

NAUKA O KLIMACIE

MARCIN POPKIEWICZ
ALEKSANDRA KARDAŚ
SZYMON MALINOWSKI

NAUKA O KLIMACIE

OBSERWACJE ZMIAN KLIMATU TERAZ I W PRZESZŁOŚCI
MECHANIZMY DZIAŁANIA SYSTEMU KLIMATYCZNEGO
DAWNE ZMIANY KLIMATU – CO, KIEDY, JAK I DLACZEGO
OBECNA ZMIANA KLIMATU – OBSERWACJE, PRZYCZYNY
PRZYSZŁA ZMIANA KLIMATU – DOKĄD ZMIERZAMY
KLIMATYCZNE KONTROWERSJE

post
FACTUM


WYDAWNICTWO
SONIA DRAGA


WYDAWNICTWO
NIECZYSWISTE

Warszawa 2019

Recenzja: prof. dr hab. Jacek Piskozub (Instytut Oceanologii PAN),
prof. dr hab. Zbigniew W. Kundzewicz (Instytut Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN)

Redakcja: Paulina Płatkowska, Agnieszka Jeż-Kaflik / Słowne Babki
Korekta: GAB Media

Ilustracja na okładce: © Bernard „Pyzz” Piechal i NASA Scientific Visualization Studio
Projekt grafiki: Anna Popkiewicz
Projekt okładki: Tomasz Majewski

ISBN: 978-83-8110-659-7 – oprawa miękka; 978-83-8110-801-0 – oprawa twarda (Wydawnictwo Sonia Draga)
ISBN: 978-83-63391-71-3 – oprawa miękka; 978-83-63391-77-5 – oprawa twarda (Wydawnictwo Nieoczywiste)

Copyright © 2018 by Marcin Popkiewicz, Aleksandra Kardaś, Szymon Malinowski
(under exclusive license to Wydawnictwo Sonia Draga and GAB Media)

Copyright © 2018 for this edition by Wydawnictwo Sonia Draga and GAB Media

Wydanie II poprawione

Wszelkie prawa zastrzeżone. Nieautoryzowane rozpowszechnianie całości lub fragmentu niniejszej publikacji w jakiegokolwiek postaci jest zabronione i wiąże się z sankcjami karnymi.

Książka, którą nabyłeś, jest dziełem twórcy i wydawcy. Prosimy, abyś przestrzegał praw, jakie im przysługują. Jej zawartość możesz udostępnić nieodpłatnie osobom bliskim lub osobiście znanym. Ale nie publikuj jej w internecie. Jeśli cytujesz jej fragmenty, nie zmieniaj ich treści i koniecznie zaznacz, czyje to dzieło. A kopiując ją, rób to jedynie na użytek osobisty.

Szanujmy cudzą własność i prawo!
Polska Izba Książki

Więcej o prawie autorskim na www.legalnakultura.pl



WYDAWNICTWO SONIA DRAGA Sp. z o.o.
ul. Fitelberga 1, 40-588 Katowice
tel. 32 782 64 77, fax 32 253 77 28
e-mail: info@soniadraga.pl
www.soniadraga.pl
www.postfactum.com.pl
www.facebook.com/PostFactumSoniaDraga
www.facebook.com/wydawnictwoSoniaDraga



Wydawnictwo Nieoczywiste – imprint GAB Media
www.nieoczywiste.pl
e-mail: wydawnictwo@nieoczywiste.pl

Skład i łamanie: TYPO 2 Jolanta Ugorowska

OPINIE O KSIĄŻCE

Znakomicie napisana i przystępna książka na temat, który budzi powszechne zainteresowanie. Brakowało takiej pozycji na polskim rynku wydawniczym. Kompetentni autorzy przedstawili nawet najbardziej złożone zagadnienia z lekkością i polotem, nie tracąc wysokiego poziomu i naukowej ścisłości. *Must read* dla każdego, kto interesuje się problematyką klimatu i jego zmian. Mam nadzieję, że książka pomoże w edukacji polskiego społeczeństwa, które jest dramatycznie podzielone w opiniach na temat zmian klimatu. Niech wiedza, a nie postprawda, oświecila nasze osądy.

**prof. dr hab. Zbigniew Kundzewicz, członek-korespondent PAN, hydrolog i klimatolog
z Instytutu Środowiska Rolniczego i Leśnego Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu**

To fenomenalna książka. Chwilami czyta się ją jak kryminał, choć powinna być potraktowana przez większość czytelników jako Biblia. A co najważniejsze, została napisana przez polskich naukowców – pasjonatów. To obowiązkowa lektura dla wszystkich – bez wyjątku – pragnących zdobywać wiedzę, jak też i tę wiedzę szerzących, lub też wiedzę podpierających się w życiu i w pracy. To lektura dla nauczycieli, studentów, polityków i ...prezenterów pogody. To dzieło wybitne, monumentalne i pierwsze w Polsce tak przekrojowo, dogłębnie, tak obszernie, mądrze, ale i przystępnie traktujące zmiany klimatu, które dla ludzkości są już bez wątpienia najpoważniejszym problemem. *Nauka o klimacie* powinna stać się obowiązkową lekturą każdego świadomego mieszkańca naszej planety.

**Jarosław Kret, dziennikarz telewizyjny, prezenter prognoz
pogody, członek Climate Without Borders**

Pierwszy znany mi kryminał przygodowy, którego zakończenie czytelnik sam współtworzy. Tak naprawdę *Nauka o klimacie* to dość nietypowy podręcznik, stopniowo odkrywający olbrzymią wiedzę o klimacie, która nie ogranicza się tylko do gazów cieplarnianych działających jak koc i podnoszących temperaturę planety. Te kilkaset stron to jak puzzle wielkiej „klimatycznej układanki”, odsłaniającej obraz wielu skomplikowanych i współzależnych mechanizmów, mających poprzez klimat i nasze działanie wpływ na całe nasze otoczenie. Zupełnie jak w powieści przygodowej – chcemy wiedzieć, co dalej, poznając jednocześnie „kryminalne” i podstępne skutki pozornie niegroźnych działań. Jako inżynier, teraz już świadomy wielu tych skomplikowanych procesów, mogę przez propagowanie wiedzy starać się również współtworzyć dalsze rozdziały tej książki.

Rafał Bryjak, specjalista w koncernie energetycznym

Nauka o klimacie wypełnia bardzo istotną lukę na polskim rynku wydawniczym, wręcz bolesną dla każdego, kto uczy o klimacie, czy też zajmuje się popularyzacją współczesnej wiedzy naukowej na ten dość ważny temat. Od lat prowadzę kurs wykładów „Ocean i klimat”, obejmujący bardzo szeroki zakres zagadnień i praktycznie wszystkie poruszone są w *Nauce o klimacie*. Książka skierowana jest do czytelnika o pewnym przygotowaniu, nie wykraczającym jednak poza program liceum – może więc służyć zarówno jako podręcznik na pierwszych latach wielu kierunków studiów jak i książka popularnonaukowa.

**prof. dr hab. Jacek Piskozub, członek Komitetu Geofizyki PAN,
fizyk morza, Instytut Oceanologii PAN w Sopocie**

Wobec narastającego szumu informacyjnego i coraz bardziej oddalonych od rzeczywistości opinii na temat otaczającego nas świata, ta książka dostarcza rzetelną informację, podaną w zrozumiały sposób i obejmującą bardzo szeroki zakres problemów. To idealne źródło skondensowanej wiedzy do samodzielnego oddzielania faktów od *fake news* na temat zmian naszej Planety.

prof. dr hab. Jan Marcin Węśławski, biolog, Instytut Oceanologii PAN w Sopocie

Zadziwiająco powszechne są wciąż w naszym kraju opinie negujące zmianę klimatu i jej antropogeniczny charakter. Ze smutkiem i zażenowaniem odbieram takie głosy. W tej wołającej o zmianę rzeczywistości ukazuje się na naszym rynku czytelniczym książka wyjątkowa, autorstwa wyśmienicie piszącego o bolączkach naszego świata Marcina Popkiewicza, który wraz z prof. Szymonem Malinowskim i dr Aleksandrą Kardaś przygotowali bezwzględnie potrzebne kompendium aktualnej wiedzy o klimacie i globalnym ociepleniu. Każdy, kto chce uzyskać pełny obraz dotyczący zmian klimatu, ma go teraz zebrany w jednym miejscu i podany na tacy. Liczę, że z *Nauki o klimacie* skorzystają politycy, ludzie nauki, mediów i polskie społeczeństwo.

**prof. dr hab. Piotr Skubała, ekolog, akarolog, działacz na rzecz ochrony przyrody,
Uniwersytet Śląski, Wydział Biologii i Ochrony Środowiska**

Pojęcie „zmiana klimatu” jest już wszechobecne. Mało kto jednak rozumie, o co chodzi z tym klimatem: ociepla się czy nie, mamy jako ludzie na to wpływ czy nie. Ile osób, tyle opinii. A przecież nie o opinię chodzi, lecz o oparte na faktach stanowisko. Książka w ciekawy sposób przeprowadza czytelnika przez meandry wiedzy naukowej o zjawiskach klimatycznych od czasów prehistorycznych po dzień dzisiejszy. Daje także naukową prognozę czekających nas zmian w tym zakresie. Cieszę się, że po jej przeczytaniu nie mam już wątpliwości, co się dzieje za oknem i co będzie się działo w niedalekiej przyszłości. Dzięki skrupulatności autorów mam wiedzę, a nie pogląd. I wiem, co powinnam zrobić z tą wiedzą. Polecam.

**Katarzyna Kordas, Inspektor w Biurze Zarządzania Energią
Urzędu Miejskiego w Bielsku-Białej**

SŁOWO WSTĘPNE

Globalne ocieplenie to temat bardzo gorący, wywołujący emocje i ożywione dyskusje. W tych dyskusjach spotykamy wiele niezrozumienia, odległych od stanu wiedzy wyobrażeń i często powtarzanych mitów klimatycznych, wypowiedzianych z niezmaconą pewnością siebie na zasadzie „na czym jak na czym, ale na klimacie to każdy się zna”.

Nauka o klimacie – jak każda dziedzina współczesnej nauki – jest bardzo rozbudowana i kompetentne wypowiedzanie się w jej zakresie wymaga sporej wiedzy. Jej zdobywanie jest niezwykle przygodą intelektualną, nie tylko z powodu wagi problemu ochrony klimatu, ale również ze względu na możliwość zrozumienia wielu mechanizmów funkcjonowania otaczającego nas świata.

Od 2013 roku prowadzimy portal „Nauka o klimacie”, na łamach którego dzielimy się wynikami badań naukowych dotyczącymi klimatu i jego zmian, a także wyjaśniamy pokutujące w przestrzeni publicznej mity klimatyczne. Opublikowane na stronie artykuły stały się kamieniem węgielnym i katalizatorem powstania niniejszej książki, która zbiera całość tematyki w jednym miejscu i łączy w spójny obraz.

W Polsce dotychczas nie było podręcznika wprowadzającego w fascynujący temat procesów sterujących klimatem Ziemi, jego zmian w przeszłości i tego, jak obecnie go zmieniamy. Pisząc tę książkę, dołożyliśmy starań, żeby przybliżyć te kwestie w możliwie przystępny i interesujący sposób, zachęcając nie do „wykucia” formułek, lecz do zrozumienia podstaw nauki o klimacie. Liczymy, że książka przyda się nie tylko studentom, ale też wszystkim pragnącym poszerzyć wiedzę na ten temat. Włożyliśmy duży wysiłek w udokumentowanie tekstu, w tym ilustracji, tak aby każdy miał możliwość zweryfikowania wszystkich ważniejszych stwierdzeń i sięgnięcia do źródeł opisujących interesujące go zagadnienia.

Osoby, które chcą podzielić się z nami swoimi uwagami i przemyśleniami, zapraszamy do kontaktu za pośrednictwem portalu Naukaoklimacie.pl lub na spotkania na piknikach naukowych i festiwalach nauki.

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	15
1.1. KLIMATYCZNE KONTROWERSJE I METODA NAUKOWA	16
Stanowisko nauki na temat obecnej zmiany klimatu i jej przyczyn. Metoda naukowa, literatura recenzowana i wiarygodność informacji.	
1.2. KLIMAT WCZORA I DZIŚ	22
Wprowadzenie: zmiany klimatu w przeszłości i obecna zmiana na ich tle – zmiany temperatury, stężeń gazów cieplarnianych.	
2. MASZYNA KLIMATYCZNA	37
2.1. BILANS ENERGETYCZNY	38
Pojęcie bilansu energetycznego i konsekwencji zaburzenia równowagi energetycznej.	
2.2. PROMIENIOWANIE	43
Przekaz energii przez promieniowanie. Ciało doskonale czarne, prawa Plancka, Stefana-Boltzmana i Wiena. Własności absorpcyjno-emisyjne różnych rodzajów powierzchni, ciało doskonale szare. Cechy charakterystyczne promieniowania słonecznego i promieniowania termicznego Ziemi.	
2.3. ALBEDO	51
Zdolność odbijania promieniowania przez ciało oraz jej znaczenie dla bilansu energetycznego planety.	
2.4. TEMPERATURA EMISYJNA PLANETY	55
Równowaga energetyczna planety i określanie temperatury planety na podstawie obserwacji jej promieniowania.	
2.5. EFEKT CIEPLARNIANY – MODEL SZYBY	57
Rozróżnienie temperatury emisyjnej i temperatury powierzchni Ziemi, efekt cieplarniany. Proste oszacowanie efektu cieplarnianego na podstawie tzw. modelu szyby.	
2.6. TERMICZNA STRUKTURA ATMOSFERY	61
Struktura atmosfery ziemskiej i sposoby transportu energii w atmosferze. Zmiany temperatury wraz z wysokością. Rola pary wodnej.	
2.7. ZMIANY STRUMIENIA PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO	69
Zmiany strumienia docierającego do Ziemi promieniowania słonecznego: ich przyczyny, wielkość i skale czasowe. Pojęcie wymuszenia radiacyjnego.	
2.8. GAZY CIEPLARNIANE I ICH CECHY	75
Gazy cieplarniane – przegląd, mechanizm działania, występowanie w atmosferze.	

