, czy Antarktyda wiąże więcej

wody w postaci lodu, niż oddaje na skutek topnienia pokrywy lodowej. Jest to obecnie priorytetowy temat badań.

W celu oszacowania masy wody ze stopionego lodu, zwiększającej poziom morza, IPCC (2001a, b) powołuje się na pomiary poziomu morza z XX w., by pomóc w prognozowaniu przyszłości. IPCC ostrzega, że jej prognozy poziomu morza na XXI w. są obciążone znacznym marginesem niepewności (ostrzeżenia nie podkreślane w innych opracowaniach opartych na prognozach IPCC). Faktycznie, istnieją rozbieżności między bezpośrednimi oszacowaniami wzrostu w XX w. w porównaniu z oszacowaniami dokonanymi na podstawie oceny masy i objętości (rozszerzalność termiczna) wody z topnienia. Badania opublikowane zaraz po ukazaniu się raportu analizowały temperaturę i zasolenie wód w pobliżu wodowskazów. Wpływ temperatury morza na wielkość ekspansji termicznej i zasolenie są wskazówkami, w jakim stopniu wody morskie są rozcieńczane słodkimi. Stwierdzono, że udział wody z topnienia w przyroście poziomu morza w XX w. był większy, niż poprzednio oszacowano (Miller i Douglas, 2004). Zostało to potwierdzone przez inne badania opublikowane tuż przed ukazaniem się kolejnego raportu IPCC w 2007 r. (Overpeck i in., 2006). Porównują one wzrost poziomu morza w ostatnim interglacjale z modelami komputerowymi i współczesnymi trendami. To znów sugeruje, że oszacowania IPCC z 2001 r. powinny być skorygowane w górę i że w XXI w. może zostać przekroczony próg, który spowoduje również wzrost temperatury na Antarktydzie, tak samo jak – co podejrzewają niektórzy (p. Toniazzi i in., 2004; cytowani w poprzednim rozdziale) – na Grenlandii. Jeśli odłamanie się lodu na Antarktydzie Zachodniej i inne zmiany topnienia wpłyną w wystarczającym stopniu na albedo, może zmienić się cyrkulacja atmosferyczna, powodując ocieplenie również Antarktydy Wschodniej, nie mówiąc o kontynencie jako całości. To może zwiększyć prawdopodobieństwo szybszego wzrostu poziomu morza niż w poprzednim interglacjale 127 000–130 000 lat temu, 6 m powyżej poziomu z początku XXI w. Zasadnicze pytanie brzmi, jak szybko może to nastąpić i jak bardzo trzeba skorygować oszacowania IPCC wzrostu poziomu morza w XXI w.?

Jeśli topienie będzie szybsze i dodatkowo woda będzie ulegać termicznemu rozszerzaniu, to oba te czynniki spowodują potencjalnie wzrost poziomu morza. To ma bardzo poważne konsekwencje dla człowieka. Politycy, decydenci i planiści powinni wziąć pod uwagę tę wątpliwość.

A czego należy spodziewać się w XXI w.? Wzrost poziomu morza o 6 m, jak w poprzednim interglacjale, jest prawdopodobnie najbardziej pesymistycznym (może niewyobrażalnie) scenariuszem na XXI w., nie jest jednak tak w dłuższej perspektywie czasowej. Przeciwnie, jest mało prawdopodobne (praktycznie niemożliwe), by cały lód antarktyczny i grenlandzki stopił się w XXI w. lub nawet w ciągu kilku następnych stuleci, tak nieprawdopodobne, że można w ogóle nie brać pod uwagę takiej możliwości. Jednakże, jeśli emisja gazów cieplarnianych nie zostanie w bliskiej przyszłości znacznie ograniczona i utrzyma się, w skali stuleci lub tysiącleci rośnie prawdopodobieństwo, że znaczna część tych lodowców może ulec stopieniu. Faktycznie, jeśli obecne ocieplenie może wywołać zdarzenie analogiczne do maksimum termicznego z początku eocenu, to takie topnienie może być możliwe. Jeśli Ziemia ociepli się wyraźnie przez tysiąclecia, poziom morza może wzrosnąć nawet o 80 m (tab. 6.3). To będzie miało znaczny wpływ na naszą cywilizację. Wszystkie obecne porty, wiele