2.9. WPŁYW GAZÓW CIEPLARNIANYCH NA WIDMO PROMIENIOWANIA ZIEMSKIEGO . . .	78
Wpływ gazów cieplarnianych na widmo promieniowania termicznego planety, jej bilans radiacyjny i temperaturę powierzchni.	
2.10. ZMIANY KONCENTRACJI GAZÓW CIEPLARNIANYCH A TRANSPORT ENERGII	83
Wpływ zmian koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze na widmo promieniowania długofalowego opuszczającego planetę i jej bilans radiacyjny. Ocieplanie troposfery i ochładzanie wyższych warstw atmosfery przy wzroście stężeń gazów cieplarnianych.	
2.11. CHMURY	92
Rola chmur w kształtowaniu albedo planety i efekcie cieplarnianym. Wpływ promieniowania kosmicznego na zachmurzenie.	
2.12. AEROSOL	99
Znaczenie aerozolu atmosferycznego w bilansie energii. Bezpośredni i pośredni efekt aerozolowy. Aerozole wulkaniczne.	
2.13. BILANS ENERGETYCZNY ZIEMI	103
Regionalny bilans energii, transport energii z rejonów międzyzwrotnikowych do polarnych.	
2.14. GLOBALNA CYRKULACJA ATMOSFERYCZNA I STREFY KLIMATYCZNE	107
Komórki cyrkulacji atmosferycznej: równikowa (Hadleya), polarna i strefy szerokości umiarkowanych (Ferrela). Prądy strumieniowe na granicach komórek. Lokalne efekty klimatyczne związane z rozmieszczeniem oceanów i lądów oraz rzeźbą terenu.	
2.15. OCEANY	121
Rola oceanów w kształtowaniu klimatu. Cyrkulacja termohalinowa: podstawy działania, wpływ na klimat, konsekwencje zmian cyrkulacji dla klimatu. Krótkoterminowe oscylacje oceaniczne El Niño-La Niña, PDO, AMO.	
2.16. SZYBKIE CYKLE WĘGLOWE	132
Rezerwuary i przepływy węgla w środowisku: atmosfera, oceany, biosfera, gleba, wieczna zmarzlina i hydraty metanu. Dwutlenek węgla i metan w szybkim cyklu węglowym.	
2.17. SPRZĘŻENIA W SYSTEMIE KLIMATYCZNYM ZIEMI	149
Sprzężenia dodatnie i ujemne w ziemskim systemie klimatycznym: zmiany rozmiaru czap polarnych, zmiany zachmurzenia i działanie pary wodnej. Sprzężenia w szybkim cyklu węglowym w oceanach i na lądach.	
2.18. WOLNE CYKLE WĘGLOWE I TERMOSTAT WĘGLOWY	166
Wolny cykl węglowy: wulkany, wietrzenie skał, formowanie osadów węglanów. Działanie termostatu węglowego i jego rola w stabilizowaniu klimatu Ziemi.	
2.19. IMPULS WĘGLOWY	172
Los szybko wyemitowanej do atmosfery dużej porcji dwutlenku węgla.	

Wpływ na klimat, rozprzestrzenianie się po innych rezerwuarach węgla, procesy stopniowo usuwające nadwyżkę dwutlenek węgla z szybkiego cyklu węglowego.	
2.20. CZUŁOŚĆ KLIMATU	180
Pojęcie czułości klimatu w różnych skalach czasowych. Rola sprzężeń zwrotnych. Metody określania czułości klimatu: modele komputerowe, badania paleoklimatyczne, pomiary instrumentalne.	
2.21. CZUŁE PUNKTY SYSTEMU KLIMATYCZNEGO	187
Lodowce, lądolody, rafy koralowe, cyklony – podstawy funkcjonowania i wpływ zmiany klimatu.	
2.22. PODSUMOWANIE	198
3. ZMIANY KLIMATU W HISTORII ZIEMI	199
3.1. EPOKI LODOWE	200
Cykle epok lodowych i ich mechanizm. Rola wymuszeń orbitalnych i sprzężeń w ziemskim systemie klimatycznym. Holocen. Zmiany poziomu morza podczas maksimum epok lodowych i interglacjałów.	
3.2. DALEJ WSTECZ W CZASIE	213
Zmiany klimatu w kenozoiku. Rola termostatu węglowego i innych czynników.	
3.3. PALEO-EOCENEŃSKIE MAKSYMUM TERMICZNE (PETM)	218
Epizod hipertermiczny sprzed 56 milionów lat. Przebieg, przyczyny, następstwa i niepewności.	
3.4. WIELKIE WYMIERANIA	221
Okresy wielkich wymierań w historii Ziemi – obserwacje, przyczyny, przebieg, konsekwencje. Rola wulkanów i ich emisji.	
3.5. ZIEMIA-SNIEŻKA	226
Wejście Ziemi w stan (prawie?) całkowitego pokrycia lodem. Procesy prowadzące do wejścia i wyjścia z tego stanu.	
3.6. PODSUMOWANIE	228
4. OBECNA ZMIANA KLIMATU	229
4.1. ŚWIAT PALIW KOPALNYCH	230
Emisje dwutlenku węgla w epoce przemysłowej: spalanie paliw kopalnych, wylesianie, produkcja cementu. Światowe źródła energii, rola ropy, węgla i gazu. Emisje dwutlenku węgla a zużycie energii i PKB. Globalne i regionalnie zmiany emisji.	

4.2. ZABURZONY CYKL WĘGLOWY	242
Znaczenie antropogenicznych emisji dwutlenku węgla dla cyklu węglowego. Zmiany w cyklu węglowym: atmosfera, oceany, ekosystemy lądowe.	
4.3. INNE GAZY CIEPLARNIANE	253
Obserwowane zmiany koncentracji metanu, tlenków azotu i gazów przemysłowych. Równoważnik emisji dwutlenku węgla. Zestawienie wpływu antropogenicznych źródeł emisji i gazów cieplarnianych na zmianę klimatu.	
4.4. ZMIANA BILANSU RADIACYJNEGO ZIEMI	258
Wpływ antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych, aerozoli (efekt bezpośredni i pośredni), zmian użytkowania terenu i innych czynników na bilans radiacyjny planety w zestawieniu z czynnikami naturalnymi. Obserwacje zmian widma i strumienia promieniowania długofalowego.	
4.5. BILANS ENERGETYCZNY ZIEMI: GDZIE PRZYBYWA ENERGII?	266
Zmiany energii skumulowanej w ziemskim systemie klimatycznym: atmosfera, oceany, lądy, lodowce, pomiary in-situ i satelitarne. Bilans i nierównowaga radiacyjna.	
4.6. FLUKTUACJE WZROSTU TEMPERATURY	270
Wpływ czynników szybkozmiennych na zmiany średniej temperatury globalnej: aktywność słoneczna, oscylacje oceaniczne, wulkany. Zestawienie czynników naturalnych i antropogenicznych.	
4.7. OBSERWACJE I NIEKTÓRE KONSEKWENCJE ZMIANY KLIMATU	273
„Globalne ocieplenie” a „Zmiana klimatu”. Wzrost temperatury i przesuwanie się stref klimatycznych, zmiany w Arktyce, lód morski wokół Antarktydy, topnienie lodowców i lądolodów, wzrost poziomu morza, zakwaszanie się oceanów, zmiany w występowaniu huraganów, spadek temperatury górnych warstw atmosfery, koszty gospodarcze.	
4.8. KLIMATYCZNE KONTROWERSJE	310
W jakim stopniu antropogeniczne emisje gazów cieplarnianych, a w szczególności dwutlenku węgla ze spalania paliw kopalnych, są przyczyną obecnej zmiany klimatu. Przegląd dowodów i weryfikacja wcześniejszych prognoz klimatologów.	
4.9. PODSUMOWANIE	322
5. PROGNOZA NA PRZYSZŁOŚĆ	323
5.1. ODPOWIEDŹ KLIMATU NA EMISJE GAZÓW CIEPLARNIANYCH	324
Oszacowanie ocieplenia wynikającego z wprowadzenia do szybkiego cyklu węglowego określonej ilości dwutlenku węgla. Kluczowe znaczenie emisji skumulowanej.	

5.2. POTENCJALNA PULA EMISJI	328
Ilość możliwych do wydobycia i spalania paliw kopalnych: rezerwy i zasoby.	
5.3. SCENARIUSZE EMISJI I ZMIANY KLIMATU	533
Scenariusze emisji i zmiany klimatu – dwutlenek węgla i inne gazy cieplarniane. Budżet węglowy i jego rozmiar dla różnych scenariuszy.	
5.4. ZMIANY W CYKLU WĘGLOWYM	339
Sprzężenia cyklu węglowego w obliczu ocieplenia klimatu: tajanie wieloletniej zmarzliny, efekt nawożenia roślin dwutlenkiem węgla, lasy tropikalne, hydraty metanu.	
5.5. SKUTKI OCIEPLANIA SIĘ KLIMATU	345
Prognozowane skutki ocieplania klimatu: przesuwanie się stref klimatycznych, zmiany temperatury i opadów, wzrost poziomu morza, wpływ na bezpieczeństwo żywnościowe, wymieranie gatunków i inne. Punkty krytyczne systemu klimatycznego. Konsekwencje dla Polski. Perspektywy na nową epokę lodową.	
5.6. CZARNY SCENARIUSZ	363
Czego możemy się spodziewać, kontynuując rozwój oparty na paliwach kopalnych: wpływ wysokich stężeń dwutlenku węgla na inteligencję, groźne dla życia temperatury, migracje i inne. Scenariusz wysokich emisji w kontekście dawnych zmian klimatu i wielkich wymierań. Scenariusz Wenus?	
5.7. GEOINŻYNIERIA	377
Inżynieria klimatu w skali planetarnej. Technologie usuwania węgla z szybkiego cyklu węglowego: wychwyt i magazynowanie dwutlenku węgla, zalesianie, bioenergia z wychwytem dwutlenku węgla, biowęgiel, przyspieszenie oceanicznej pompy biologicznej, sztuczne drzewa, sztuczny termostat węglowy. Technologie zmniejszania strumienia energii słonecznej: przesłony w kosmosie, rozpylanie aerozoli w stratosferze, wybielanie chmur, zwiększenie albedo powierzchni Ziemi.	
5.8. PRÓG 2°C	389
Pochodzenie progu „niebezpiecznej zmiany klimatu”. Przełożenie progu 2°C na dostępny budżet węglowy. Ujemne emisje. Niezbędne zmiany w emisjach z energetyki i przemysłu oraz rolnictwa. Kwestia podziału budżetu węglowego.	
5.9. Z POLSKIEJ PERSPEKTYWY	400
Polskie trendy emisji gazów cieplarnianych. Dotychczasowe redukcje. Kwestia polskich złóż węgla.	
5.10. DROGA DO PRZYSZŁOŚCI	406
Efektywność energetyczna i czyste źródła energii. Stosowanie zasady „zanieczyszczający płaci”. Wnioski końcowe.	

6. MATERIAŁY DODATKOWE	417
6.1. HISTORIA BADAŃ KLIMATU	417
Badania klimatu od XVIII wieku do współczesności – ciągłość badań naukowych.	
6.2. BADANIE KLIMATU – TERAŹNIEJSZOŚĆ I NIEDAWNA PRZESZŁOŚĆ	429
Metody badania klimatu: pomiary temperatury na lądach i homogenizacja danych, pomiary temperatury na oceanach i w ich głębinach, pomiary satelitarne, inne współczesne narzędzia i metody pomiarowe.	
6.3. BADANIE KLIMATU – PALEOKLIMAT	449
Metody badania dawnego klimatu: zapisy historyczne, zasięg lodowców, słoje drzew, izotopy, rdzenie lodowe, niebieski lód, resztki nieorganiczne w osadach oceanicznych, odwierty głębinowe, nacieki jaskiniowe, aparaty szparkowe, pyłki oraz pozostałości roślinne i zwierzęce na lądach, resztki organiczne w osadach oceanicznych, koralowce, paleozole i inne.	
6.4. ŹRÓDŁA KONTROWERSJI W KWESTII ZMIANY KLIMATU	470
Zmiana klimatu jako wyzwanie społeczne, psychologiczne i gospodarcze. Przemysł sfabrykowanych wątpliwości. Tragedia wspólnego pastwiska. Psychologia zmiany klimatu. Dyskontowanie przeszłości.	
6.5. MITY KLIMATYCZNE – INSTRUKCJA OBSŁUGI	481
Mechanizmy powstawania mitów klimatycznych. Przykłady mitów i sposoby ich wyjaśniania.	
6.6. POCHŁANIANIE I EMISJA PROMIENIOWANIA PRZEZ GAZY	495
Podstawy fizyczne pochłaniania i emisji promieniowania przez gazy.	
6.7. MODELE NUMERYCZNE	500
Podstawowe informacje o modelach klimatu: elementy składowe, zasady działania, ewolucja. Modelowanie pogody a modelowanie klimatu. Ograniczenia modeli i ich wiarygodność z punktu widzenia symulowania dawnego klimatu i jego przyszłych zmian.	
6.8. ŹRÓDŁA DANYCH KLIMATYCZNYCH	510
ODPOWIEDZI DO ZADAŃ	512
BIBLIOGRAFIA	514
SPIS ILUSTRACJI	528

1. WPROWADZENIE



Na pewno zdarzyło ci się spotkać z różnymi opiniami na temat obecnej zmiany klimatu – czy się ociepla czy nie, czy to wynik naszych działań czy część naturalnych procesów, czy będzie to problemem czy też raczej powodem do zadowolenia.

1.1. Klimatyczne kontrowersje i metoda naukowa

Zmiany klimatu to temat trudny i przez wiele osób odbierany jako kontrowersyjny. Na co dzień doświadczasz zmian pogody, podróżując, zauważasz zmiany stref klimatycznych, masz w tym zakresie wiele wspomnień i przemyśleń. Być może uważasz, że wiesz już dużo o klimacie i jego zmianach – możliwe nawet, że tak jest. Dlatego na początek proponujemy ci quiz, w którym będziesz mógł wykazać się swoją wiedzą. Zaznacz, które z poniższych stwierdzeń są prawdziwe.

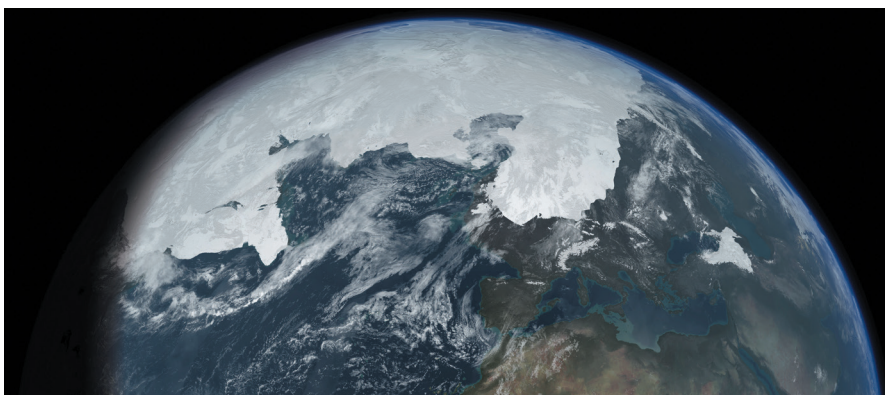
- W ciągu ostatnich stu lat średnia temperatura powierzchni Ziemi wzrosła jedynie o niewiele ponad 1 stopień Celsjusza.
- Jeśli porównać strumień energii docierający do Ziemi od Słońca z temperaturą powierzchni Ziemi, to widać bardzo dobrą korelację między nimi, trwającą tysiące, a nawet setki tysięcy lat – to energia promieniowania Słońca sterowała klimatem Ziemi.
- Aktywność Słońca w XX wieku była bardzo wysoka – lodowce na świecie zaczęły się cofać już w połowie XIX wieku, zanim jeszcze nasza emisja gazów cieplarnianych stała się znacząca.
- Klimatem steruje wiele różnorodnych czynników – m.in. Słońce, wulkany, zmiany zawartości gazów cieplarnianych, ułożenie kontynentów, zmiany prądów oceanicznych i inne.
- Erupcja dużego wulkanu może znacząco obniżyć temperaturę na Ziemi.
- Aktywność wulkaniczna wpływała na klimat Ziemi przez setki milionów lat.
- Gazy cieplarniane to tylko ułamek procenta gazowych składników powietrza, przy czym ponad 90% cząsteczek wszystkich gazów cieplarnianych stanowi para wodna.
- 95% emisji dwutlenku węgla do atmosfery jest pochodzenia naturalnego.
- Według większości modeli klimatycznych podwojenie zawartości dwutlenku węgla w powietrzu bez zmiany innych elementów systemu klimatycznego spowodowałoby ocieplenie tylko o około 1°C.
- Gdy w atmosferze jest więcej dwutlenku węgla, rośliny rosną szybciej.
- Klimat zmieniał się zawsze, powodowały to czynniki naturalne, a zmiany klimatu bywały znacznie większe niż w ostatnim stuleciu.
- Podczas małej epoki lodowej było tak zimno, że zimą na zamrożonej Tamizie handlarze rozstawiali kramy.
- Kilka tysięcy lat temu klimat był łagodniejszy niż w XX wieku, a strefa lasów na półkuli północnej dochodziła aż pod koło podbiegunowe.
- 20 tys. lat temu lodowiec zajmował Kanadę, znaczną część obecnych terenów USA, Europy i Azji północno-zachodniej, średnia temperatura Ziemi była niższa o 4°C, a poziom oceanów był niższy o 120 metrów.
- 125 tys. lat temu, podczas interglacjału eemskiego, średnia temperatura naszej planety była o 1,5°C wyższa niż w XX wieku – w Tamizie żyły nawet hipopotamy.

- 35 mln lat temu na Ziemi było o kilka stopni cieplej niż obecnie. Na Ziemi w ogóle nie było łądolodów, nawet na Antarktydzie, a poziom oceanów był wyższy o 75 metrów od obecnie.
- 55 mln lat temu na Ziemi było tak ciepło, że na Alasce rosły bananowce, a w Oceanie Arktycznym pływały się krokodyle.
- W czasach dinozaurów temperatura Ziemi była o kilka stopni wyższa niż obecnie, a stężenie dwutlenku węgla było kilkukrotnie wyższe.

Które z tych stwierdzeń są prawdziwe? Odpowiedzi znajdziesz na następnej stronie.



Ilustracja 1.1.1. Dwa spojrzenia na obecną zmianę klimatu. Powodowane przez ludzkość poważne zagrożenie czy nic specjalnego, czym należałoby się przejmować.



Ilustracja 1.1.2. Ziemia w czasie maksimum epoki lodowej 20 tys. lat temu.

Otóż wszystkie te stwierdzenia są prawdziwe.

Tak, zmiany klimatu to rzecz zupełnie normalna, mająca miejsce na długo wcześniej, zanim w ogóle pojawili się ludzie i na znacznie większą skalę. Gazem mającym największy wkład w efekt cieplarniany jest bezdyskusyjnie para wodna, a antropogeniczne emisje CO₂ to tylko drobny ułamek tych ze źródeł naturalnych.

Jak to więc jest z tym globalnym ociepleniem? Czy klimat Ziemi się ociepla, czy jednak nie? Czy to część naturalnych cykli zmian klimatu, czy rezultat naszej działalności? A jeśli przyczyniamy się do tego, to w jakim stopniu? No i czy zmiana klimatu będzie poważnym problemem?

Naukowcy badają tę kwestię od dawna. Niewątpliwie najbardziej znaną organizacją zajmującą się tym tematem jest założony w 1988 roku przez ONZ Międzypaństwowy Zespół do spraw Zmiany Klimatu (ang. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC), powołany właśnie w celu oceny ryzyka związanego z wpływem człowieka na klimat. Tysiące naukowców dokonuje przeglądu stanu wiedzy naukowej w tym obszarze i co kilka lat publikuje obszerne raporty. Wnioski? W ostatnim, piątym raporcie IPCC z 2013 roku czytamy^[1]:

Ocieplenie systemu klimatycznego jest bezdyskusyjne. Wiele zmian, obserwowanych w systemie od lat pięćdziesiątych XX wieku nie ma precedensu w skali wielu dziesięcioleci, a nawet tysiącleci (...). Jest niezwykle prawdopodobne [przyp. aut.: w języku IPCC „niezwykle prawdopodobne” oznacza prawdopodobieństwo przekraczające 95%], że człowiek wpłynął w sposób dominujący na obserwowane od połowy XX wieku ocieplenie. (...) Kontynuacja emisji gazów cieplarnianych spowoduje dalsze ocieplenie oraz zmiany wszystkich elementów systemu klimatycznego, zwiększając prawdopodobieństwo dotkliwych, powszechnych i nieodwracalnych następstw dla gospodarki i ekosystemów.

Inaczej mówiąc, IPCC stwierdza, że globalne ocieplenie zachodzi i jest powodowane przez nasze emisje gazów cieplarnianych, głównie dwutlenku węgla ze spalania paliw kopalnych, oraz że spowoduje bardzo poważne problemy.

Ale przecież na świecie jest też wiele innych organizacji naukowych, nie samo IPCC... Jak myślisz: jak duży odsetek z kilkuset instytucji naukowych o renomie międzynarodowej lub ogólnokrajowej w swoich opublikowanych stanowiskach zgadza się z wnioskami IPCC, a jaki ma odmienne zdanie (stwierdzając na przykład, że wcale się nie ociepla, ewentualnie że jest to głównie rezultat naturalnych cykli zmian klimatu, a jeśli nawet mamy w to jakiś wkład, to niewielki lub następstwa będą mało istotne)? Czy pamiętasz nazwę chociaż jednej instytucji z tej drugiej grupy?

Przypuszczamy, że nie pamiętasz. Nie dziwimy się, ponieważ... żadna instytucja naukowa o międzynarodowej renomie w obszarze badania klimatu w swym oficjalnym stanowisku nie odrzuca wniosków IPCC. Ostatnią taką organizacją było (co znamienne) Amerykańskie Stowarzyszenie Geologów Naftowych, które w 2007 roku zmieniło swoje oświadczenie z 1999 r., odrzucające prawdopodobieństwo wpływu ludzi na obecną zmianę klimatu, zastępując je brakiem opinii w tej kwestii^[2].

CZY GLOBALNE OCIEPLENIE POWODOWANE PRZEZ LUDZI JEST FAKTEM ?

TAK

OPINIE ORGANIZACJI NAUKOWYCH

NIE



Ilustracja 1.1.3. Po lewej przykładowe logotypy dużych organizacji naukowych, które w swoim stanowisku stwierdzają, że klimat Ziemi się ociepla, główną tego przyczyną są emitowane przez nas gazy cieplarniane – przede wszystkim CO₂ ze spalania paliw kopalnych oraz będą z tego powodu poważne problemy. Po prawej logotypy **wszystkich** dużych organizacji naukowych, które mają odmienne zdanie, np., że się nie ociepla, a nawet jeśli, to jest to naturalna zmiana klimatu albo przyczyną nie są emitowane przez nas gazy cieplarniane lub nawet jeśli tak, to nie będzie to problemem.

Nie ma obecnie już ANI JEDNEJ dużej organizacji naukowej, która zaprzeczałaby realności zmiany klimatu i jej antropogenicznym korzeniom*.

* Owszem, istnieją organizacje, które negują antropogeniczność zmiany klimatu, emisje gazów cieplarnianych jako jej przyczynę, a nawet sam fakt ocieplenia się klimatu. Żadna z nich nie jest jednak dużą organizacją naukową o międzynarodowej renomie. Więcej na temat tego, jakie to organizacje, wraz z przykładami ich wypowiedzi, przeczytasz w końcowych rozdziałach 6.4. i 6.5.

Rzecz jasna nauki nie uprawia się przez głosowanie. Były czasy, kiedy panowało przekonanie, że Ziemia jest płaska czy że Słońce krąży wokół Ziemi, która jest środkiem Wszechświata. Odmienne zdania zgłaszali pojedynczy badacze, tacy jak Arystarch, Kopernik czy Galileusz, którzy opowiadali się za heliocentrycznym modelem Układu Słonecznego. I okazało się, że to nie większość miała rację, tylko oni.

Nauka nie jest demokracją. Nauka jest dyktaturą. Dyktaturą obserwacji, faktów i dowodów naukowych. Czas pokazał, że to Arystarch, Kopernik i Galileusz mieli rację, bo swoje tezy oparli na wynikach krytycznie zweryfikowanych obserwacji. Ich oponenti trwali w błędzie, bo „wiedzieli swoje”, nie trudząc się obserwacjami i ich krytyczną analizą. Warto dodać, że wspomniani naukowcy nie obalili całej wcześniejszej wiedzy, podali tylko lepsze niż poprzednicy wyjaśnienie wyników obserwacji, nie tylko własnych, ale wielu innych badaczy.

Zmiana klimatu i jej związek z działalnością człowieka to sprawdzalne naukowo zjawiska, potwierdzone licznymi dowodami – i stąd właśnie bierze się tak jednoznaczna opinia instytucji badawczych. Gdyby dziś Arystarch, Kopernik czy Galileusz przyjrzeni się dyskusjom dotyczącym zmiany klimatu, gdzie po jednej stronie stoją naukowcy z wynikami badań, a po drugiej ludzie, którzy „wiedzą swoje”, kogo by poparli?

Wielokrotnie słyszeliśmy pytanie: „Czy wierzycie w globalne ocieplenie?”. Odpowiadamy pytaniem: „A czy wierzysz w elektrony, prawa Maxwella i teorię względności?”. Rozmówca jest zwykle skonsternowany, bo do elektronów czy praw Maxwella pytanie o „wiarę” jakoś nie pasuje. Jest oczywiste, że to nie kwestia wiary, lecz wiedzy, jaką uzyskaliśmy w wyniku wielu badań naukowych. Dokładnie tak samo jest ze zmianą klimatu, która jest sprawdzalnym naukowo, opisywanym prawami fizyki zjawiskiem.

W nauce wszystko zaczyna się od faktów, obserwacji i pomiarów. Może to być pojedyncza intrygująca obserwacja, która zwróci uwagę naukowca, może też być cały zbiór mniej lub bardziej różnorodnych obserwacji, które łącznie nie dają się dobrze wyjaśnić w ramach istniejącego paradygmatu. Kiedy badacz spotyka się z takimi obserwacjami, stara się je wyjaśnić, tworząc hipotezę. Zazwyczaj zaczyna się od hipotez pasujących do dobrze ugruntowanej wiedzy naukowej i uzupełniających ją. W szczególnych przypadkach okazuje się, że pomimo wysiłków nie udaje się stworzyć wyjaśniającej obserwacje hipotezy, która byłaby zgodna z obowiązującym paradygmatem. W takiej sytuacji trafiamy na coś naprawdę ważnego i ciekawego!

Gdy coraz dokładniejsze pomiary prędkości światła dawały taki sam wynik, niezależnie od tego, czy mierzyło się ją w kierunku ruchu Ziemi wokół Słońca, czy przeciwnym, Albert Einstein zaproponował wprowadzenie szczególnej zasady względności, obalając obowiązujące „od zawsze” przekonanie od niezależności czasu i przestrzeni od obserwatora^[3].

Tworzone hipotezy należy zweryfikować, planując i przeprowadzając eksperyment o nieznanym wcześniej wyniku, najlepiej taki, w którym przewidywania

hipotezy różnią się od tego, co prognozują inne hipotezy, a być może i ugruntowane teorie.

Albert Einstein szukając wytłumaczenia dla obserwowanej precesji orbity Merkurego, wyjaśnił ją na fundamencie swojej ogólnej teorii względności. Z równań wynikało jednak znacznie więcej, w tym widoczny wpływ masy na zakrzywienie toru promieni świetlnych – co potwierdził Arthur Eddington obserwacją zaćmienia Słońca w 1919 roku. Nie oznacza to jednak, że wraz z przyjęciem ogólnej teorii względności do kanonu wiedzy, teoria grawitacji Newtona została wyrzucona do kosza. Jej równania w bardzo dobrym przybliżeniu opisują zachowanie ciał w zdecydowanej większości sytuacji, z którymi mamy w praktyce do czynienia i są wciąż wykorzystywane przez naukowców – ze świadomością ich ograniczeń i zakresu stosowności.

Analiza wyników eksperymentu wraz z wnioskami powinna być zweryfikowana przez innych ekspertów. Odbywa się to przez publikację w recenzowanym czasopiśmie naukowym, w którym artykuły przechodzą najpierw przez proces weryfikacji (w szanujących się czasopismach prowadzony przez kilka osób i wieloetapowo), podczas którego zgłaszane są pytania i uwagi do autorów badania, a w razie niesatysfakcjonujących odpowiedzi i wyjaśnień pracę się odrzuca. W rezultacie znakomita większość publikowanych artykułów pozbawiona jest poważnych błędów, a wiele z nich wnosi coś nowego do stanu wiedzy. Rzecz jasna, nie wszystkie publikowane artykuły są przełomowymi badaniami – ogromna większość dotyczy drobnych aspektów teorii naukowych lub pogłębiających naszą wiedzę wyników pomiarów czy ich interpretacji (w końcu to na pomiarach i obserwacjach bazuje nasza wiedza!).

Publikacja w prestiżowym, recenzowanym periodyku naukowym, takim jak *Nature* czy *Science* nie gwarantuje, że praca jest na 100% pozbawiona błędów, jest jednak dobrą rękojmią jej poprawności merytorycznej. Publikacje w prasie popularnej, na blogach, wypowiedzi celebrytów czy oświadczenia polityków mogą bardzo daleko od takiej poprawności odbiegać. Żaden zespół specjalistów naukowych nie poddaje ich przecież weryfikacji.

Proces poznawania świata przez stawianie hipotez, ich weryfikację eksperymentalną, odrzucanie hipotez niezgodnych z doświadczeniem i rozwijanie teorii na podstawie coraz lepszych danych i obserwacji nazywamy **metodą naukową**.

W praktyce bardzo często obserwacje i analizy teoretyczne wielowątkowo przeplatają się i uzupełniają, tworząc stopniowo coraz bardziej spójny obraz, jak w wielkiej układance. Jeśli gdzieś są puste miejsca, naukowcy wypełniają je za pomocą badań, pomiarów i nowych **hipotez**, po pomyślnym zweryfikowaniu stających się **teoriami**. Pomiaru zwykle nie są robione na ślepo, lecz służą wypełnieniu konkretnych luk i weryfikacji określonych hipotez, na przykład na zasadzie: „jeśli nasza hipoteza dotycząca zmian cyrkulacji oceanicznej jest poprawna, to w położonych w rejonie X osadach z tego okresu powinniśmy obserwować określone zmiany w występowaniu toru oraz takie-a-takie zmiany we względnej zawartości izotopów

tlenu”. Ekipa badaczy wybiera się więc w rejon X, pobiera próbki i stwierdza, czy prognozowane przez hipotezę zmiany w składzie osadów rzeczywiście występują. Proces weryfikacji teorii i wyjaśniania potencjalnych wątpliwości przebiega nieustannie, z wykorzystaniem coraz bardziej zaawansowanych metod badawczych. Przywołana wcześniej ogólna teoria względności, mimo stulecia istnienia, wciąż podlega weryfikacji – głównie dzięki instrumentom, o których eksperymentatorzy z czasów Einsteina mogli tylko pomarzyć. Tak samo jest z klimatologią – badamy widma promieniowania, zachodzące w chmurach procesy, dane paleoklimatyczne i wiele innych z pomocą coraz bardziej zaawansowanych instrumentów.

Owszem, coś może pójść nie tak. Pomiary mogły zostać błędnie przeprowadzone, dane mogą zostać nieprawidłowo opracowane, ludzie mogą się pomylić lub w skrajnym przypadku oszukiwać. Ale system recenzji naukowej oraz wzajemnej weryfikacji obserwacji, analizy danych i wniosków teoretycznych wcześniej czy później wychwytuje i koryguje takie przypadki. Metoda naukowa to najlepsze narzędzie poznawania świata i rządzących nimi praw, jakie udało nam się opracować.

Nowożytnie badania nad klimatem są prowadzone od ponad dwóch stuleci. Stopniowo do układanki dodawane były kolejne elementy, a w miarę postępu obserwacji, metod obliczeniowych, pogłębiania wiedzy w zakresie mechaniki kwantowej, elektrodynamiki i wielu innych obszarów fizyki, chemii, biologii, geologii oraz innych dyscyplin naukowych, obraz stawał się coraz bardziej precyzyjny i kompletny. O tym, jaką drogą przebiegały badania nad klimatem, przeczytasz w rozdziale 6.1. pt. „Historia badań klimatu”.

Czy jeśli metoda naukowa doprowadzi do powstania jakiejś uznawanej powszechnie za obowiązującą teorii, to będzie ona na pewno prawdziwa i będzie obowiązywać zawsze? Oczywiście nie – tylko do czasu, aż zostanie obalona i zastąpiona inną lub (częściowo) rozszerzona. Żeby obalić czy rozszerzyć teorię, także trzeba posłużyć się metodą naukową. Potrzebne są obserwacje i inne zweryfikowane dowody. Własne przemyślenia, przekonania, petycje, artykuły czy filmy w mediach i internecie NIE MAJĄ mocy obalania teorii naukowych.

Nauka nie jest demokracją. Nie trzeba, a nawet nie należy słuchać wszystkich głosów, bo nie wnosi to niczego wartościowego, a tylko generuje szum informacyjny. Wartość mają tylko te głosy, które podają wyniki zweryfikowane metodą naukową.

1.2. Klimat wczoraj i dziś

Na początek warto przyrzeć się ostatnio zachodzącej zmianie klimatu w perspektywie historii naturalnej Ziemi. Opis metod, którymi posługujemy się przy badaniu zachodzących obecnie zmian (nie tylko temperatury powietrza, ale też energii wewnętrznej całości ziemskiego systemu klimatycznego, aktywności słonecznej i innych istotnych parametrów) znajdziesz w rozdziale 6.2. pt. „Badanie klimatu. Teraźniejszość i niedawna przeszłość”. Przed lekturą dalszej części książki warto się

z nim zapoznać. Za każdym razem, kiedy wskazane będzie skorzystanie z materiałów zawartych w materiałach dodatkowych, będziemy o tym informować w tekście.

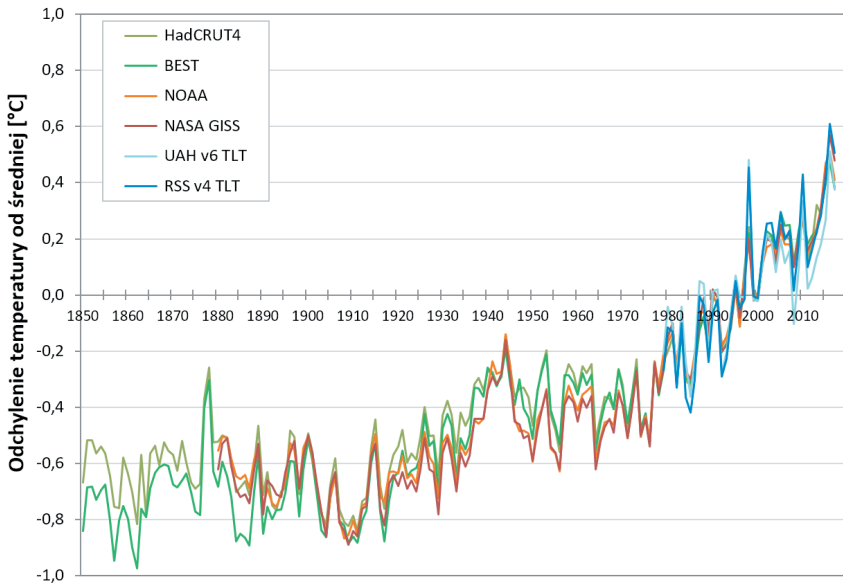
Dopiero od drugiej połowy XIX wieku pomiary temperatury powietrza przy powierzchni Ziemi prowadzone są na wystarczająco dużym obszarze, by można było wnioskować o globalnych zmianach klimatu. W ostatnich 40 latach do pomiarów dokonywanych przy powierzchni, zarówno na lądach, jak i na morzach, doszły pomiary (a raczej zdalne obserwacje) satelitarne. Choć różne serie pomiarowe różnią się technikami pomiarowymi, stopniem pokrycia pomiarami powierzchni Ziemi oraz sposobami obróbki i analizy danych, to zgodnie pokazują, że od drugiej połowy XIX wieku średnia temperatura powierzchni naszej planety wzrosła o około 1°C, szczególnie szybko rosnąc w ostatnich dekadach.

Wielkości bezwzględne a ich zmiany

Stań na podłodze. Czy wiesz, z dokładnością do 1 milimetra, w jakiej odległości od środka Ziemi znajdują się teraz twoje stopy? Nie wiesz, prawda? Prawdopodobnie trudno byłoby ci podać tę wartość nawet z dokładnością do 1 kilometra. Stań teraz na taborecie wysokości 60 cm i powiedz, w jakiej odległości od środka Ziemi są twoje stopy. Nadal nie wiesz... ale możesz powiedzieć, że o 600 milimetrów większej (pomiar wysokości taboretu z dokładnością do 1 mm nie stanowi szczególnego problemu), nie wnikając przy okazji w rozważania o tym, czy liczymy względem spodu stóp czy ich środka ciężkości i gdzie on właściwie jest. Załóżmy, że umiesz podać odległość swoich stóp od środka Ziemi z dokładnością do kilometra (jeśli tak, gratulacje, należysz do naprawdę elitarnego grona). Czy w ramach dokładności twojego pomiaru coś się zmieni, kiedy wejdziesz na dziesiąte piętro wieżowca i znajdziesz się na wysokości 30 metrów nad ziemią? W ramach niepewności pomiarowej nic się oczywiście nie zmieni, ale... jeśli wypadniesz przez okno, ważne będzie tylko to, że wypadłeś z okna 30 metrów nad ziemią, natomiast dokładna odległość od środka Ziemi nie będzie szczególnie istotna (wyskoczenie z 10. piętra w Gdańsku albo Zakopanem będzie mieć podobny skutek, niezależnie od różnicy odległości od środka Ziemi).

Podobnie można dociekać, jaka jest średnia głębokość Wszechoceanu (ok. 3,7 km), średnia temperatura powierzchni Ziemi (ok. 14°C) czy średni strumień promieniowania słonecznego (ok. 1361 W/m²), ale dużo dokładniej (i z większym pożytkiem praktycznym) można mierzyć **zmiany** średniego poziomu morza, temperatury, strumienia promieniowania słonecznego i wielu innych parametrów.

Odchylenie temperatury od średniej z danego okresu (tzw. okresu bazowego) określa się też jako „**anomalie temperatury**”. Określenie to nie ma nic wspólnego z potocznym użyciem słowa „anomalie” dotyczącym nietypowych zdarzeń, jak np. w sformułowaniu „anomalie pogodowe”.



Ilustracja 1.2.1. Anomalia, czyli odchylenie temperatury powierzchni Ziemi od średniej (dla pomiarów satelitarnych UAH i RSS zmiany temperatury troposfery na wysokości kilku kilometrów, patrz rozdział 6.2.) względem okresu bazowego 1981-2010, cieplejszego o ok. 0,7°C względem okresu przedprzemysłowego.

Bardzo często jako punkt odniesienia, zarówno dla obecnej zmiany klimatu, jak i zmiany klimatu w przeszłości przyjmuje się tzw. „okres przedprzemysłowy”. W 5. Raplocie IPCC z 2013 roku jako historyczny okres bazowy były wykorzystywane lata 1850–1900, jednak z jednej strony w tym czasie miało miejsce kilka dużych erupcji wulkanicznych (działających ochładzająco na klimat za pośrednictwem aerozoli stratosferycznych), a z drugiej strony koncentracje gazów cieplarnianych już wtedy były lekko podwyższone. Za punkt odniesienia „okresu przedprzemysłowego” można też przyjąć okres 1720–1800, kiedy epoka przemysłowa jeszcze się dobrze nie zaczęła, a aktywność słoneczna i wulkaniczna były na podobnym poziomie co obecnie (patrz ilustracje 2.7.1., 2.12.2.)^[1]. Różnice dla obu wyborów okresu bazowego (1720–1800 lub 1850–1900) nie są bardzo duże (różnią się o ok. 0,1°C) – można więc przyjąć w przybliżeniu, że od „okresu przedprzemysłowego” do lat 1981–2010 średnia temperatura powierzchni Ziemi wzrosła o 0,7°C, a w roku 2015 po raz pierwszy w historii pomiarów wzrost średniej temperatury powierzchni Ziemi przekroczył 1°C ponad poziom z „okresu przedprzemysłowego” (patrz ilustracja 1.2.1.).

Oprócz bezpośrednio mierzonych temperatur powietrza przy powierzchni Ziemi o postępującym ociepleniu świadczy wiele innych obserwacji, takich jak przesuwanie się stref klimatycznych, zanik lodu morskiego w Arktyce, topnienie lądolodów Grenlandii i Antarktydy oraz lodowców, wzrost poziomu oceanów,

coraz częstsze fale upałów, nagrzewanie się oceanów od powierzchni w głąb, taniecie wieloletniej zmarzliny (kiedyś nazywanej „wieczną”), migracje gatunków w kierunku biegunów i na wyższe wysokości oraz wiele innych zjawisk.

Pojawia się oczywiście pytanie: czy obecne ocieplenie jest czymś nietypowym? I następne: jak ma się ono do zmian klimatu, które zachodziły wcześniej?

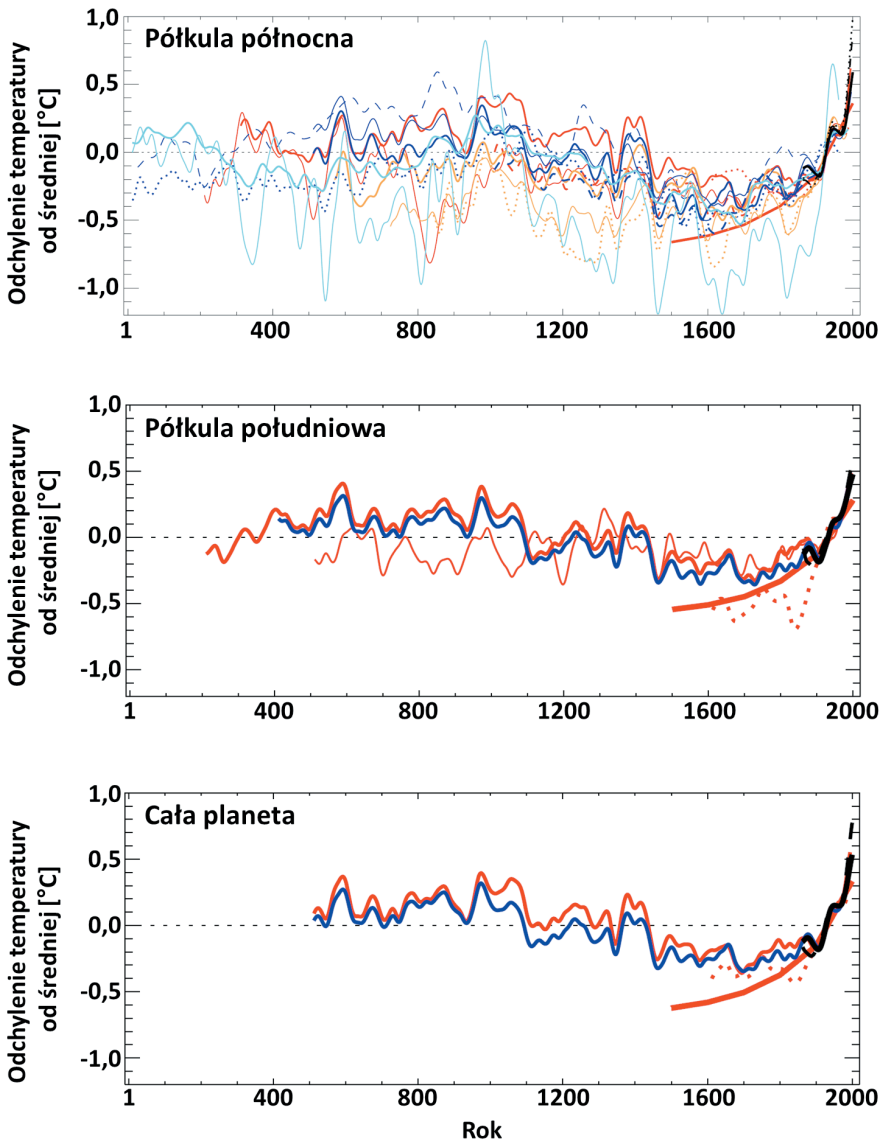
Tysiące i miliony lat temu nikt nie mierzył temperatur, stężeń gazów cieplarnianych, poziomu morza czy aktywności słonecznej. Nie tylko z braku odpowiednich instrumentów pomiarowych – przez większą część historii Ziemi brakowało również odpowiednio inteligentnego „kogoś”. Aby poznać odległe dzieje naszej planety, musimy więc sięgać po tzw. wskaźniki klimatyczne (ang. *proxy*), czyli dane, na podstawie których można pośrednio oszacować parametry opisujące klimat (np. temperaturę, skład atmosfery czy dostępność wody). Ślady dawnych zmian klimatu są dostępne w wielu miejscach, od głębin oceanicznych po łądłolody – trzeba tylko wiedzieć, jak je wytropić i odczytać. Cennych informacji dostarczają pozostałości roślin i zwierząt, słoje drzew, szata naciekowa jaskiń, rdzenie lodowe, osady oceaniczne i jeziorne itp. Więcej na temat wskaźników klimatycznych przeczytasz w rozdziale 6.3. pt. „Badanie klimatu – paleoklimat”. To dobry moment, żeby go przejrzeć.

Najpierw udajmy się do stosunkowo niedalekiej przeszłości. Ponieważ dużo więcej badań zostało przeprowadzonych na półkuli północnej, to dla niej posiadamy pełniejszy obraz zmian klimatu. Na ilustracji 1.2.2. widzimy zmiany średniej temperatury odpowiednio półkuli północnej i południowej oraz globalnej w okresie od 1 roku n.e.

Na początku średniowiecza, w latach 950–1250 n.e., miało miejsce tzw. średniowieczne optimum klimatyczne (ang. *Medieval Warm Period*, MWP), kiedy to klimat był zauważalnie cieplejszy niż we wcześniejszych i późniejszych stuleciach, szczególnie w porównaniu z tzw. małą epoką lodową, która trwała od 1450 roku do połowy XIX wieku.

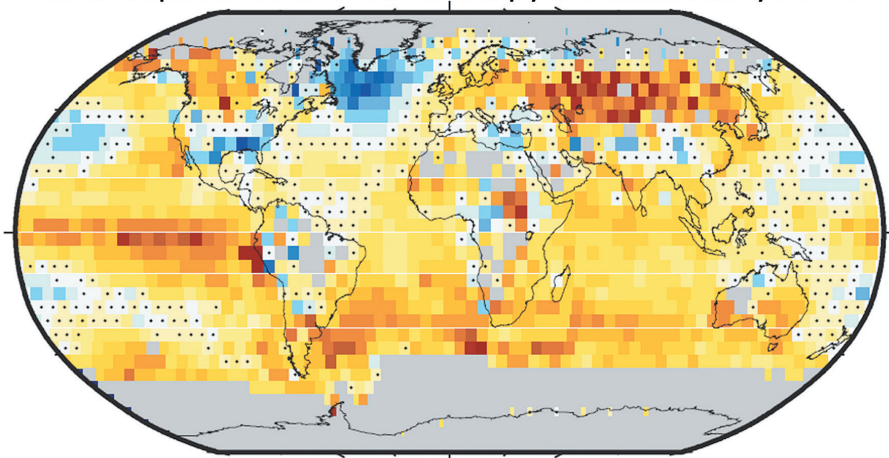
Średniowieczne optimum klimatyczne charakteryzowało się ciepłymi warunkami na dużej części Północnego Atlantyku, południa Grenlandii, Arktyki Eurazjatyckiej i części Ameryki Północnej (co było związane ze wzmożonym transportem ciepła przez Prąd Zatokowy w rejon Północnego Atlantyku). W tych miejscach temperatura była wyższa niż w drugiej połowie XX wieku. Jednak inne regiony, jak np. Azja Środkowa, północny zachód Ameryki czy tropikalny Pacyfik były znacznie chłodniejsze niż w drugiej połowie XX wieku. Globalnie temperatura w tym okresie była zbliżona do tej średniej z drugiej połowy XX wieku.

Warto spojrzeć na ilustrację 1.2.1. i zauważyć, że obecnie średnia temperatura powierzchni Ziemi jest o ok. 0,7°C wyższa niż średnia z drugiej połowy XX wieku, a więc także znacząco wyższa niż podczas ciepłego okresu średniowiecznego. Jako ciekawostkę można podać, że o ile wtedy w Anglii uprawiano winorośl, o tyle współcześnie robi się to w Szkocji. W średniowieczu uprawiano też winorośl w północnej Polsce, bo była taka potrzeba (produkcja wina mszalnego),

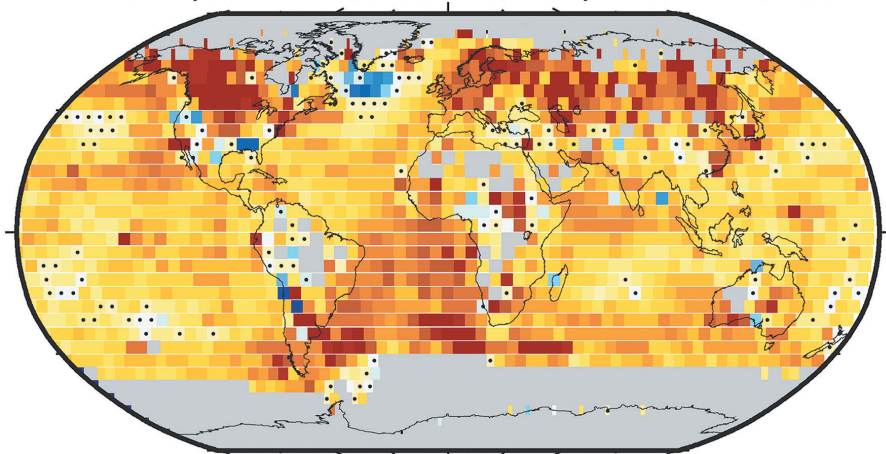


Ilustracja 1.2.2. Zrekonstruowane średnie zmiany temperatury półkuli północnej (górny wykres), południowej (środkowy wykres) oraz globalne (dolny wykres) względem średniej z okresu 1881–1980. Wyniki uzyskane przez różne grupy badawcze są wyróżnione kolorami według miejsca wykonania – czerwone: tylko ląd na różnych szerokościach geograficznych; pomarańczowe: tylko ląd w wysokich szerokościach geograficznych (>30 stopni); jasnoniebieskie: ląd i morze w wysokich szerokościach geograficznych; ciemnoniebieskie: ląd i morze na różnych szerokościach geograficznych; czarne: pomiary instrumentalne serii HadCRUT4 (dla lądu i morza linia ciągła, dla lądów półkuli północnej linia przerywana, dla lądów wysokich szerokości geograficznych linia kropkowana). Pomiary wygładzone filtrem redukującym wahania w skalach czasowych poniżej 50 lat. Uwaga: dane nie obejmują ostatnich lat.

Różnica temperatur: lata 1950-2000 minus ciepły okres średniowieczny 950-1250



Różnica temperatur: lata 1950-2000 minus mała epoka lodowa 1450-1850

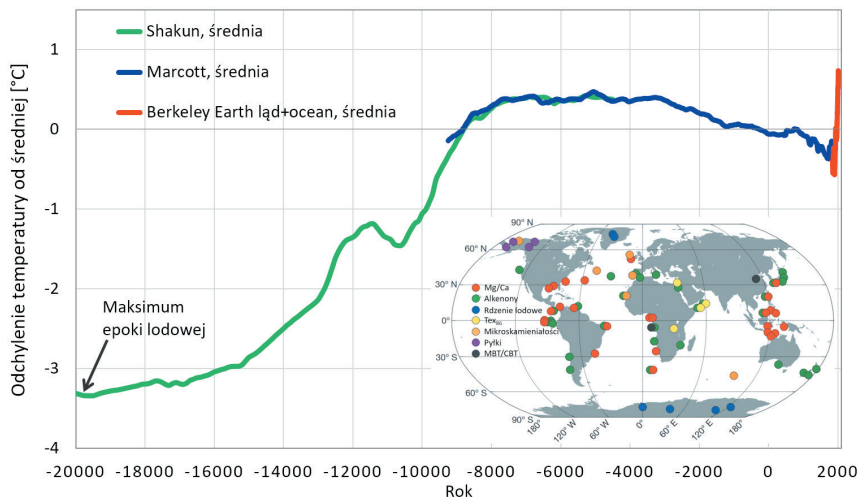


Różnica temperatur [°C]

Ilustracja 1.2.3. Zrekonstruowane na podstawie wskaźników klimatycznych różnice temperatury pomiędzy drugą połową XX wieku a kluczowymi dla klimatu okresami w ostatnim tysiącleciu. Górna mapa: różnica temperatur pomiędzy drugą połową XX wieku a średniowiecznym optimum klimatycznym (ang. *Medieval Warm Period*, MWP) z lat 950–1250. Dolna mapa: różnica temperatur pomiędzy drugą połową XX wieku a małą epoką lodową (ang. *Little Ice Age*, LIA) z lat 1450–1850. Kropki oznaczają miejsca, dla których różnice temperatur nie są statystycznie istotne. Kolor szary oznacza obszary, dla których informacje nie zostały pozyskane.

a transport z południa był niezwykle drogi – zbiory były jednak mizerne. Dziś klimat Dolnego Śląska jest już zbliżony do XX-wiecznego klimatu rejonu Tokaju na Węgrzech. Pojawiły się już nawet uprawy winorośli w Skandynawii^[2].

Sięgając dalej w przeszłość, widzimy, jak stabilny był klimat w ostatnich 11,5 tys. lat, możemy też prześledzić wyjście klimatu Ziemi ze stanu epoki lodowej (co miało miejsce wcześniej).



Ilustracja 1.2.4. Anomalie średniej temperatury powierzchni Ziemi w okresie ubiegłych 22 000 lat względem okresu referencyjnego 1961–1990. Mapa w dolnym prawym rogu przedstawia lokalizacje wraz ze wskaźnikami klimatycznymi wykorzystane w badaniu oznaczonym linią zieloną.

Widać, że zmiany klimatu to coś normalnego w historii naszej planety – 20 tys. lat temu mieliśmy maksimum epoki lodowej, kiedy to północną Polskę oraz znaczne obszary Ameryki i Azji pokrywała wielka czapa lądolodu. Zupełnie gdzie indziej znajdowały się strefy klimatyczne, pustynie i linia brzegowa (bo duża ilość wody znajdowała się nie w oceanach, lecz w lądolodach). Później Ziemia zaczęła wychodzić z epoki lodowej, a około 10 tys. lat temu klimat Ziemi ustabilizował się na obecnym poziomie, z temperaturą około 4°C wyższą niż w czasach maksimum epoki lodowej (różne rekonstrukcje pokazują zakres zmian temperatury od 3 do 5,5°C).

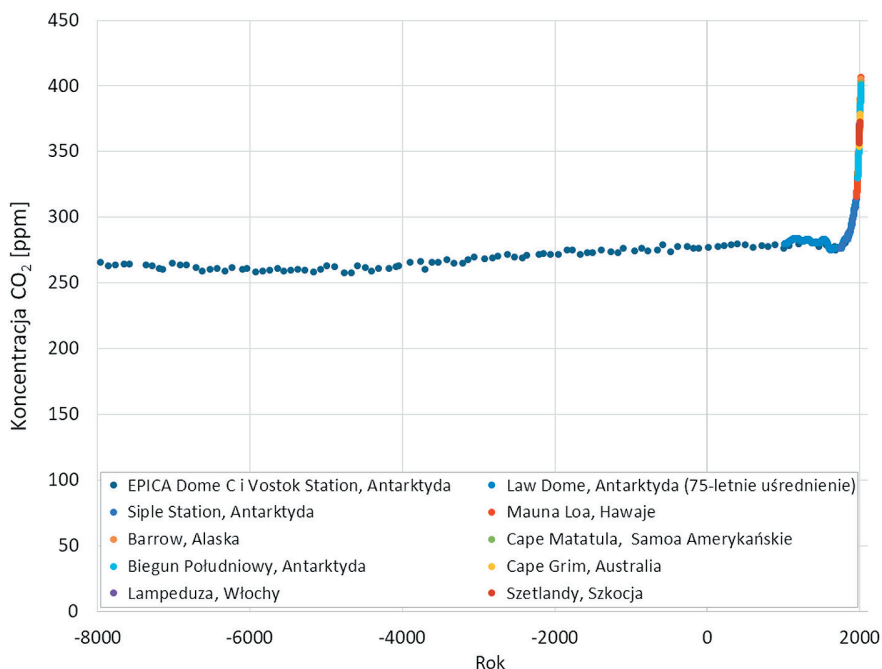
Ta epoka niezmiennych się znacząco temperatur to holocen – okres rozkwitu naszej cywilizacji. Stabilny klimat bardzo nam odpowiadał – nie przesuwały się strefy klimatyczne, rozmieszczenie pustyń czy terenów nadających się pod rolnictwo. Osiedliliśmy się więc: założyliśmy wsie, a następnie miasta. Ustabilizowała się też linia brzegowa, więc mogliśmy pobudować wzdłuż niej miasta portowe.

Ostatni wzrost temperatury, zaznaczony na ilustracji 1.2.4. czerwonym kolorem, wyraźnie odbiega charakterem od pozostałej części wykresu. Średnia globalna

temperatura w dekadzie 2007–2016 przekraczała średnią z holocenu o ok. 1,2°C, a średnią temperaturę najcieplejszego stulecia holocenu o ponad 0,3°C^[3]. Oznacza to, że jest ona obecnie największa co najmniej od interglacjału eemskiego 125 tys. lat temu.

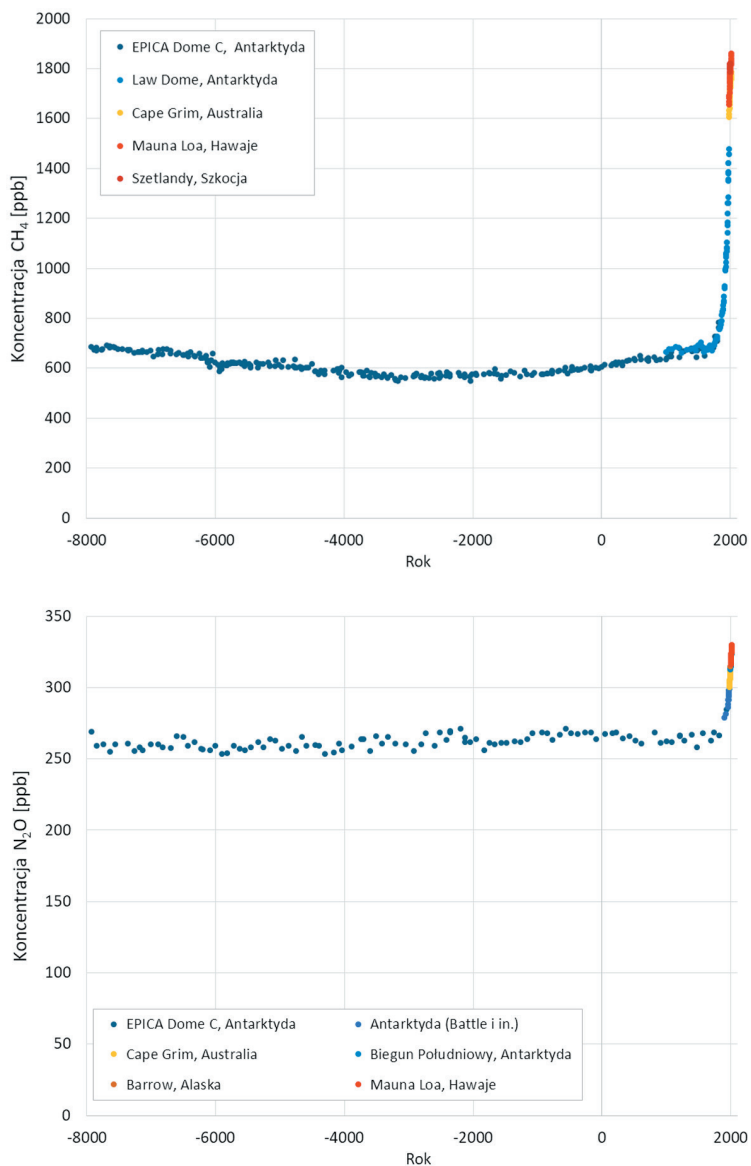
Podobnie nietypowe zmiany w ostatnim okresie zobaczymy, przyglądając się zmianom składu atmosfery, do której doszło wraz z rewolucją przemysłową. Tempo wzrostu atmosferycznego stężenia dwutlenku węgla jest bezprecedensowe w skali ostatnich tysięcy lat.

Koncentracje (określane też jako stężenia) gazów w atmosferze wyrażamy w cząsteczkach na milion cząsteczek powietrza (ang. *particles per million* – ppm), a jeśli gaz występuje w mniejszych koncentracjach, to w cząsteczkach na miliard cząsteczek powietrza (ang. *particles per billion* – ppb) lub nawet w cząsteczkach na bilion cząsteczek powietrza (ang. *particles per trillion* – ppt). Używa się też skrótów ppmv, ppbv i pptv („v” oznacza ang. *volume*, czyli objętość), wprost wskazujących, że chodzi o proporcje objętości/ilości, a nie masy cząsteczek w mieszaninie, ale ponieważ skróty ppm, ppb i ppt są ugruntowane i wynikają z kontekstu, będziemy ich konsekwentnie używać.



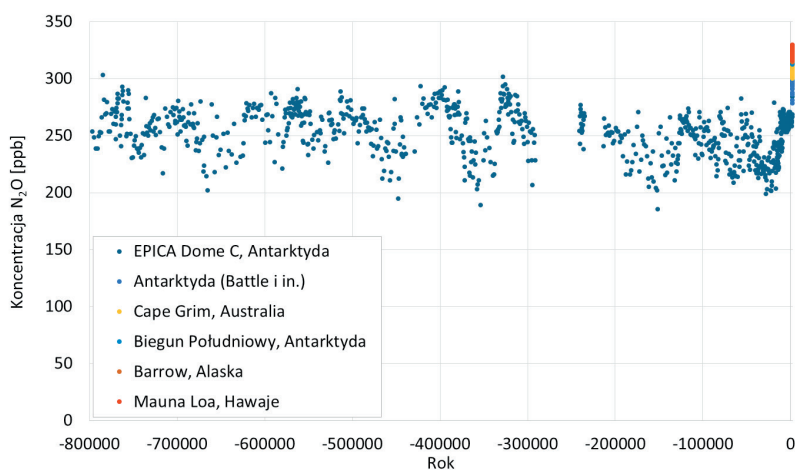
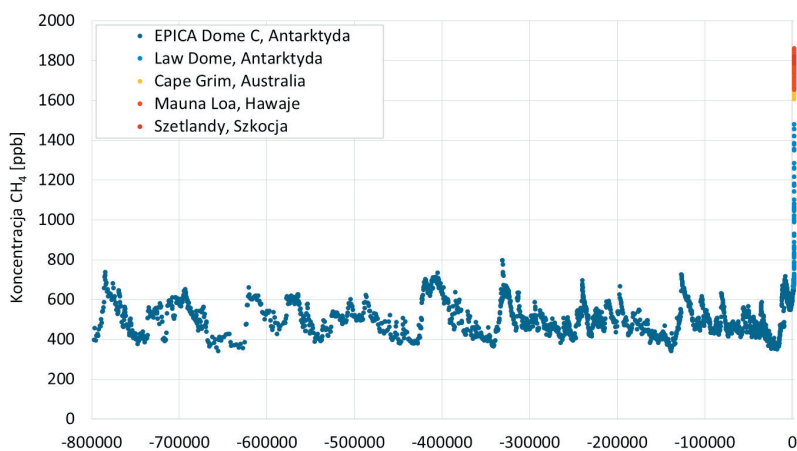
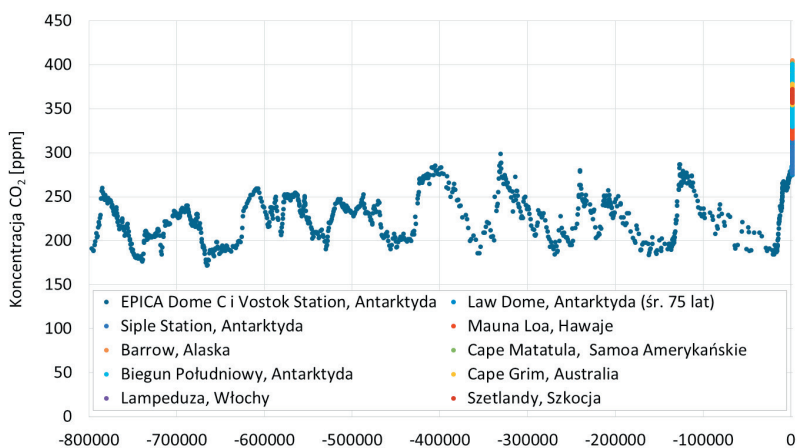
Ilustracja 1.2.5. Zmiany atmosferycznej koncentracji CO₂ w ostatnich 10 000 lat. „0” oznacza 1 rok n.e. Kolorami zaznaczono miejsce pochodzenia próbek, na podstawie których ustalano skład atmosfery.

Dotyczy to zresztą nie tylko dwutlenku węgla, ale i innych gazów cieplarnianych.



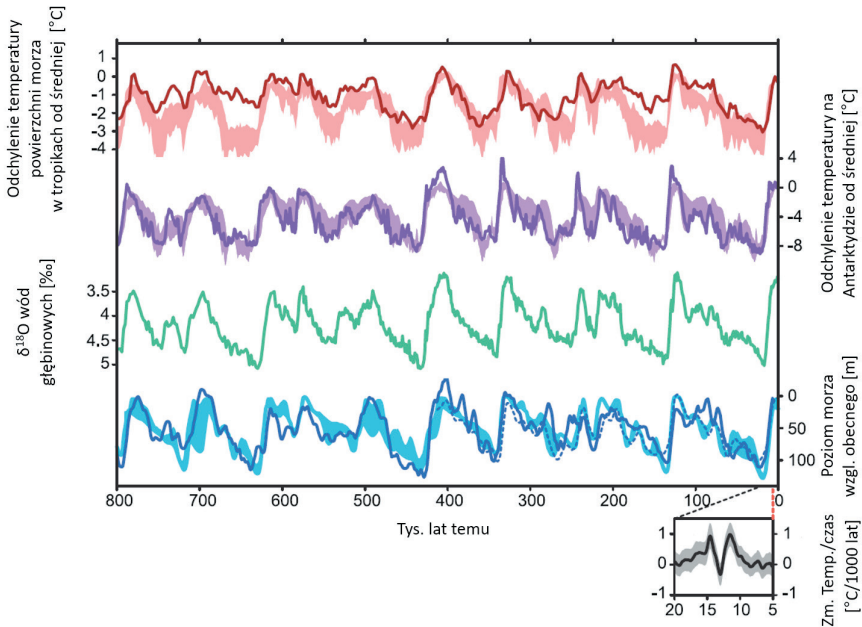
Ilustracja 1.2.6. Zmiany stężeń CH_4 oraz N_2O w atmosferze w ostatnich 10 000 lat., „0” oznacza 1 rok n.e. Kolorami zaznaczono miejsce pochodzenia próbek, na podstawie których ustalano skład atmosfery.

Cofnijmy się dalej w przeszłość i przyjrzyjmy zmianom atmosferycznej koncentracji CO_2 , CH_4 i N_2O w ciągu ostatnich 800 tysięcy lat.



Ilustracja 1.2.7. Zmiany atmosferycznej koncentracji CO₂, CH₄ i N₂O w ostatnich 800 000 lat.

Gdy Ziemia wychodziła z epoki lodowej, stężenie CO_2 w ciągu 10 000 lat wzrosło o niecałe 100 ppm, z ok. 180 do 270 ppm – rosnąc w tempie poniżej 1 ppm na **stulecie**. W ostatniej dekadzie rosło w średnim tempie ponad 2 ppm **rocznie** – 200 razy szybciej. Również w przypadku innych gazów cieplarnianych obecne tempo wzrostu jest bezprecedensowe. Uwagę na ilustracji 1.2.7. zwracają też oscylacje stężeń gazów cieplarnianych w okresie około 100 000 lat. Skorelowane oscylacje stwierdzamy też dla wielu zmiennych klimatycznych, w tym m.in. temperatury, rozmiaru czap lodowych czy poziomu morza (ilustracja 1.2.8.).



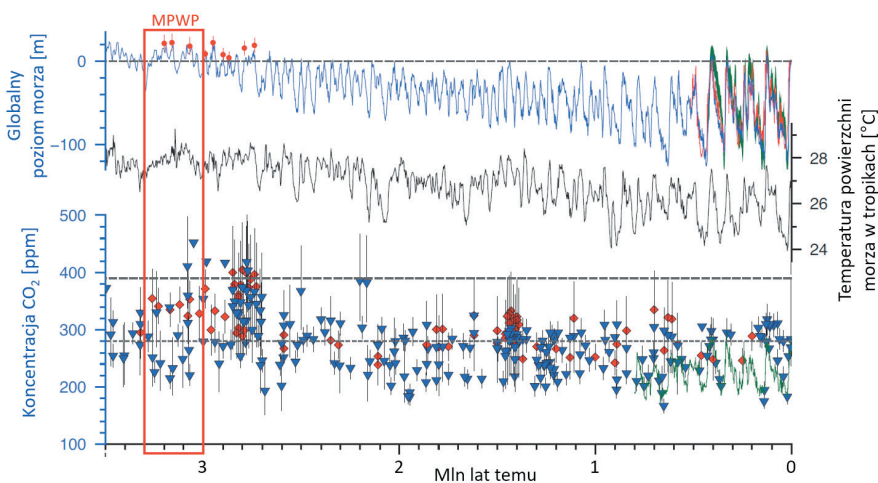
Ilustracja 1.2.8. Górny wykres: anomalia temperatury powierzchni morza w strefie międzyzwrotnikowej. Drugi wykres od góry: anomalia temperatury na Antarktydzie. Trzeci od góry: $\delta^{18}\text{O}$ jako wskaźnik globalnej objętości lądolodów (więcej na ten temat w rozdziale 6.3.). Dolny wykres: rekonstrukcja średniego globalnego poziomu morza. Prawy dolny róg: tempo zmian średniej globalnej temperatury podczas wychodzenia z ostatniej epoki lodowej. Uwaga: dane na wykresie nie uwzględniają zmian w ostatnich dekadach.

Widzimy tu cykl epok lodowych i ciepłych okresów interglacjalnych. Poprzedni interglacjał (tzw. eemski, określane też bardziej technicznie jako MIS5e) miał miejsce około 125 tys. lat temu i był średnio o ok. 0,5–1°C cieplejszy od obecnego (czyli holocenu). Uwagę zwraca zgodność oscylacji różnych elementów systemu klimatycznego Ziemi: stężeń gazów cieplarnianych, temperatury, rozmiarów lądolodów i poziomu morza. Tego zresztą powinniśmy się spodziewać: wysokie temperatury oznaczają kurczenie się lądolodów, wpływająca zaś z topniejących lądolodów woda podnosi światowy poziom morza. Podczas maksimum ostat-

niej epoki lodowej poziom morza był aż o 120 metrów niższy niż w holocenie. W cieplejszym od holocenu interglacjale eemskim poziom morza był zaś wyższy o 6–9 metrów.

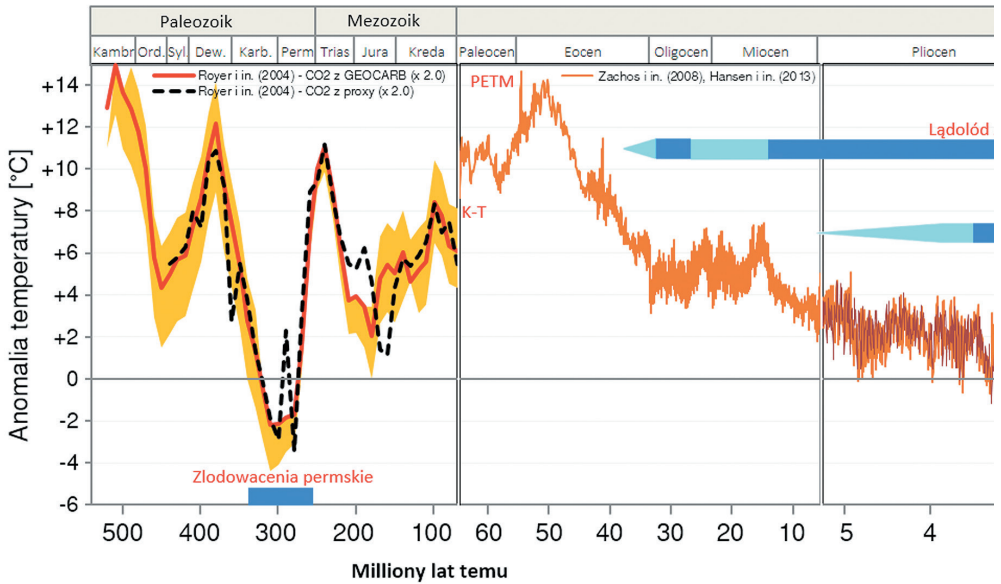
Na uwagę zasługuje też korelacja pomiędzy średnią globalną temperaturą a stężeniem gazów cieplarnianych. Co jest przyczyną, a co skutkiem? Czy to wzrost koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze powoduje wzrost temperatury, czy też wzrost temperatury powierzchni planety powoduje wzrost koncentracji gazów cieplarnianych? Precyzyjne badania pokazują, że najpierw rośnie temperatura, a dopiero kilka stuleci później następuje wzrost stężenia gazów cieplarnianych. Sugeruje to, że to wzrost temperatury powoduje wzrost stężenia gazów cieplarnianych. To z kolei zwrótnie wpływa na temperaturę. Przyjrzymy się temu bliżej w rozdziale 3.1.

Zdecydowane oscylacje temperatury charakterystyczne dla cyklu epok lodowych i interglacjalów to domena ostatniego miliona lat. Cofając się w przeszłość o 2–3 mln lat, trafiamy na cieplejszy okres w pliocenie, z wyższym poziomem morza i stężeniem CO₂.



Ilustracja 1.2.9. Zmiany globalnego poziomu morza na podstawie trzech wskaźników: izotopu ¹⁸O dla objętości lądolodów (linia niebieska), pozostałości koralowców (linia zielona) i izotopowych rekonstrukcji z Morza Czerwonego (linia czerwona). Czerwone kropki w okolicach 3 mln pokazują uśrednione rekonstrukcje maksymalnych poziomów morza podczas interglacjalów. Pozioma przerywana linia to obecny poziom morza. Drugi panel od góry (linia czarna): Rekonstrukcja temperatury powierzchni morza w strefie międzyzwrotnikowej na podstawie alkenonów (patrz rozdział 6.3.). Dolny panel: atmosferyczna koncentracja CO₂ na podstawie rdzeni lodowych (linia zielona) i innych wskaźników (czerwone kwadraty – fitoplankton, niebieskie trójkąty – bor). Atmosferyczne stężenia CO₂ w epoce przedprzemysłowej (280 ppm) oraz 2012 roku (390 ppm) są zaznaczone szarymi przerywanymi liniami. Uwaga: dane na wykresach nie uwzględniają zmian w epoce przemysłowej. MPWP oznacza ciepły okres w środkowym pliocenie (ang. *mid-Pliocene Warm Period*).

Widać, że obecne stężenie CO₂ (ok. 410 ppm) jest prawdopodobnie najwyższe w ciągu ostatnich milionów lat. Widać też, że już niewiele wyższa temperatura wystarczy, aby światowy poziom morza był wyższy o ok. 20 metrów.

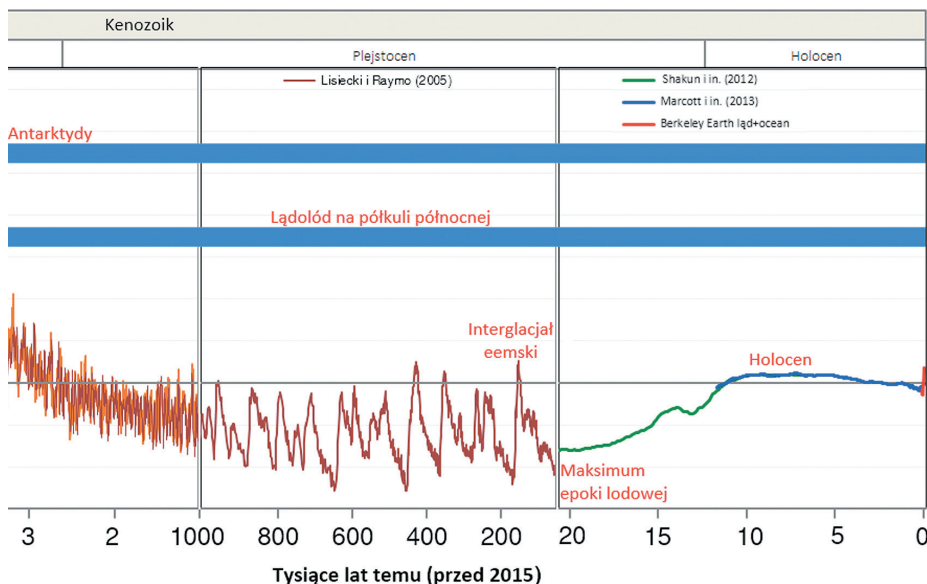


Ilustracja 1.2.10. Oszacowania zmian średniej temperatury powierzchni Ziemi w czasie ostatnich 540 mln lat względem okresu bazowego 1961–1990 (średnia temp. Ziemi ok. 14°C). **UWAGA: Skala pozioma liniowa w ramach każdego segmentu jest inna – im bliżej teraźniejszości, tym wyższa rozdzielczość czasowa.** Granice między segmentami związane są ze znaczącymi zmianami geologiczno-klimatycznymi: 65 mln lat temu granica KT między mezozoikiem i kenozoikiem (wymarcie dinozaurów); 5,3 mln lat temu granica miocen–pliocen; 1 mln lat temu rozpoczęcie trwających ok. 100 tys. lat cykli zlodowaceń na półkuli północnej; 20 tys. lat temu – maksimum ostatniego zlodowacenia. Niebieskie linie oznaczają epizody zlodowaceń, pola jasnoniebieskie pokazują częściowe zlodowacenia, pola ciemnoniebieskie – trwałe. 34 mln lat temu powstał łądolód Antarktydy (okresowo malejąc lub wręcz znikając na przełomie oligocenu i miocenu), łądolód w Arktyce liczy sobie zaledwie kilka milionów lat.

We wcześniejszej historii Ziemi temperatura bywała jeszcze wyższa. Zestawienie rekonstrukcji na ilustracji 1.2.10. nie jest oczywiście bardzo dokładne, szczególnie w przypadku dawnych epok geologicznych, jednak pozwala wyrobić sobie wyobrażenie o skali zmian klimatu, przez które przechodziła nasza planeta.

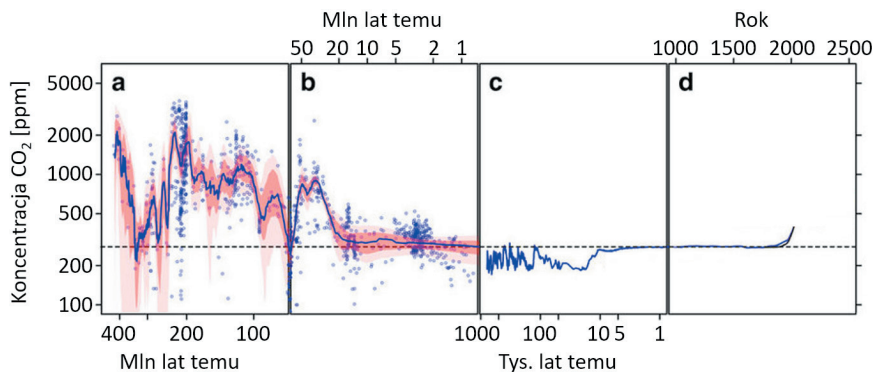
Podczas epok lodowych średnia temperatura powierzchni Ziemi była o 4–5°C niższa niż w holocenie, w pliocenie kilka milionów lat temu była wyższa o 2–3°C, w czasach dinozaurów (jurze i kredzie) była wyższa o 4–8°C, a w eocenie, dewonie czy kambrze o 6–14°C. To były naprawdę Wielkie Zmiany Klimatu, przy których obecny wzrost temperatury o ok. 1°C (czerwona linia po prawej stronie wykresu) nie wygląda szczególnie imponująco.

Zdarzały się też epizody ekstremalnych zmian temperatury, kiedy w krótkim w skali geologicznej czasie (kilka – kilkadziesiąt tysięcy lat) następował jej gwałtowny wzrost o kilka stopni. Na ilustracji 1.2.10. maksimum temperatury podczas PETM (paleo-eoceńskie maksimum termiczne) 55,8 mln lat temu lub podczas przełomu permu i triasu 251 mln lat temu wyskoczyłyby w górę poza skalę rysunku. Jak do nich dochodziło? Dlaczego te zjawiska wiązały się z epizodami wielkich



wymierañ? Aby rozwiązać te zagadki, trzeba wziąć pod uwagę wiele innych wskaźników i danych, nie tylko zmiany temperatury.

Przyjrzyjmy się jeszcze stężeniom dwutlenku węgla w ostatnich setkach milionów lat, pokazanych na ilustracji 1.2.11.



Ilustracja 1.2.11. Rekonstrukcja zmian koncentracji CO_2 w atmosferze w ostatnich 400 mln lat. UWAGA: skala czasowa nie jest liniowa. Panele a–b) na podstawie różnych wskaźników klimatycznych (niebieskie kropki odpowiadają konkretnym pomiarom, a linia – dopasowanej do nich krzywej, czerwona wstęga pokazuje zakres, w którym faktyczny przebieg zmian temperatury mieści się z prawdopodobieństwem 68%, a wstęga różowa odpowiada prawdopodobieństwu 95%, panel c) rdzenie lodowe, panel d) rdzenie lodowe i obserwacje.

Widzimy, że stężenie CO_2 bywało znacznie wyższe niż obecnie, ponad 50 mln lat temu sięgając aż 1000 ppm. W okresie 50–20 mln lat temu stężenie CO_2 zmniejszyło się o ok. 700 ppm, spadając w średnim tempie 1 ppm na 40 tys. lat. Wartości zbliżone do obecnych (400 ppm) po raz ostatni miały miejsce około 3–5 mln lat

temu, a długoterminowo średnie stężenie utrzymywało się ostatnio na tym poziomie w miocenie 16 mln lat temu. Jeśli sięgniemy jeszcze dalej w przeszłość, setki milionów lat wstecz, zobaczymy, że przez większość ostatnich 420 mln lat stężenie CO₂ w atmosferze Ziemi utrzymywało się na znacznie wyższym poziomie niż obecnie, w kredzie i jurze stężenia rzędu 1000 ppm były normą, a jeszcze wcześniej sięgały one nawet 2000 ppm. W zestawieniu z tym ostatni wzrost stężenia CO₂ z 280 ppm do 410 ppm nie wydaje się szczególnie wysoki.

Tym niemniej warto zauważyć, że obecne zmiany następują tak szybko, że jeszcze niedawno mogliśmy mówić o „najwyższych stężeniach CO₂ od kilku milionów lat”, teraz powinniśmy mówić o „najwyższych stężeniach CO₂ od kilkunastu milionów lat”, a jeśli szybkie tempo wzrostu jego koncentracji w atmosferze utrzyma się w kolejnych dekadach, to już wkrótce będziemy mówić o „najwyższym stężeniu CO₂ od kilkudziesięciu milionów lat”.

Gdy patrzymy na ilustracje 1.2.10. i 1.2.11., ponownie – jak podczas cyklu epok lodowych – można zauważyć korelację pomiędzy temperaturą i stężeniem CO₂.


Cofnęliśmy się w przeszłość niemal o pół miliarda lat. Wcześniej dochodziło do jeszcze większych zmian klimatu, łącznie z sytuacją, kiedy to lądolody pokrywały całą planetę aż po równik (przynajmniej raz, ponad 650 mln lat temu, a bardzo możliwe, że nawet kilka razy w okresie 580–780 mln lat temu). Taki stan naszej planety nazwano „Ziemią-śnieżką” (ang. *Snowball Earth*).

Ziemia skuta lądolodem po równik? Jak do tego mogło dojść? I jak Ziemia, zamieniona w odbijające światło Słońca lodowe zwierciadło, zdołała wyjść z tego stanu?

Wiemy, że mroźne okresy, w których Ziemia była Ziemią-śnieżką były jedynie epizodami na tle długich okresów umiarkowanych temperatur. Zupełnie uzasadnione jest postawienie kolejnego pytania: dlaczego przez pierwsze miliardy lat swojego istnienia nasza planeta nie znajdowała się w permanentnym stanie Ziemi-śnieżki? Wiemy przecież, że kiedyś Słońce świeciło znacznie słabiej, zwiększając swoją moc stopniowo mniej więcej w tempie 1% na 100 milionów lat. Gdy więc Układ Słoneczny był młody, Słońce świeciło aż o 30% słabiej niż obecnie. Jednocześnie mamy zaś dowody na to, że już wkrótce po powstaniu naszej planety były na niej oceany z ciekłą wodą – i z wyjątkiem krótkich epizodów globalnych zlodowaceń był to stan typowy. Gdyby Ziemia u swojego zarania miała atmosferę podobną do obecnej, to aby panowały na niej wystarczająco wysokie temperatury do istnienia ciekłej wody, musiałaby być idealnie czarną kulą, pochłaniającą całą energię padającego na nią promieniowania, co nie mogło mieć miejsca. Oczywiście dawna atmosfera Ziemi różniła się od obecnej – i tu tkwi rozwiązanie „paradoksu słabego Słońca”. Jak zobaczymy, nasza planeta posiada mechanizmy całkiem skutecznie stabilizujące panujące na jej powierzchni warunki.

Poszukiwanie odpowiedzi na te wszystkie pytania to fascynująca przygoda. Pozwala lepiej zrozumieć i docenić, jak wspaniałym i ciekawym miejscem jest planeta, na której żyjemy.

2. MASZYNA KLIMATYCZNA

A detailed close-up photograph of a mechanical watch movement. The image shows a complex arrangement of gold-colored gears of various sizes, some with teeth. A prominent feature is a large gear with a pink jewel at its center. The metal parts are finely machined and show signs of wear. The background is a dark, textured surface, possibly the watch case or a background plate. The lighting is dramatic, highlighting the metallic surfaces and the intricate details of the mechanism.

Wiedza o tym, co i kiedy się dzieje, jest bardzo ważna. Aby odpowiedzieć na pytanie, dlaczego to się dzieje, trzeba zrozumieć szereg mechanizmów i zjawisk, będących „trybikami” systemu klimatycznego.

2.1. Bilans energetyczny

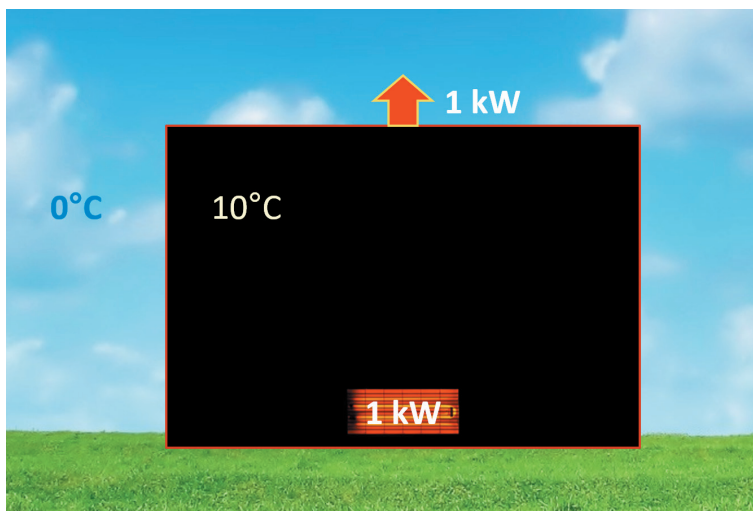
Jeśli pojęcia przepływów i bilansów energii (nie mówiąc o efekcie cieplarnianym, cyklu węglowym czy transferze radiacyjnym) brzmią dla Ciebie egzotycznie, nie obawiaj się – wprowadzimy Cię w temat za pomocą prostych przykładów.

Wyobraź sobie stojący na polu dom. Jest zimowy dzień, a temperatura na zewnątrz wynosi 0°C . Budynek jest słabo ocieplony i pomimo dostarczania do niego energii, na przykład z ciepłowni do węzła cieplnego w piwnicy, panuje w nim dość niska temperatura 10°C .

Temperatura jest miarą energii wewnętrznej. Skoro temperatura w domu jest stała, to stała jest też zawartość energii wewnętrznej. Jak to możliwe, skoro dostarczamy do budynku ciepło? Odpowiedź jest prosta: tyle samo energii jednocześnie ucieka z domu na zewnątrz, przenikając przez ściany, okna itd., dzięki czemu bilans energetyczny jest zerowy, a temperatura jest stała. Inaczej mówiąc, aby utrzymać wewnątrz

W stanie równowagi energetycznej układ otrzymuje i emituje tyle samo energii.

budynek temperaturę wyższą niż na dworze, należy dostarczać do niego tyle energii, ile jej ucieka.



Ilustracja 2.1.1. Przykładowa sytuacja w stanie równowagi termicznej: do domu dostarczamy energię w tempie 1 kW (czyli 1000 dżuli na sekundę), ucieka również 1 kW , a więc zawartość energii wewnętrznej w budynku jest stała (co przekłada się na stałą temperaturę, w naszym przykładzie 10°C).

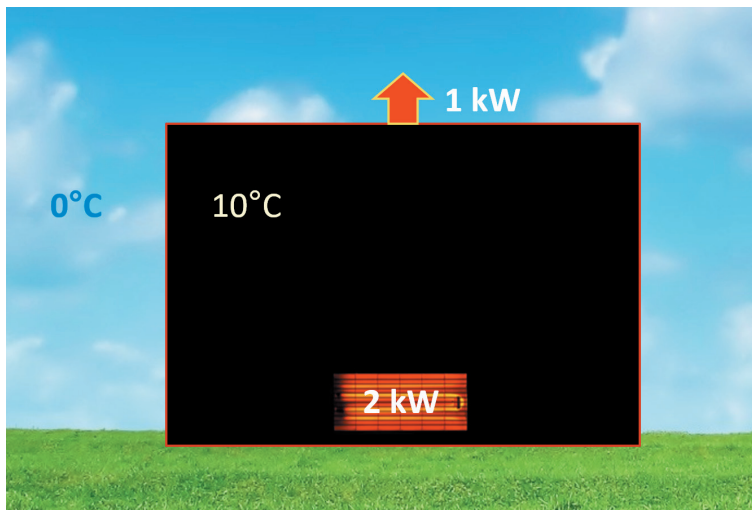
Oczywiście w praktyce sytuacja jest trochę bardziej złożona. Wiele zależy od tego, jak rozprowadzimy gorącą wodę po mieszkaniu, jak rozmieściliśmy grzejniki, jaka jest powierzchnia ścian zewnętrznych w konkretnych pomieszczeniach, czy w piwnicy mamy duży zbiornik, w którym gromadzimy ciepłą wodę wykorzystywaną do ogrzewania itd. Nawet przy ustalonym dopływie energii do domu, temperatury

w różnych pokojach nie będą identyczne, lokalnie lub chwilowo równowaga energetyczna może być zaburzana. Ostatecznie można jednak przyjąć, że przy stałych warunkach, gdy powstrzymamy się od kręcenia zaworami (fizycy mówią „w stanie stacjonarnym”), po pewnym czasie we wnętrzu ustabilizuje się rozkład przepływów ciepła i temperatur (w naszym przykładzie odpowiadający średniej temperaturze wynoszącej 10°C).

Mieszkańcy budynku, w którym panuje temperatura 10°C raczej nie będą z tej sytuacji zadowoleni, woleliby mieć wyższą temperaturę. Aby to osiągnąć, mają do wyboru dwie drogi: mocniej ogrzewać lub zmniejszyć ucieczkę ciepła z budynku, na przykład ocieplając go. Przyjrzyjmy się obu opcjom przez pryzmat bilansu energetycznego i jego zmian.

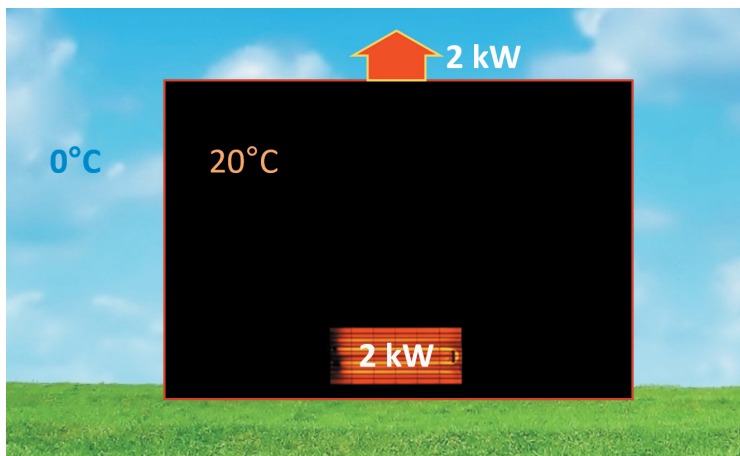
Opcja 1: większa moc grzejnika

Przyjmijmy, że podwajamy dostarczaną do węzła ciepłego moc do 2 kW. W wyniku powstałej nierównowagi bilansu energetycznego, w domu zacznie kumulować się energia (dostarczamy energię w tempie 2 kW, a ucieka 1 kW).



Ilustracja 2.1.2. Sytuacja bezpośrednio po zwiększeniu mocy grzejnika do 2 kW. Temperatura w budynku jeszcze się nie zmieniła, więc ucieka z niego wciąż 1 kW energii. Ponieważ dostarczamy więcej energii, niż ucieka, energia wewnętrzna domu będzie więc rosła (czyli będzie rosła temperatura).

Oznacza to, że wewnątrz będzie rosła temperatura. Stopniowo rosłać będzie też różnica temperatury między wnętrzem domu a otoczeniem, a wraz z nią tempo ucieczki energii przez ściany. W końcu ustali się nowy stan równowagi, teraz jednak odpowiadający wyższej temperaturze we wnętrzu budynku. W nowym stanie ucieczka ciepła przez ściany na zewnątrz znowu będzie równoważyć dopływ ciepła do budynku (2 kW), co widzimy na ilustracji 2.1.3.

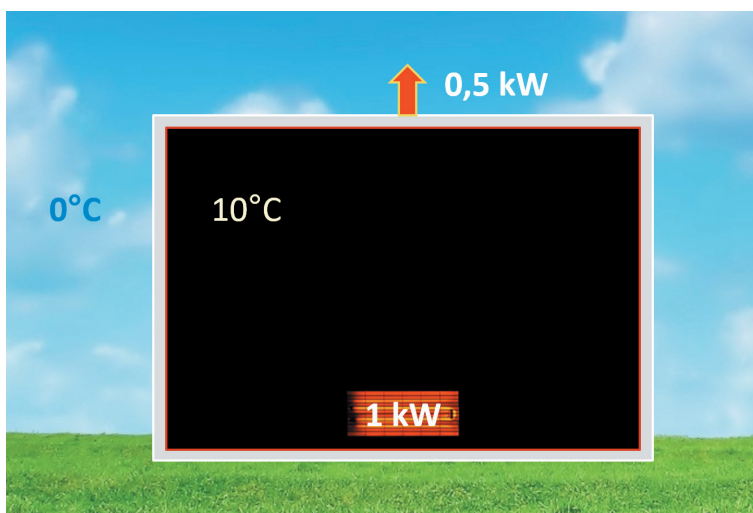


Ilustracja 2.1.3. Sytuacja po upływie pewnego czasu. Temperatura wewnątrz domu wzrosła. Przy wyższej różnicy temperatur między wnętrzem domu a otoczeniem znów ucieka tyle energii, ile dostarczamy – osiągnięty jest więc stan równowagi energetycznej – tyle że przy wyższej różnicy temperatur (w przykładzie 20°C).

W budynku jest cieplej, mieszkańcy będą więc zadowoleni – przynajmniej do momentu, gdy przyjdzie dwukrotnie wyższy rachunek za ogrzewanie...

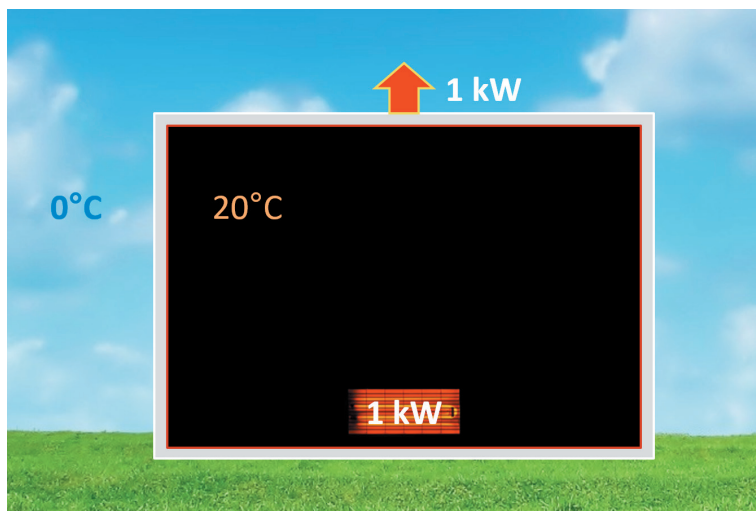
Opcja 2: ocieplenie budynku

Wyobraźmy sobie, że dom błyskawicznie pokrywamy izolacją. Przez grubszą izolację będzie uciekać mniej energii. W przykładzie z ilustracji 2.1.4. – już nie 1 kW, lecz 0,5 kW.



Ilustracja 2.1.4. Sytuacja po błyskawicznie przeprowadzonym dociepleniu domu. Przez grubszą izolację ucieka mniej energii, w pokazanym przykładzie 0,5 kW. Grzejnik cały czas dostarcza 1 kW. Energia wewnętrzna domu będzie więc rosła (czyli będzie rosła temperatura).

W wyniku powstałej nierównowagi bilansu energetycznego, w budynku zacznie kumulować się energia (dostarczamy energię w tempie 1 kW, a ucieka 0,5 kW). Podobnie jak w poprzednim przykładzie, ta nierównowaga energetyczna spowoduje wzrost temperatury w budynku, aż do momentu, w którym ucieczka ciepła na zewnątrz znowu będzie równoważyć dopływ ciepła do budynku, co widzimy na ilustracji 2.1.5.



Ilustracja 2.1.5. Sytuacja po upływie pewnego czasu. Temperatura wewnątrz domu wzrosła. Przy wyższej różnicy temperatur między wnętrzem domu a otoczeniem znów ucieka 1 kW – osiągnięty jest więc stan równowagi energetycznej – tyle że przy wyższej różnicy temperatur (w przykładzie 20°C).

W opisanym scenariuszu ocieplenia budynku dopływ energii cały czas wynosił 1 kW, a komfort termiczny (po dokonaniu początkowej inwestycji) nie wiąże się z wyższymi rachunkami za ogrzewanie.

Z perspektywy obserwatorów na zewnątrz i wewnątrz budynku

Strumienie dopływającej do budynku i uciekającej z niego energii można zmierzyć. Żeby wiedzieć, ile nasz dom zużywa energii w jednostce czasu, można zmierzyć dopływ tej energii w rurociągu z gorącą wodą z ciepłowni. Ucieczkę ciepła przez ściany można określić, korzystając na przykład z kamery termowizyjnej.

W scenariuszu ocieplenia budynku dla kogoś z zewnątrz, kto nie sprawdzi, jak zmienił się odpływ ciepła przez ściany, nie będzie żadnej różnicy między stanem domu bez izolacji i z izolacją, ponieważ w obu przypadkach energia jest pobierana i ucieka w tempie 1 kW.

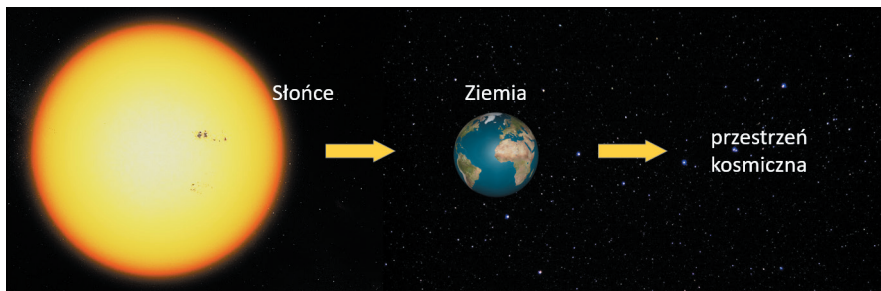
Inaczej będzie, gdy temperatura w domu wzrośnie wskutek zwiększonej dostawy ciepła z ciepłowni. Będzie można to oszacować i na wlocie – w przewodzie ciepłowniczym, i na wylocie – mierząc, ile ciepła ucieka przez ściany, a nawet mierząc

samą temperaturę zewnętrznej powierzchni ścian: będzie ona większa niż przed wzrostem dostawy ciepła.

W ten sposób, nie znając nawet szczegółów budowy budynku i instalacji, można łatwo odróżnić, czy ociepla się w środku z powodu wzrostu dostawy ciepła z ciepłowni, czy wskutek polepszenia izolacji. Można też, mierząc same tylko zmiany dostawy i ucieczki ciepła stwierdzić, że wewnątrz budynku zmienia się temperatura i co jest tego przyczyną: zmiana w ilości dostarczanego ciepła, czy zmiana w izolacji.

Czemu tak dokładnie opisaliśmy nasz przykład? Ponieważ to, co się dzieje aktualnie z ziemskim systemem klimatycznym, jest bliską analogią tego, co się dzieło w naszym prostym przykładzie ocieplenia domu. W stabilnym klimacie ilość opuszczającej Ziemię energii odpowiada ilości energii do niej dostarczanej, podobnie jak dla opisanej sytuacji domu. W przypadku Ziemi rolę grzejnika gra Słońce, rolę utrudniającej ucieczkę ciepła izolacji gra zaś atmosfera. Zmiana właściwości atmosfery, powodująca utrudnienie ucieczki energii z naszej planety jest odpowiednikiem ocieplenia domu.

W obu przypadkach energia przepływa od źródła o najwyższej temperaturze, przez miejsce o średniej temperaturze do ośrodka o najniższej temperaturze (odpowiednio: gorąca woda z ciepłowni → wewnątrz domu → chłodne otoczenie budynku oraz Słońce → Ziemia → przestrzeń kosmiczna).



Ilustracja 2.1.6. Kierunek przepływu energii: od gorącego grzejnika (Słońce), przez dom (Ziemia) po chłodne otoczenie (przestrzeń kosmiczna).

Zadanie

2.1.1. Po obłożeniu lepszą izolacją lub zwiększeniu mocy źródła ciepła, większość wzrostu temperatury wewnątrz budynku nastąpiłaby w ciągu kilkunastu godzin. Skale czasowe zmian zachodzących w ziemskim systemie klimatycznym są znacznie dłuższe. Policzn, jak długi czas byłby potrzebny, żeby strumień energii równy 1 W/m^2 zwiększył temperaturę w głębokim na 4 km oceanie o 1°C . Przyjmij gęstość wody $d = 1000 \text{ kg/m}^3$, ciepło właściwe wody $C_w = 4200 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$. Wskazówka: dla wygody obliczeń weź pod uwagę prostopadłościenny blok wody o polu podstawy $S = 1 \text{ m}^2$.

Odpowiedzi do zadań znajdziesz na końcu książki, przed bibliografią.

Wymuszenia i sprzężenia

Omawiając bilans energetyczny naszej planety, często będziemy określać poszczególne zjawiska przyczyniające się do zmian klimatu mianem „wymuszenia” lub „sprzężenia”.

Wymuszenia to wpływające na klimat zjawiska pochodzące z zewnątrz systemu klimatycznego (atmosfery, hydrosfery, kriosfery i biosfery). Zmianę klimatu naszej planety mogą wymuszać czynniki astronomiczne, takie jak zmiany aktywności Słońca lub orbity Ziemi. Mogą ją też wymuszać czynniki na naszej planecie, takie jak np. zmiany atmosferycznej koncentracji gazów cieplarnianych lub zapylenia atmosfery w wyniku działania czynników naturalnych, takich jak aktywność wulkaniczna czy też w wyniku działań człowieka.

Sprzężenia to wpływające na klimat zjawiska zachodzące wewnątrz systemu klimatycznego (w atmosferze, hydrosferze, kriosferze i biosferze) będące skutkiem działania wymuszeń. Początkowy bodziec wymuszający zmianę klimatu wywołuje reakcję systemu klimatycznego. Mogą to być np. nasilenie parowania, zmiany zachmurzenia albo topnienie lodu morskiego wynikające ze wzrostu temperatury powietrza i oceanu. Odpowiedzi mogą potęgować lub hamować zaburzenia, przez które zostały uruchomione. Jeśli bodźcem jest wymuszenie, to reakcję na te wymuszenia nazywamy:

- **sprzężeniami ujemnymi**, czyli reakcjami układu osłabiającymi działanie wymuszenia. Przykładowo, gdy temperatura ciała rośnie, rośnie też ilość wypromieniowywanej przez nie energii, co spowalnia wzrost temperatury (patrz rozdział 2.2.). Jest to mechanizm stabilizujący system.
- **sprzężeniami dodatnimi**, czyli reakcjami układu wzmacniającymi działanie wymuszenia. Przykładowo, wzrost temperatury powietrza niesie za sobą wzrost zawartości pary wodnej w powietrzu. Więcej pary wodnej oznacza wzmocnienie efektu cieplarnianego, a co za tym idzie – dalszy wzrost temperatury (więcej o tym w rozdziałach 2.6. i 2.9.). Niezbyt silne sprzężenie dodatnie wzmacnia początkowe zaburzenie, ale bez radykalnej zmiany stanu układu. Silne sprzężenie dodatnie może zdestabilizować układ, wprowadzając go w inny stan.

Przykłady dodatnich i ujemnych sprzężeń działających w ziemskim systemie klimatycznym omówimy dokładniej w rozdziale 2.17.

2.2. Promieniowanie

W próżni kosmicznej nie ma przewodzenia ciepła ani unoszenia go w postaci jawnej czy utajonej. Energia emitowana przez Słońce, będące głównym dostawcą energii do ziemskiego systemu klimatycznego, przenoszona jest za pośrednictwem promieniowania elektromagnetycznego.